

RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-07-86090-05803A

16/04/2007

**Évaluation et traitement du risque de fontis lié à
l'exploitation minière**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Evaluation et traitement du risque de fontis lié à l'exploitation minière

Direction du Sol et du Sous-sol

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

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	X. DAUPLEY	M. GHOREYCHI
Qualité	Ingénieurs à l'Unité Risques Géotechniques liés à l'Exploitation du sous-sol de la Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol	Responsable de l'Unité Risques Géotechniques liés à l'Exploitation du sous-sol de la Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-Sol
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

SYNTHESE

1. INTRODUCTION	13
2. DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE DE FONTIS	15
2.1 Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM)	15
2.2 Définition du fontis.....	15
2.2.1 Prédilection de l'apparition de fontis	17
2.2.2 Géométrie du désordre en surface	18
3. MOYENS DE RECONNAISSANCE PRÉALABLES	21
3.1 Localiser les vides	21
3.2 Préciser les vides	21
3.2.1 Méthodes géophysiques	22
3.2.2 Forages destructifs et/ou carottés.....	22
3.2.3 Reconnaissance des cavités	23
3.3 Essais en laboratoire.....	24
3.4 Cas particulier des exploitations pentées ou filoniennes	25
4. MÉTHODES D'ÉVALUATION DE L'ALÉA FONTIS	27
4.1 Notations	27
4.2 Méthodes empiriques et semi-empiriques.....	28
4.2.1 Rapport de l'épaisseur du recouvrement sur l'ouverture des travaux souterrains.....	28
4.3 Méthodes analytiques	29
4.4 Modèles numériques	32
4.4.1 Données d'entrée	32
4.4.2 Quelques modèles et codes de calcul	32
4.4.3 Remarques concernant les modèles numériques.....	34
4.5 Recommandations pour le choix des outils et modèles.....	35
4.6 Recommandations pour le choix des paramètres	36
4.6.1 Angle de dépôt du talus	36
4.6.2 Coefficient de foisonnement	37
4.6.3 Rayon de remontée de cheminée.....	37
5. TECHNIQUES DE MITIGATION DU RISQUE FONTIS.....	39

5.1	Aménagement du territoire.....	39
5.2	Surveillance.....	40
5.2.1	Inspection visuelle	40
5.2.2	Inspection par méthodes indirectes	41
5.2.3	Surveillance instrumentée	42
5.3	Techniques de traitement.....	42
5.3.1	Techniques de prévention actives	46
5.3.1.1	Techniques de consolidation	46
5.3.1.2	Techniques de comblement des vides	47
5.3.1.3	Techniques de suppression des vides	53
5.3.2	Techniques de prévention passives.....	54
5.3.2.1	Renforcement de la structure	54
5.3.2.2	Renforcement du sol de fondation.....	55
5.3.2.3	Dimensionnement des fondations	57
5.3.2.4	Adaptation des réseaux souterrains et de la voirie	57
6.	MESURES CURATIVES.....	59
7.	CONCLUSION.....	61
8.	BIBLIOGRAPHIE	63
9.	LISTE DES ANNEXES	67

SYNTHÈSE

Les résultats des études techniques PPRM par l'INERIS ces dernières années montrent que, parmi les phénomènes de « mouvements de terrain » résiduels, l'effondrement localisé, et plus particulièrement le fontis au droit de travaux miniers à faible profondeur, correspond à un aléa fréquemment rencontré à faible profondeur et important à considérer. Il l'est d'autant plus lorsqu'il se manifeste en contexte urbanisé.

Ce rapport, réalisé dans le cadre du programme EAT-DRS-03, d'appui technique au Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie (MinEFI), présente :

- un état de l'art et des recommandations sur les méthodes et outils d'évaluation du risque de remontée de fontis en surface (identification des règles, outils et méthodes, mise en évidence de différences d'approches selon les contextes ou de difficultés dans le processus d'évaluation) ;
- des éléments comparatifs, dans le cadre d'une approche technico-économique, des méthodes de mise en sécurité des sites soumis au risque de « fontis ».

Description du phénomène de fontis

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



Figure A : Effondrement localisé au droit d'une ancienne mine de fer de Lorraine



Figure B : Fontis au droit d'une ancienne galerie minière dans l'Aude.

Gestion du risque fontis

La gestion des risques liés à la manifestation de phénomènes de type « fontis » passe habituellement par :

- l'évaluation de l'aléa « fontis » (prédisposition du site à la manifestation du phénomène en surface, caractéristiques prévisibles du cratère d'effondrement en surface...). Il existe plusieurs outils et méthodes qui permettent de mener cette analyse ;
- le choix de la technique de mitigation du risque adaptée au contexte local qui repose sur une alternative à caractère technique et économique : traiter, surveiller ou déplacer les enjeux.

Plus généralement, elle s'inscrit dans la démarche suivante :

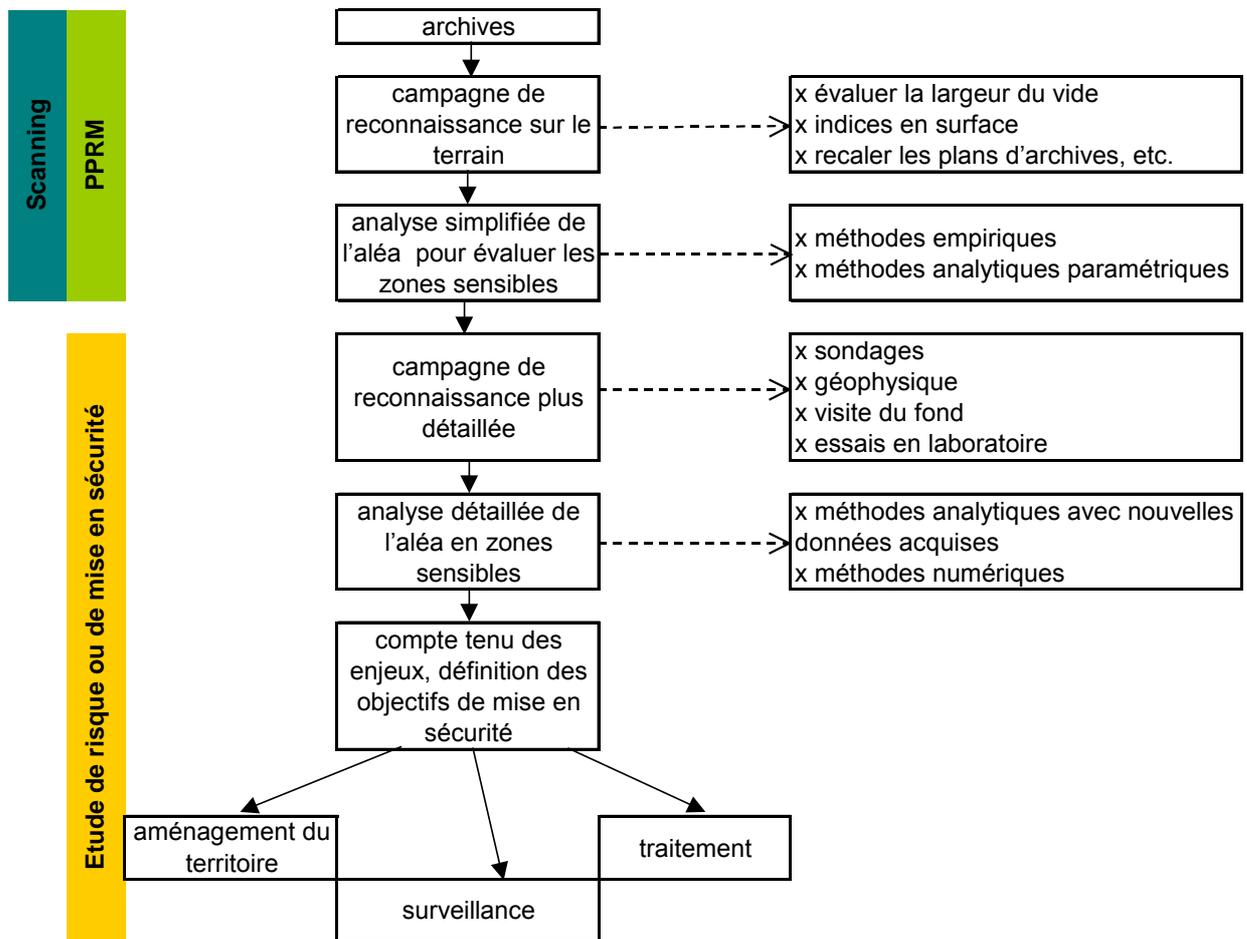


Figure C : Démarche d'évaluation et de gestion de l'aléa fontis

Méthodes d'acquisition des données utiles à l'évaluation et au traitement du risque « fontis »

L'évaluation de l'aléa « fontis » et le choix de la technique de traitement adaptée nécessitent une phase préalable d'acquisition de données. Cette phase est constituée de tout ou partie des étapes suivantes conditionnées par les contraintes d'accès au site :

- localiser les vides : investigation sur site, consultation de plans et archives...
- préciser les dimensions des vides : par méthodes géophysiques (microgravimétrie, radar géologique), par la réalisation de forages de reconnaissance, par inspection du vide souterrain (visuelle, sonar, caméra...) ;
- préciser des caractéristiques mécaniques des terrains sus-jacents les vides à l'aide d'essais mécaniques en laboratoire (résistance à la compression, résistance à la flexion...).



Figure D : Exemple de sondeuse pour une campagne de reconnaissance

Outils et méthodes d'évaluation de l'aléa « fontis »

L'évaluation de l'aléa « fontis » soulève un certain nombre de difficultés :

- manque d'informations précises et détaillées sur les dimensions des travaux souterrains et/ou sur la nature géologique du recouvrement ;
- site d'étude parfois très étendu qui se prête mal à une analyse au cas par cas.

Compte tenu de ces difficultés, une première approche d'évaluation de l'aléa «fontis » consiste à utiliser des règles empiriques (par exemple, considérer qu'il n'y a pas de risque de fontis au droit d'une galerie à plus de 50 m de profondeur pour des contextes d'exploitation « classiques », pas de risque de fontis lorsque l'épaisseur du recouvrement est supérieure à 10 fois la hauteur de la galerie...). Si ces règles empiriques sont, la plupart du temps, vérifiées, l'expérience montre qu'elles peuvent, selon le contexte minier et géologique, conduire à une surestimation des zones d'aléa en surface (approches trop sécuritaires).

Une autre approche consiste à utiliser des méthodes basées sur une modélisation analytique ou numérique du phénomène plus ou moins complexes (approches volumétriques, approches liées à la résistance des matériaux du recouvrement...). De telles méthodes posent le délicat problème du choix des valeurs de paramètres des modèles (coefficient de foisonnement, rayon du fontis au toit de la galerie, résistance des matériaux) alors que peu, voire aucune, mesure n'est disponible.

Nous avons identifié différents outils et méthodes d'évaluation de l'aléa « fontis ». Outre une présentation succincte de leurs principes fondateurs et de leur utilisation, nous les avons caractérisés et comparés selon quatre aspects :

- domaines de validité et limites d'utilisation : certains modèles reposent sur l'hypothèse de terrains de recouvrement caractérisés par une faible cohésion alors que d'autres supposent la présence de matériaux plus raides ;
- données d'entrées de l'outil : en plus d'identifier la nature des données d'entrée nécessaires pour utiliser l'outil, nous avons précisé le type d'investigation nécessaire à leur acquisition ;
- le résultat : les outils présentés aboutissent à des résultats de forme et de nature différentes - certains outils établissent l'épaisseur de terrains de recouvrement minimale assurant un auto-foisonnement (pas de fontis en surface), d'autres représentent le champ des contraintes dans les terrains de recouvrement et son évolution au fur et à mesure de la remontée du fontis vers la surface. Par conséquent, le type d'interprétation est variable selon l'outil choisi ;
- moyens requis : on précise les exigences en terme de moyens informatiques (capacités de calcul), et le type de compétences de l'utilisateur (expertise géotechnique, modélisation numérique...).

Enfin, un certain nombre de recommandations pour le choix des valeurs de paramètres clés sont établies.

Techniques de mitigation du risque « fontis »

Si la qualification ou la quantification du risque est suffisamment bien appréhendée, la maîtrise du risque peut se concevoir comme la représentation de trois concepts de prévention :

- l'information des populations par la prise en compte du risque dans l'aménagement ;
- la surveillance (au sens large) comme méthode de suivi de l'évolution du phénomène et d'alerte pour les populations menacées ;
- le traitement du risque proprement dit par des techniques de prévention actives (au niveau des cavités) ou passives (au niveau du bâti).

En particulier, le choix de la technique de traitement dépend essentiellement :

- des objectifs à atteindre en termes de maîtrise du risque et de destination du site (empêcher le fontis d'atteindre la surface, diminuer l'intensité du fontis, diminuer les dommages en surface, interdire l'accès) ;
- des méthodes de traitement adaptées aux objectifs et des techniques de réalisation ;
- du risque résiduel en surface après traitement ;
- des aspects économiques.

Nous avons qualifié les techniques de traitement selon les aspects ci-dessus en constituant un tableau d'aide à la décision (Tableau A) pour la gestion du risque « fontis ».

Par ailleurs, chaque méthode de traitement ou de surveillance fait l'objet d'une fiche de synthèse (en annexes 2, 3 ou 4) présentant son principe, son domaine d'utilisation, ses performances, ses limites et des éléments d'appréciation de son coût de mise en œuvre. Enfin, quelques exemples de gestion de l'aléa fontis sont présentés en annexe 5.



Figure E : Chantier d'injection de coulis à base de ciment dans une carrière de craie (Valenciennes, Nord)

Objectif	Méthodes	Configuration de site	Techniques de réalisation	Risque résiduel	Aspects financiers
empêcher le fontis d'atteindre la surface	comblement intégral des vides	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts chaussées constructions existantes constructions nouvelles si complété par injections 	<ul style="list-style-type: none"> à partir du fond par des engins mécanisés par déversement gravitaire à partir de la surface injections de mortier ou de coulis mousses therm durcissables 	tassement différé si pas de clavage	145€/m ³ pour le comblement de 18000m ³ à Moyeuve-Grande (57)
	remblayage partiel	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts 	<ul style="list-style-type: none"> à partir du fond par des engins mécanisés par déversement gravitaire à partir de la surface injections 	tassements	entre 15 et 30€/m ³ pour des chantiers de plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes à combler
	renforcement des sols	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts constructions nouvelles 	<ul style="list-style-type: none"> inclusions rigides 	affaissement	30 k€ pour une maison de 250k€
	pilonnage intensif	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts chaussées constructions nouvelles si complété par consolidation 	<ul style="list-style-type: none"> compaction dynamique vibro-compaction 	tassements différés	?
	comblement-terrassement	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts chaussées constructions nouvelles si complété par consolidation 	<ul style="list-style-type: none"> comblement-terrassement 	tassements différés des remblais	5 à 6€/m ³ pour combler 300000m ³ à Montfermeil
diminuer l'intensité prévisible du fontis	remblayage partiel	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts 	<ul style="list-style-type: none"> à partir du fond par des engins mécanisés par déversement gravitaire à partir de la surface injections 	tassements	entre 15 et 30€/m ³ pour des chantiers de plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes à combler
	méthodes parachutes	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts chaussés réseaux 	<ul style="list-style-type: none"> treillis galvanisés géotextile 	tassements et fontis à long terme	très variable mise en place = 5€/m ²
	consolidation des cavités	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts chaussées constructions existantes et constructions nouvelles 	<ul style="list-style-type: none"> boulonnage soutènement porteur en galerie armement des piliers projection de béton ou de résine ceinturage des piliers édification de piliers artificiels 	à long terme fontis et affaissement	350 à 400€/m ³ pour un pilier maçonné en carrière
	renforcement des sols	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts constructions nouvelles 	<ul style="list-style-type: none"> inclusions rigides 	affaissement	30k€ pour une maison de 250k€

Objectif	Méthodes	Configuration de site	Techniques de réalisation	Risque résiduel	Aspects financiers
diminuer les dommages en surface	fondations profondes	<ul style="list-style-type: none"> • constructions nouvelles ou existantes (reprise en sous-œuvre) 	<ul style="list-style-type: none"> • pieux • micro-pieux... 	fontis à proximité affaissement fissures sur bâti	150 à 250€/m ³ pour un pieu foré (5000 à 10000€ amené-repli)
	fondations superficielles renforcement de structure	<ul style="list-style-type: none"> • constructions nouvelles • chaussées 	<ul style="list-style-type: none"> • fondations continues • radier 	fontis à proximité affaissement fissures sur bâti	5 à 15% du coût de la construction neuve
interdire l'accès	Clôtures (grillages, treillis...)	<ul style="list-style-type: none"> • espaces verts • hors zone urbaine 	<ul style="list-style-type: none"> • Clôtures (grillages, treillis...) 	fontis	20 à 50 €/m

Tableau A : Techniques de traitement de l'aléa fontis

1. INTRODUCTION

Les résultats des études techniques PPRM par l'INERIS ces dernières années montre que, parmi les phénomènes de « mouvements de terrain » résiduels, l'effondrement localisé, et plus particulièrement le fontis au droit de travaux miniers à faible profondeur, correspond à un aléa fréquent à faible profondeur et important à considérer. Il l'est d'autant plus lorsqu'il se manifeste fréquemment en contexte urbanisé.

La gestion des risques liés à la manifestation de phénomènes de type « fontis » passe par 2 étapes :

- l'évaluation de l'aléa « fontis » (prédisposition du site à la manifestation du phénomène en surface, caractéristiques prévisibles du cratère d'effondrement en surface...). Il existe plusieurs outils et méthodes qui permettent de mener cette analyse ;
- le choix de la technique de mitigation du risque adaptée au contexte local qui repose sur une alternative à caractère technique et économique : traiter, surveiller ou déplacer les enjeux.

Le présent document a pour objectif :

- d'établir un état de l'art et des recommandations sur les méthodes et outils d'évaluation du risque de remontée de fontis en surface (identification des règles, outils et méthodes, mise en évidence de différences d'approches selon les contextes ou de difficultés dans le processus d'évaluation) ;
- d'identifier et de proposer des éléments comparatifs, dans le cadre d'une approche technico-économique, des méthodes de mise en sécurité des sites soumis au risque de « fontis ».

Outre les retours d'expérience de traitement des mines et des cavités souterraines, le présent document s'est inspiré des nombreux travaux et expériences de mise en sécurité réalisés dans les carrières souterraines françaises. En effet, ces cavités d'origine anthropique sont la plupart du temps à proximité ou sous des zones urbanisées et à des profondeurs telles que le phénomène de fontis est un aléa prépondérant.

2. DESCRIPTION DU PHÉNOMÈNE DE FONTIS

2.1 PLANS DE PRÉVENTION DES RISQUES MINIERES (PPRM)

Afin d'assurer la sécurité des personnes et des biens, l'Etat a mis en place les Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM). L'objectif des PPRM est d'afficher, en l'état des connaissances et selon avis d'expert, les risques ou nuisances d'origine minière susceptibles de persister dans le long terme et pouvant porter atteinte à la sécurité des personnes ou des biens ainsi qu'à l'usage du sol.

Le PPRM a pour objectif de délimiter des zones homogènes en termes d'interdictions, de prescriptions ou de recommandations ou vis-à-vis de l'usage du sol, tant pour ce qui concerne les projets nouveaux que les biens existants. Les principes de ce zonage s'appuient notamment sur une confrontation entre les différents niveaux d'aléas¹ préalablement identifiés et l'appréciation des enjeux (occupation de la surface) existants et futurs caractérisant la surface.

Sauf exception, le principe d'évaluation des aléas repose principalement sur des études qualitatives s'appuyant sur les données disponibles que l'on s'attache à collecter sur le terrain ou dans les différents fonds d'archives consultables.

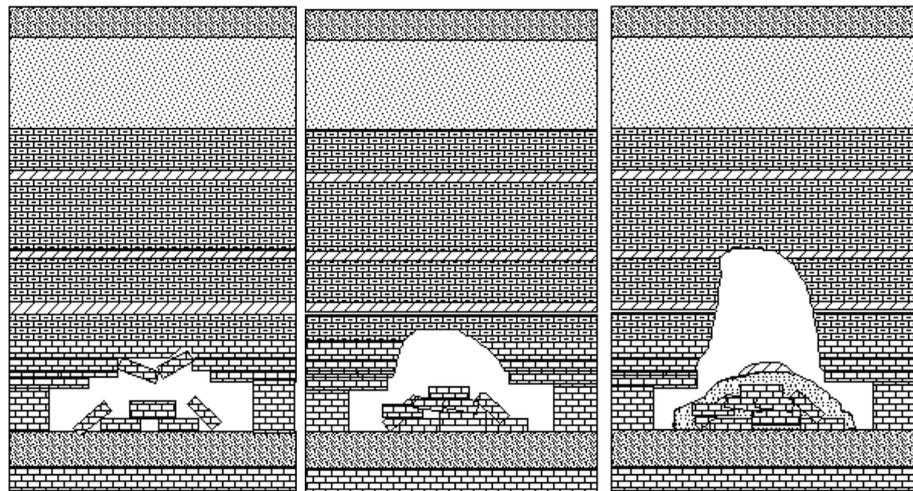
Si le PPRM s'appuie sur les connaissances en l'état et n'a pas pour ambition de systématiser des mesures d'investigation lourdes, il a en revanche pour objectif de préciser, aux futurs aménageurs, la nature et les principes de mise en œuvre des investigations qu'il conviendra d'entreprendre pour connaître précisément la nature et l'ampleur du risque en un point considéré.

Cependant, il s'avère que les PPRM réalisés jusqu'à présents et ceux à venir (recensement en cours dans le cadre de l'opération scanning des titres miniers) mettent en évidence l'existence de zones potentiellement à risque au droit de zones fortement urbanisées ou urbanisables. Parmi les aléas « mouvements de terrain » résiduels d'origine minière les plus dangereux pour les biens et les personnes, le fontis est probablement le phénomène attendu le plus répandu.

2.2 DÉFINITION DU FONTIS

On appelle fontis, une instabilité localisée qui s'initie par l'éboulement du toit d'une cavité souterraine d'assez faible extension et située à faible profondeur. Le phénomène, qui ne peut se stabiliser dans la configuration d'une cloche stable par effet voûte, finit par déboucher brusquement en surface en créant un "entonnoir" (Figure 1). Le terme de fontis désigne aussi bien le mécanisme d'effondrement que le cratère classiquement observé en surface.

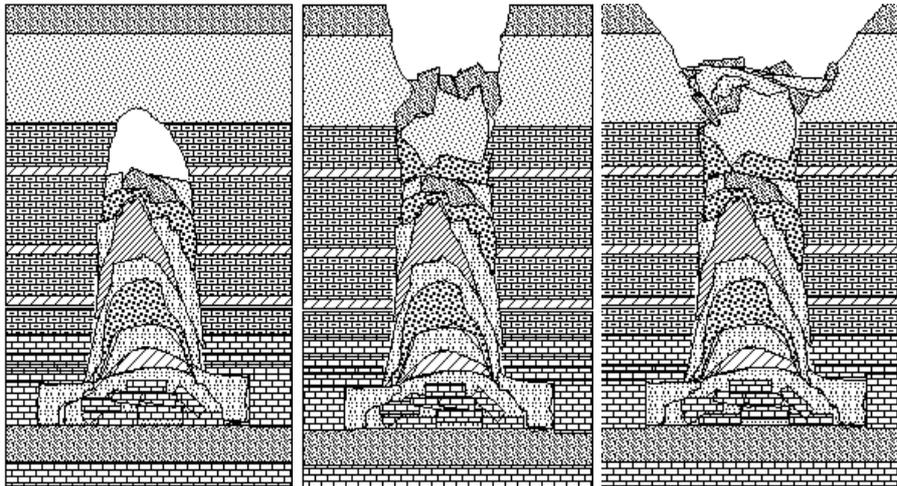
¹ L'aléa correspond à la probabilité qu'un phénomène donné se produise sur un site donné, au cours d'une période de référence, en atteignant une intensité qualifiable ou quantifiable. La caractérisation d'un aléa repose donc classiquement sur le croisement de l'intensité prévisible du phénomène avec sa probabilité d'occurrence.



Rupture de toit avec chutes de blocs dans une ancienne exploitation.

Montée de voûte par chutes successives de blocs du bas-toit.

Début de formation d'une cloche de fontis. Un cône d'éboulis commence à se former.



La cloche de fontis continue à se développer vers la surface. Le cône d'éboulis a rempli la cavité souterraine.

Le fontis débouche au jour provoquant l'effondrement des terrains de surface.

Suite à l'altération des terrains superficiels. Le fontis prend une forme d'entonnoir stable.

Figure 1 : Etapes de formation de fontis (d'après Vachat, 1982)

Par opposition au phénomène d'affaissement (réajustement souple et progressif de la surface), on parle d'effondrement lorsque l'abaissement de la surface se fait de manière discontinue dans le temps (événement rapide et brutal) et dans l'espace (formation de fractures, de figures d'arrachement, de cratères...Figure 2 et Figure 3).

En dehors des fontis provoqués par des cavités souterraines d'origine anthropique, il existe des fontis provoqués par la dissolution de certains matériaux (roches carbonatées donnant lieu au phénomène karstique et les évaporites en particulier). Ces derniers font l'objet de nombreuses études et publications qui ne sont pas nécessairement transposables à la typologie de fontis qui fait l'objet de ce rapport.



Figure 2 : Effondrement localisé au droit d'une ancienne mine de fer de Lorraine



Figure 3 : Fontis au droit d'une ancienne galerie minière dans l'Aude

2.2.1 PRÉDISPOSITION DE L'APPARITION DE FONTIS

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 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.

Les fontis se développent préférentiellement dans des zones où le toit présente de larges portées non soutenues (largeur en général supérieure à 5 m : carrefours de galerie, piliers ruinés, chambres vides ou partiellement remblayées...).

Ce sont des phénomènes très spécifiques qui ne peuvent affecter que les cavités naturelles importantes ou les mines souterraines peu profondes et exploitées par une technique permettant la persistance de vides souterrains de grandes dimensions (chambres et piliers abandonnés par exemple) et/ou des galeries isolées (galeries d'accès, de roulage...) peu profondes.

La nature des terrains de recouvrement a une grande influence sur la prédisposition à la remontée jusqu'en surface du fontis :

- la présence de bancs massifs, épais et résistants au sein du recouvrement contribuera, à largeur de galerie égale, à diminuer la prédisposition d'un site à voir se développer des fontis en surface. Il y aura alors *stabilisation du phénomène par formation d'une voûte stable* ;
- la présence d'un recouvrement peu épais constitué de matériaux peu massifs et faiblement résistants (sable, marne, massif rocheux très fracturé et altéré ...) facilite la propagation de l'instabilité vers la surface et donc la formation du fontis. Le volume des vides résiduels disponibles au sein des vieux travaux (tenant compte de la dimension 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*.

A titre d'exemple, une approche utilisée par GEODERIS pour le bassin ferrifère lorrain consiste à évaluer la prédisposition de l'aléa fontis grâce à la grille de lecture suivante :

Prédisposition	Largeur de la galerie	Phénomène semblables connu	Nature du recouvrement	Densité du vide	Fracturation du toit	Venue d'eau	Soutènement
Très sensible	$L > 5 \text{ m}$	Oui	Peu résistant	Avéré	Mauvais	Importante	Cadre ou boulonnage
Sensible	$3 \text{ m} < L < 5 \text{ m}$		Moyen	Suspecté	Moyen	Moyen	
Peu sensible	$3 \text{ m} < L$	Non	Résistant		Bon	Faible	Maçonnerie béton

Tableau 1 : Grille d'évaluation de la prédisposition de l'aléa fontis sur le bassin ferrifère lorrain [23]

2.2.2 GÉOMÉTRIE DU DÉSORDRE EN SURFACE

Les manifestations du désordre en surface induites par les fontis varient d'un simple tassement accompagné de fissures jusqu'à la formation d'un cratère dont le diamètre peut atteindre plusieurs mètres. Les dimensions du désordre et le caractère brutal de sa manifestation en surface font des effondrements localisés des phénomènes potentiellement dangereux, notamment lorsqu'ils se développent au droit ou à proximité de secteurs urbanisés.

Les conséquences prévisibles sur la sécurité des personnes et des biens présents dans la zone d'influence du désordre dépendent :

- du **diamètre** de l'effondrement en surface : on distingue le diamètre de l'entonnoir en configuration stabilisée du diamètre « instantané » de la zone affectée lors de l'effondrement (parfois sensiblement moins important que le précédent). Le Tableau 2 fournit les classes d'intensité en fonction du diamètre de fontis en surface selon les recommandations du guide PPRM [2] ;
- de la **profondeur** du cratère : les fontis se caractérisent par un mouvement gravitaire à composante essentiellement verticale qui peut atteindre une amplitude sensiblement égale à la hauteur de la cavité sous-jacente ou de

l'ouverture de la couche exploitée. Une approche, basée sur la profondeur du désordre en surface et employée par GEODERIS, est en cours d'application dans le bassin ferrifère lorrain pour évaluer d'une manière différente l'intensité du phénomène (Tableau 3).

Classe d'intensité	Diamètre de l'effondrement
Très faible	Effondrements auto-remblayés à proximité immédiate de la surface (profondeur centimétrique)
Faible	$\emptyset < 3 \text{ m}$
Moyen	$3 \text{ m} < \emptyset < 10 \text{ m}$
Fort	$\emptyset > 10 \text{ m}$

Tableau 2 : Classes d'intensité en fonction du diamètre de fontis d'après le guide PPRM [1]

Classe d'intensité	Profondeur de l'effondrement
Limitée	$0 \text{ m} < L < 0,5 \text{ m}$
Modérée	$0,5 \text{ m} < L < 2 \text{ m}$
Elevée	$2 \text{ m} < L$

Tableau 3 : Classes d'intensité en fonction de la profondeur du fontis en surface (en cours d'application dans le bassin ferrifère lorrain) [23]

3. MOYENS DE RECONNAISSANCE PRÉALABLES

3.1 LOCALISER LES VIDES

Avant toute évaluation d'un aléa, l'étape de définition et de localisation (même approximative) des vides est nécessaire (dans le cadre d'un PPRM, cette première étape est nommée phase informative).

Elle a pour principal objectif de collecter l'ensemble des informations disponibles. Elle exige une campagne d'investigation sur site (repérage des travaux miniers, recherche d'anciens désordres, enquête auprès des populations...) et une consultation attentive des archives d'exploitation ou de tout document susceptible de fournir des informations utiles à la caractérisation du contexte des ouvrages étudiés (géologie, hydrogéologie, plans des travaux miniers, méthodes d'exploitation...). Cette première investigation peut s'appuyer sur une source d'information fondamentale, notamment pour ce qui concerne les exploitations arrêtées relativement récemment : le dossier d'arrêt des travaux miniers constitué par l'exploitant à l'attention des services de l'Etat.

Cette phase de l'étude donne souvent naissance à l'établissement d'une carte (dite « informative » pour les études PPRM) qui a pour principale vocation d'informer et de sensibiliser la population et/ou les autorités concernées quant à la localisation, la nature et l'organisation des anciens travaux et aux risques et nuisances pressentis. Le recensement des anciens désordres ayant affecté le site par le passé permet en effet de justifier le bien fondé de la démarche de prévention entreprise.

3.2 PRÉCISER LES VIDES

La première localisation des vides se base sur les connaissances en l'état et l'avis d'expert ; les mesures d'investigations lourdes, telles que les campagnes de reconnaissance de vides par sondage, sont souvent évitées en première approche.

Lors de l'analyse de l'aléa, des incertitudes et des doutes peuvent donc subsister sur l'existence, la localisation, la géométrie des vides résiduels et entraîner la prise en compte de principes de protection se traduisant par exemple par des marges de sécurité dans la cartographie de l'aléa fontis.

Ainsi, dans les régions urbanisées recelant en leur sous-sol d'anciennes mines abandonnées, connues ou oubliées, le développement d'une politique de prévention par le traitement des risques potentiels passe souvent par une phase supplémentaire de recherches comprenant la localisation précise et/ou la reconnaissance des cavités souterraines. Le diagnostic de stabilité (expertise) peut alors être réévalué en terme de quantification de l'aléa et de ses effets prévisibles en surface vis-à-vis de la sécurité de la population et des biens exposés.

Plusieurs techniques de localisation et/ou de reconnaissance des vides peuvent être utilisées. Elles sont précisées dans les paragraphes suivants.

3.2.1 MÉTHODES GÉOPHYSIQUES

Pour vérifier les premières informations (issues de la phase informative du PPRM par exemple), on peut procéder à une recherche des cavités par la mise en œuvre d'une ou de plusieurs méthodes géophysiques : radar géologique, sismique, microgravimétrie, infrarouge... Certaines sont utilisées depuis de nombreuses années (microgravimétrie ou radar géologique par exemple). D'autres applications deviennent prometteuses dans ce domaine particulier, comme la sismique réflexion haute résolution.

Ce sont des techniques non destructives mais elles sont soumises à des contraintes plus ou moins fortes selon le milieu ou l'environnement : certaines techniques sont par exemple limitées en milieu urbain.

Ces outils permettent de mettre en évidence, par interprétation, des anomalies ou des contrastes. Les résultats sont parfois décevants, surtout dans des conditions de site difficiles, en particulier en présence d'un recouvrement épais (plus de 20 m de profondeur) ou lorsque la géologie et la topographie sont défavorables ou perturbées.

Le coût de ces différentes méthodes géophysiques est variable et très dépendant du site à investiguer (accessibilité, superficie...).

De nombreuses tentatives ont été faites pour comparer les différentes techniques géophysiques de détection de cavités souterraines. Il en résulte qu'il n'existe, à l'heure actuelle, aucune méthode 100% fiable, pour être employée partout. Le choix de la méthode la plus adaptée dépend essentiellement de trois facteurs : la profondeur, la taille de la cavité et la nature du recouvrement (épaisseur, hétérogénéité, discontinuités). Le meilleur résultat est obtenu lorsque plusieurs méthodes sont croisées, ce qui peut évidemment devenir onéreux.

3.2.2 FORAGES DESTRUCTIFS ET/OU CAROTTÉS

La phase de localisation et de reconnaissance préliminaire des vides et du sous-sol, exécutée le plus souvent par forages destructifs (avec diagraphies), constitue l'étape fondamentale de reconnaissance des vides, surtout lorsque des travaux de comblement sont prévisibles (enjeux en surface).

Les sondages, dits « destructifs », sont destinés à rechercher des cavités ou encore des indices géologiques (recouper d'anciens filons par exemple). De petit diamètre (de l'ordre de 60 mm), ils sont forés généralement verticalement avec enregistrement des paramètres à l'avancement (vitesse, pression de l'outil de foration) afin de détecter sans ambiguïté des vides ou terrains décomprimés (exemples de cahier des charges de campagne de reconnaissance par forages en annexe 1).



Figure 4 : Exemple de sondeuse pour une campagne de reconnaissance

Si une cavité est rencontrée, les sondages sont agrandis et tubés en PVC d'un diamètre de 120 mm environ jusqu'au toit de la cavité rencontrée, pour permettre de réaliser ultérieurement des relevés vidéos, mesures laser ou sonar ou autres diagraphies différées. Les têtes de forages sont alors équipées d'une bouche à clé, qui sera mise en place avec le souci de constituer le moins de désagrément possible pour le propriétaire ou, dans le cas de voirie, qui ne devra pas dépasser du revêtement de la chaussée.

Si aucune cavité n'est rencontrée, le sondage est rebouché avec du ciment - tout-venant (et pose d'une rustine sur la chaussée) avant que le site soit remis en état.

Les sondages destructifs sont susceptibles de générer le ruissellement de boues aux alentours du point de foration. Une attention particulière est portée sur les nuisances et la remise en état du site. En particulier, si les sondages sont proches des bâtis, des bâches de protection sont mises en place pour protéger ceux-ci.

Cette phase de reconnaissance permet de préciser la hauteur de vides, le volume à combler et de choisir, si nécessaire, ainsi les meilleurs points d'attaque pour le creusement des puits d'accès ou de remblaiement.

3.2.3 RECONNAISSANCE DES CAVITÉS

Lorsqu'il est possible de créer ou de recréer une ouverture pour accéder à l'ancienne exploitation souterraine (creusement de puits d'accès ou réouverture d'anciennes galeries), un examen géotechnique du site souterrain est privilégié. Il permet d'inspecter visuellement tout ou une partie des travaux souterrains.

L'inspection visuelle des cavités repose sur l'observation d'indices de dégradation tels que l'altération du milieu, la fracturation, l'écaillage de piliers, les chutes de blocs du toit, la déformation des parois et des voûtes, etc. Il s'agit d'une méthode d'investigation simple mais qui doit être effectuée par des experts géotechniciens.

Ce type de reconnaissance permet d'éviter l'encombrement et les nuisances liée à la reconnaissance par forages mais nécessite que les cavités souterraines soient en suffisamment bon état (géotechnique et par rapport aux émissions gazeuses dans les ouvrages non ventilés) pour ne pas mettre en péril la sécurité des inspecteurs.

Lorsque les travaux sont inaccessibles (accès effondré, zone ennoyée ou trop dangereuse...), il est possible de reconnaître les cavités depuis la surface grâce à des sondages atteignant les travaux. Plusieurs techniques d'auscultation peuvent

être descendues dans les forages selon les conditions du site : laser, sonar (zone ennoyée), vidéo, photographies.

Cette reconnaissance permet de préciser les informations sur les méthodes d'exploitation, la hauteur de vides résiduels, l'état géotechnique du toit de la mine, l'existence d'amorce de fontis. A terme, ces précisions aideront à analyser de manière plus fine le risque résiduel et sa qualification (forte, moyenne ou faible).

Dans le cas de vides confirmés, cette inspection donnera des indications plus précises (volume, localisation des vides) pour mettre en œuvre une future mise en sécurité du site.

3.3 ESSAIS EN LABORATOIRE

Le choix des essais de laboratoire, destinés à caractériser les principaux traits du comportement et des propriétés mécaniques de quelques roches qui jouent un rôle primordial sur le comportement du recouvrement, est motivé par les considérations suivantes :

- caractériser les seuils d'initiation et de propagation de rupture des différents matériaux sous l'effet de sollicitations (compression, traction et cisaillement, ce dernier reproduit par l'essai triaxial). La mesure de variation de volume permet la détermination d'un critère d'endommagement (seuil de contractance-dilatance) ;
- caractériser la déformabilité des roches en fonction de l'état de contraintes, dans les conditions proches de celles du massif sollicité par l'exploitation (chargement isotrope et déviatorique et déchargement autour des cavités).

Dans la majorité des cas, il s'agit de réaliser, sur des échantillons issus d'un sondage carotté :

- des essais de compression uniaxiale avec mesure des déformations longitudinale et transversale ;
- des essais de compression triaxiale avec mesure des déformations longitudinale et transversale ;
- des essais de traction indirecte (brésilien) ;
- des mesures des propriétés physiques : teneur en eau et poids volumique à l'état naturel, teneur en eau de saturation et poids volumique saturé et sec, teneur en carbonates.

Tous ces résultats seront alors introduits dans la modélisation numérique. La fiabilité des modélisations numériques dépend considérablement des données d'entrée et de leur qualité.

La réalisation de ces essais, l'interprétation de leurs résultats en intégrant ceux issus des investigations sur le sondage et dans les vides souterrains, permettra d'établir un modèle rhéologique adapté au contexte spécifique de l'exploitation et du site.

L'idée est de disposer d'un modèle représentatif des terrains de recouvrement, du vide souterrain et plus particulièrement du bas-toit, développé et caractérisé à partir de données de laboratoire afin de pouvoir estimer les possibilités de remontée de fontis au travers du recouvrement.

3.4 CAS PARTICULIER DES EXPLOITATIONS PENTÉES OU FILONIENNES

Comme les gisements en plateaux, les gisements pentés et filoniens sont soumis à des éboulements au fond susceptibles d'affecter les terrains de surface. Ainsi, dès l'arrêt des travaux mais parfois également beaucoup plus tardivement, de nombreux désordres se sont développés. Les méthodes d'exploitations et les caractéristiques géologiques et notamment le pendage ont des effets sur la géométrie et la localisation des désordres en surface. On dénombre des effondrements localisés, situés le plus souvent aux affleurements et liés à des ruptures du stot de protection (pilier couronne) lorsque l'exploitation s'est développée trop proche de la surface ([29] et [28]).

La géologie revêt une grande importance pour l'étude de ces types de gisement. La concentration de certains minéraux relève de facteurs géologiques : âge de la formation, tectonique... Les zones minéralisées peuvent prendre des formes très diverses suivant leur mode de formation : inclusion dans des fractures ou des failles (filons), couche sédimentaire plissée (charbon lorrain), altération de granite... Certains paramètres géologiques, comme le pendage ou les secteurs d'affleurement, sont de ce fait à analyser avec une attention particulière lors des études PPRM. La géologie renseigne, entre autre, sur la répartition et la géométrie des travaux miniers. Les méthodes d'exploitation s'adaptent aux formes, aux variations des zones minéralisées, mais aussi aux caractéristiques mécaniques des épontes et du minerai. Les principales méthodes d'exploitation sont les chambres-magasins et les tailles montantes.

Ainsi, les principaux critères à prendre en compte lors d'une évaluation des aléas en gisements pentés et/ou filonien seront :

- 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.

Souvent une campagne de sondages peut aider à réduire cette marge d'incertitude mais la difficulté à positionner avec précision le filon et les travaux nécessite souvent un grand nombre de forages.

Les épontes, souvent de bonne qualité mécanique, sont parfois un obstacle pour ces campagnes par sondages et peuvent constituer un banc raide stoppant les remontées de fontis.

4. MÉTHODES D'ÉVALUATION DE L'ALÉA FONTIS

De nombreuses méthodes et outils ont été mis au point pour étudier et évaluer les conditions d'occurrence et les dimensions des désordres prévisibles en surface des fontis.

Certaines méthodes sont extrêmement simples et rapides en application, d'autres, de plus en plus réalistes, prennent en compte de façon grandissante le contexte général du site étudié.

On distingue classiquement les méthodes **empiriques**, les méthodes **analytiques** et les méthodes **numériques**, par ordre de complexification croissante.

4.1 NOTATIONS

La figure 5 présente les grandeurs caractéristiques des différents éléments qui interviennent dans le mécanisme du fontis.

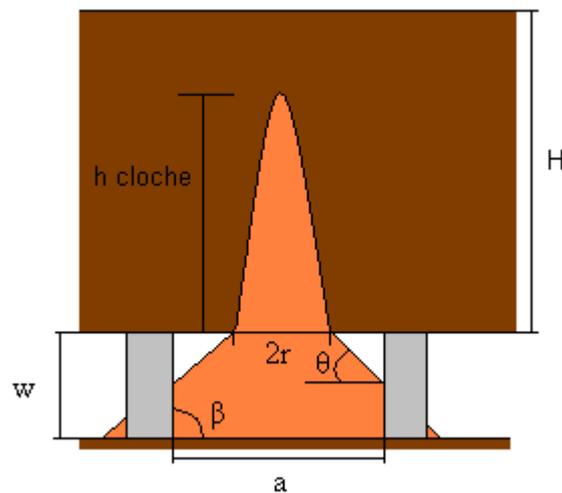


Figure 5 : Paramètres géométriques caractéristiques dans le cas d'un fontis auto-remblayé

Notations	Paramètres	Unités
K	coefficient de foisonnement	sans unité
H	hauteur de recouvrement	mètres
w	ouverture de la galerie = hauteur de vide	mètres
h_{cloche}	hauteur de remontée de fontis	mètres
r	rayon du fontis au toit de la galerie	mètres
D	diamètre du fontis au toit de la galerie	mètres
a	largeur entre deux piliers consécutifs	mètres
θ	angle de talus naturel du matériau éboulé dans les vides souterrains	degrés
β	angle des piliers (cas de galerie trapézoïdale)	degrés
γ	pente de la galerie (cas de galerie pentée)	degrés

Tableau 4 : Paramètres caractéristiques dans l'évaluation de l'aléa fontis par auto-comblement

4.2 MÉTHODES EMPIRIQUES ET SEMI-EMPIRIQUES

Les méthodes empiriques reposent exclusivement sur des observations faites sur le terrain et sur les retours d'expérience. Il s'agit de résultats statistiques, établis à partir d'effondrements survenus antérieurement, dont les caractéristiques géométriques ont été mesurées sur place et dans la mesure du possible, corrélées avec les caractéristiques du recouvrement.

4.2.1 RAPPORT DE L'ÉPAISSEUR DU RECOUVREMENT SUR L'OUVERTURE DES TRAVAUX SOUTERRAINS

A partir d'une étude statistique menée sur la base de 120 fontis répertoriés dans le calcaire grossier et 72 dans le gypse de la région parisienne, Vachat montre que **pour les carrières de calcaire grossier, il n'y a pas de venue à jour du fontis dès que la hauteur de recouvrement est 15 fois supérieure à la hauteur du vide de la carrière**. Autrement dit, si le ratio H/w est supérieur ou égal à 15, alors la probabilité qu'un fontis survienne au jour est très faible [43].

Il convient de remarquer dès à présent que la règle n'est pas applicable au cas du gypse :

- parce que l'échantillon est trop faible,
- il existe des cas où des fontis ont traversé des hauteurs de recouvrement beaucoup plus importantes.

Ce résultat peut être étendu pour des contextes proches de ceux des carrières de calcaire de la région parisienne.

Remarques :

- rapide et facile d'emploi, l'application de la règle de Vachat requiert la seule connaissance des ouvertures de vide et épaisseur de recouvrement ;
- bien que sa validité ne soit vérifiée que dans le contexte particulier des carrières de calcaire du bassin parisien, elle est souvent appliquée à d'autres contextes afin de donner un « ordre de grandeur ». Nous attirons l'attention sur le fait que la valeur seuil du rapport H/w peut être très sous-estimée pour des recouvrements constitués de matériaux peu cohérents majoritairement et/ou évolutifs en présence d'eau ;
- cette méthode ne donne pas d'information sur les dimensions du désordre attendu en surface ;
- Piggott et Eynon ([34]) ont défini une épaisseur minimale de recouvrement égale à 10 fois l'ouverture des travaux souterrains (en excluant les terrains sans cohésion en surface) au-delà de laquelle le risque de fontis est jugé très rare. Cette évaluation est obtenue à partir d'effondrements survenus au droit d'anciennes exploitations minières. Selon Matheson et Eckert-Clift ([30]), lorsque le rapport H/w est inférieur à 5, la possibilité d'apparition d'un fontis en surface est très forte. Elle décroît rapidement lorsque le rapport augmente de 5 à 11. Statham et Treharne ([39]) rapportent que 90% des fontis surviennent lorsque le rapport H/w est inférieur à 6. Il apparaît qu'en contexte minier, la valeur seuil du rapport H/w apparaît en général inférieur à celle avancée par Vachat en contexte de carrière souterraine de calcaire : cette situation résulte des terrains de recouvrement qui, en contexte minier, présentent souvent des caractéristiques géotechniques meilleures.

4.3 MÉTHODES ANALYTIQUES

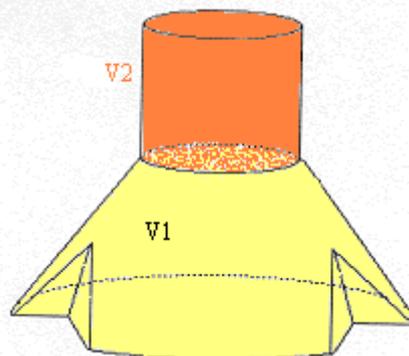
Les méthodes qui suivent sont dites volumétriques, elles ont toutes été établies en partant de l'hypothèse d'un arrêt de remontée de cloche de fontis dans le recouvrement, par auto-comblement par foisonnement.

Le but de ces modèles est de déterminer h_{cloche} , la hauteur de remontée d'un fontis par application du principe fondamental suivant :

Il y a auto-comblement par foisonnement dès que le volume foisonné provenant de la cheminée du fontis égalise la somme des volumes de la galerie (V_1) et de la cheminée (V_2) (Figure 6) .

Les différences et discordances qui peuvent exister entre les différentes méthodes volumétriques s'expliquent par l'hétérogénéité dans le choix de la géométrie des sites au départ, et par conséquent sur les volumes en jeu lors de l'effondrement.

Figure 6 : Volumes en jeu lors de l'effondrement



Entrent dans cette catégories, les modèles de :

- Piggott et Eynon (1977, [34]) ;
- Vachat (1982, [43]) ;
- Whittaker et Reddish (1989, [45]) ;
- Meier (1991, [31]) ;
- INERIS (1998, [17],[37]).

Les principes de chacune de ces méthodes sont présentés en annexe 6. Le Tableau 5 résume les principales caractéristiques de ces méthodes.

Un certain nombre de travaux de comparaison de ces méthodes analytiques ont été mené et permettent de les qualifier les unes par rapport aux autres :

- Piggott & Eynon, par leur analyse en deux dimensions, ne prennent pas en compte le rayon du fontis en toit de galerie, ni le volume des matériaux éboulés. Leur modèle est donc très sécuritaire pour les vides souterrains de faible volume et tend à sous-estimer la hauteur de remontée à mesure que les dimensions géométriques s'accroissent ;
- La méthode développée par Whittaker, en supposant systématiquement un rayon de cylindre pour le fontis égal à la demi-diagonale du carrefour d'une exploitation par chambres et piliers, sous-estime la hauteur de remontée. Plus le rayon du fontis est grand, moins le cylindre doit se développer pour combler le volume de vide disponible ;
- Les modèles de Vachat, Meier et de l'INERIS sont proches. Cependant un grand nombre de simulations a montré que le modèle de Vachat est souvent plus sécuritaire que celui de l'INERIS. Cette divergence provient de l'appréhension différente du volume occupé par les piliers dans le calcul ;

Quel que soit le modèle employé, les divergences observées entre les modèles soulignent le fait que ces modèles doivent être calés par rétro-analyse pour obtenir des résultats précis.

Soulignons qu'aucun de ces modèles ne fait intervenir les caractéristiques mécaniques des matériaux constitutifs du recouvrement, c'est-à-dire, en particulier, leur capacité à bloquer la progression d'une cheminée de fontis vers la surface. Les modèles analytiques présentés sont donc sécuritaires et doivent être complétés par des approches numériques lorsque des résultats plus précis sont requis, en particulier en milieu urbanisé (voir chapitre suivant).

Nom	2D/3D	Paramètres utilisés	Forme de la cloche de fontis	Remarques
Piggott & Eynon	2D	w, hauteur de vide K, coefficient de foisonnement	Forme non précisée	Ne prend pas en compte le rayon initiateur au toit. Ne peut s'appliquer que dans une galerie sans pilier.
Whittaker & Reddish	3D	w, hauteur de vide K, coefficient de foisonnement r, rayon initiateur au toit θ , angle de talus du matériau au repos a, largeur entre deux piliers	cylindre de rayon r	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 θ , angle de talus du matériau au repos α , coefficient de forme β , coefficient de site	selon la valeur de α cône, parabole ou cylindre	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 θ , angle de talus du matériau au repos	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 θ , angle de talus du matériau au repos a, largeur entre deux piliers β , angle des piliers	cylindre de rayon r	Le volume réel des piliers encombrant le cône d'éboulis est approché. Un calcul rigoureux a montré peu de différence. Formule plus lourde 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.

Tableau 5 : Caractéristiques des principales méthodes analytiques pour évaluer la hauteur prévisible d'un fontis

4.4 MODÈLES NUMERIQUES

La modélisation numérique est utilisée dans l'étude des mines et carrières dont les caractéristiques géométriques et physiques sont complexes, lorsque les méthodes analytiques (et *a fortiori* empiriques) ne sont plus pertinentes ou applicables ou encore, disposant des données suffisantes, lorsqu'il y a nécessité de préciser l'analyse de l'aléa. Elle adopte une approche mécanique du problème.

Depuis les années 1960, une multitude de modèles et codes de calculs a été élaborée et employée.

4.4.1 DONNÉES D'ENTRÉE

En plus des paramètres géométriques déjà utilisés dans les méthodes analytiques, l'emploi de modèles numériques nécessite de disposer des caractéristiques mécaniques de chacun des bancs constitutifs du recouvrement (Tableau 6). Ces caractéristiques interviennent dans les lois fondamentales de conservation et lois rhéologiques régissant le milieu.

Notations	Bancs	Joints	Paramètres	Unités
e	X		épaisseur des bancs	mètre
ρ	X		poids volumique	kN/m ³
ν	X		coefficient de Poisson	sans unité
E	X		module de Young	MPa
Rc	X	X	résistance au cisaillement	MPa
Rc	X	X	résistance à la compression uniaxiale	MPa
Rt	X	X	résistance à la traction	MPa
C	X	X	cohésion	MPa
φ	X	X	angle de frottement	degré
ψ	X	X	angle de dilatance	degré
K	X	X	raideur normale de discontinuités	MPa
G	X	X	raideur tangentielle de discontinuités	MPa

Tableau 6 : Quelques paramètres mécaniques des bancs du recouvrement (liste non exhaustive)

4.4.2 QUELQUES MODÈLES ET CODES DE CALCUL

Les modèles utilisés dans ce domaine peuvent être classés en 3 catégories :

1. Les modèles numériques du type éléments finis, différences finies, éléments frontières, éléments distincts et éléments discrets. A caractère général (General Purpose Code), ce type de modèle permet de bien reproduire (en 3D seulement) la géométrie et la forme des ouvrages, les hétérogénéités du massif (litage), les principales discontinuités (failles, diaclases, joints stratigraphiques), les lois rhéologiques des matériaux et leurs caractéristiques. En revanche, le foisonnement des terrains foudroyés s'intègre mal dans le cadre de ce type de modèle, même lorsque le comportement non linéaire et irréversible des roches est pris en compte (par exemple en plasticité tenant

compte du radoucissement en l'état de post-rupture). Ce fait est également vrai pour les codes développés plus récemment à partir des modèles de bloc (Distinct Elements Method) tels que le code UDEC en 2D et 3DEC en 3 D (2 codes développés par ITASCA (USA) et disponibles et utilisés à l'INERIS). Citons un certain nombre d'autres codes de calcul : Flac (2D et 3D, Différences finies), CESAR-LCPC (Eléments Finis) et VIPLEF (Eléments Finis, développé à l'ENSMP).

2. Les modèles analytiques de type poutres et plaques, fondés sur la théorie de la Résistance des Matériaux (RDM). Ils permettent de cerner l'influence des divers facteurs (études paramétriques) mais leur principal handicap réside dans le fait que la théorie des poutres et plaques n'est valable que pour un toit finement stratifié où la portée est très grande devant l'épaisseur des bancs.
3. Les modèles analytiques volumétriques : ils reproduisent bien la forme de la cloche de foudroyage et tiennent compte du foisonnement des terrains éboulés. En revanche, ce type de modèle ne fait intervenir ni le comportement ni les propriétés des terrains. Le principal intérêt de ce type de modèles tient au fait qu'il permet de vérifier dans quelles conditions un toit est susceptible d'atteindre la surface du sol et ce dans une vision sécuritaire (pas de résistance de toit à cette propagation).

Quelques exemples de modèles analytiques

1. Modèles de poutres et de plaques

De nombreux modèles de ce type ont été développés par Timoshenko [41], dans le cadre de la théorie des poutres et des plaques en élasticité. Cette théorie est destinée, à l'origine, à des structures élancées (épaisseur faible devant les autres dimensions) mais des corrections ont été apportées lorsque cette hypothèse n'est pas vérifiée (car fréquent dans les ouvrages souterrains). Un exemple de modèle de ce type est celui d'un toit reposant sur 4 piliers encastés. Un autre exemple est celui d'un toit sur appuis simples ou encastés. Ces modèles permettent de calculer le moment fléchissant et l'effort tranchant et de remonter ainsi aux contraintes de traction et de cisaillement s'exerçant au toit. Les contraintes de traction ainsi calculées sont en général surestimées.

2. Le modèle ABBASS

Ce modèle a été développé dans le cadre d'une thèse préparée à l'INERIS. Basé sur la théorie des poutres, le comportement du toit est ici elasto-plastique. Il est caractérisé par les valeurs de résistance en compression, en traction et en cisaillement. De plus, le toit peut être formé par assemblage de bancs à propriétés mécaniques distinctes. Les relations analytiques ont été programmées dans un code spécifique. Le principal inconvénient de ce modèle est le nombre de paramètres trop important qui soulève le problème d'accès aux valeurs et la caractérisation expérimentale. Une tentative a été faite pour modéliser la propagation des fractures à partir d'une approche en mécanique de la rupture. Le calcul itératif permet de reproduire la forme de la cloche de foudroyage. Les résultats obtenus sont assez proches de ceux issus d'un calcul numérique avec le code UDEC, présentés sur la figure 7. Ce dernier

calcul modélise les fractures créées par sollicitation mécanique à partir d'un modèle élasto plastique.

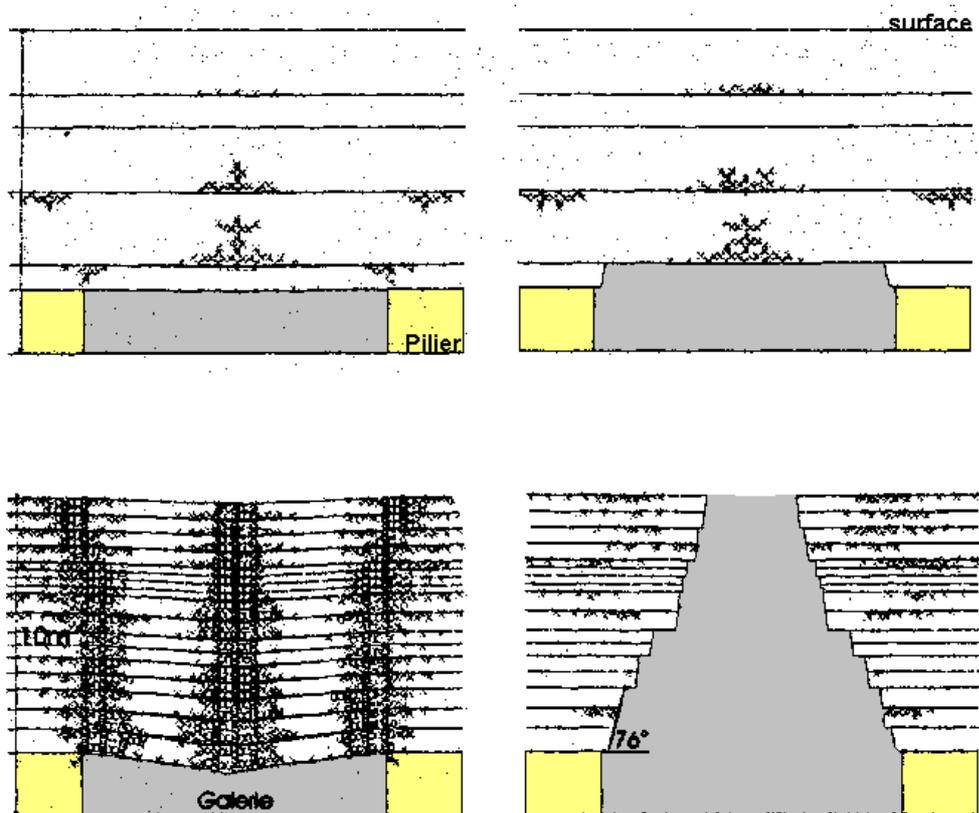


Figure 7 : Résultats obtenus par la modélisation numérique et influence de la densité de stratification (5 et 17 bancs). A droite les zones plastiques sont transformées en fractures, pas à gauche (Abbass Fayad & Al Heib, 2004).

4.4.3 REMARQUES CONCERNANT LES MODÈLES NUMÉRIQUES

Dans le cadre des études d'évaluation du risque de remontée en surface d'un fontis, les modèles analytiques (volumétriques) tendent à être systématiquement pessimistes lorsque les volumes de vides souterrains sont importants. A contrario, ces modèles ne prennent pas en compte les résistances mécaniques que certains bancs du recouvrement sont susceptibles de présenter et qui permettent, sous certaines conditions, de bloquer l'initiation ou le développement d'une cloche de fontis de puis le vide minier. Dans ce dernier cas, l'approche est alors sécuritaire.

Le développement actuel des outils numériques a donc pour objectif de compléter les approches analytiques existantes.

Ils permettent également de modéliser le comportement des matériaux au sein du recouvrement et d'aider à comprendre les mécanismes mis en jeu pendant la formation du fontis, informations non fournies par les modèles analytiques.

Néanmoins, ils posent le délicat problème de l'accessibilité des données (nombreuses données nécessaires) et de la capacité des modèles à représenter, au mieux, la complexité des interactions entre les bancs.

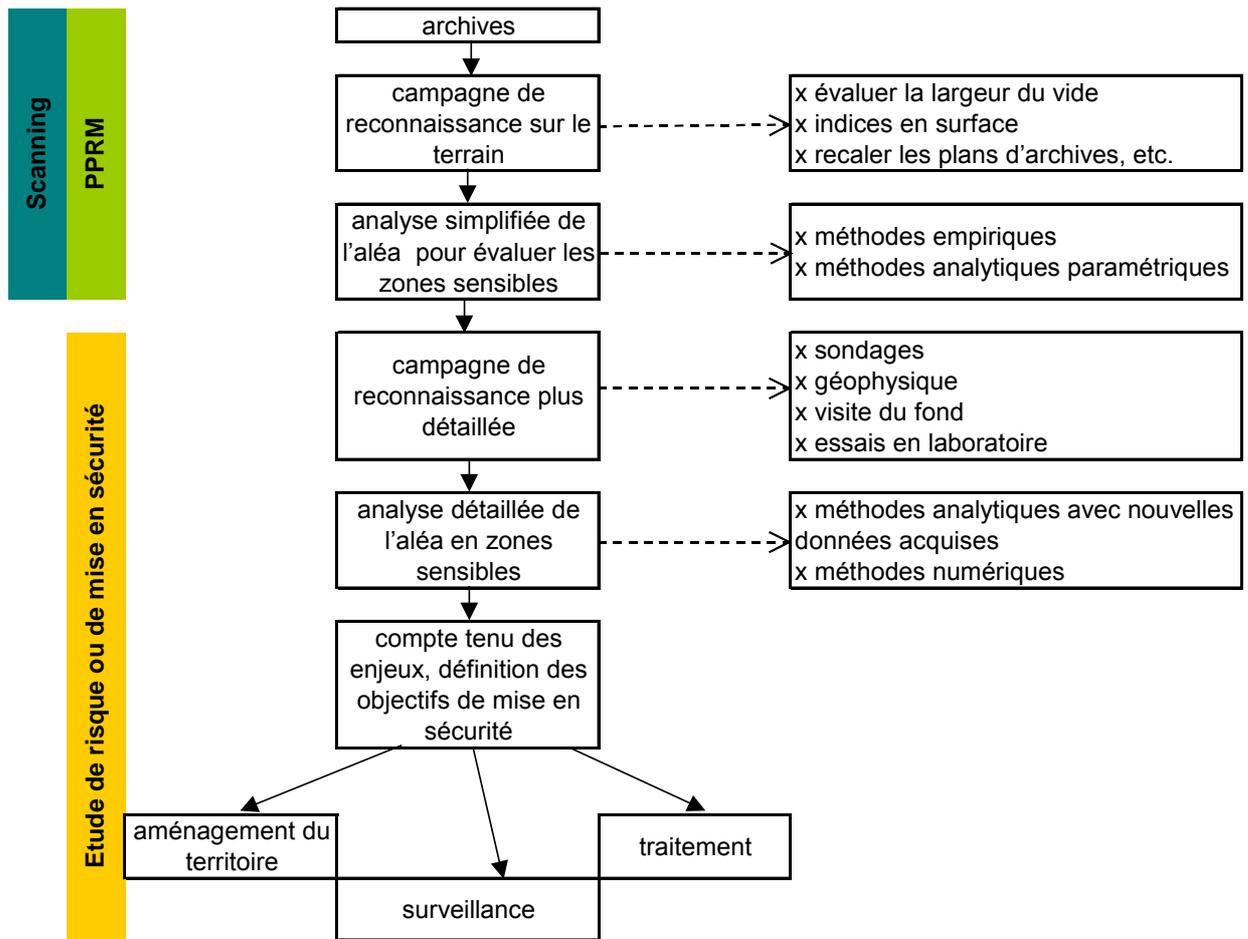
4.5 RECOMMANDATIONS POUR LE CHOIX DES OUTILS ET MODÈLES

Le choix d'une méthode pour l'évaluation de la possibilité d'apparition d'un fontis en surface dépend :

- **de l'objectif réel** : s'agit il de délimiter rapidement l'ensemble des zones susceptibles de présenter un risque de fontis ou d'identifier précisément si, en un lieu donné, le risque de fontis est réel ou peut être écarté ?
- **des informations disponibles** : dispose t'on d'ordres de grandeur obtenus grâce à des consultations d'Archives ou de données précises obtenues par reconnaissances et mesures au fond ?

Compte tenu des besoins spécifiques à chacune, on peut positionner les méthodes dans la démarche d'évaluation et de gestion de l'aléa fontis. Les méthodes empiriques et les méthodes analytiques se prêtent particulièrement bien à la phase dite d'analyse simplifiée de l'aléa. Ces dernières pourront être complétées d'analyses paramétriques afin de tester la sensibilité de certains paramètres mal connus à cette étape de la démarche.

Si les méthodes analytiques constituent des démarches appréciables en phase d'analyse détaillée des risques, leur caractère sécuritaire peut nécessiter un complément d'analyse. Les approches numériques sont alors souvent employées parce qu'elles s'appuient sur des concepts mécaniques supplémentaires que les approches analytiques ne prennent pas en compte.



4.6 RECOMMANDATIONS POUR LE CHOIX DES PARAMÈTRES

De nombreux paramètres nécessaires à l'application des modèles présentés sont relatifs au schéma d'exploitation (largeur ou hauteur de galeries, hauteur de remblayage...). Les éventuels problèmes que peut engendrer le renseignement de ces paramètres relèvent essentiellement de la variabilité des dimensions d'ouvrages et dépendent des moyens de reconnaissance disponibles décrits dans le chapitre précédent.

4.6.1 ANGLE DE DÉPÔT DU TALUS

Il s'agit de l'angle d'équilibre limite, dit également angle de pente naturelle. Il dépend évidemment de la nature du matériau foisonné et peut devenir très difficile à évaluer dès lors que les éboulis concernent différents types de matériaux. Le retour d'expérience acquis sur de nombreuses exploitations montre toutefois une relative homogénéité de l'angle de talus naturel variant de 30° à 40° pour d'assez nombreux matériaux, en conditions sèches.

Les valeurs peuvent, en revanche, s'avérer très variables dès lors que les éboulis sont mis en contact avec de l'eau. Pour des matériaux sensibles (marnes, argiles, sables), l'angle de talus peut alors diminuer fortement pour atteindre des valeurs de l'ordre de 15° à 20° (Figure 8).



Figure 8 : Cône d'éboulis (à gauche : marnes sèche, à droite : le même matériau sous l'effet de l'eau)

4.6.2 COEFFICIENT DE FOISONNEMENT

Le coefficient de foisonnement correspond au rapport entre le volume occupé par les éboulis de tailles et de formes variées qui s'entassent de façon désordonnée et le volume initialement occupé par les terrains en place. L'estimation de la valeur de ce paramètre n'est pas toujours aisée même si plusieurs approches permettent de l'estimer (retour d'expérience du terrassement routier en annexe 7) (Salmon, [37]).

Notre retour d'expérience montre que ce coefficient varie de valeurs à peine supérieures à 1 dans le cas de sables ou de sols très peu cohérents et peut atteindre des valeurs proches de 1,5 lorsque les roches éboulées sont plutôt résistantes et donnent naissance à des blocs d'assez grandes dimensions.

Pour le coefficient de foisonnement aussi, la présence de l'eau peut jouer un rôle important. Ainsi, pour les matériaux sensibles à l'eau (marnes, argiles), le coefficient de foisonnement entre l'état sec et humide peut chuter de 1,4 jusqu'à 1,1 (Figure 8).

4.6.3 RAYON DE REMONTÉE DE CHEMINÉE

Le rayon de remontée de cheminée est un paramètre essentiel et très important pour le calcul car il influe directement et de manière très importante sur le volume de matériaux éboulés. Il est très difficile de l'estimer par calcul sauf à connaître très précisément les caractéristiques des premiers bancs constituant le toit de l'exploitation.

Il faut donc privilégier le retour d'expérience au travers d'observations menées sur site lorsque les anciens travaux sont encore accessibles. A défaut, on analysera la sensibilité du paramètre par une étude paramétrique.

5. TECHNIQUES DE MITIGATION DU RISQUE FONTIS

Une fois l'existence d'un risque potentiel latent avéré (vides localisés avec plus de précisions grâce à la phase informative du PPRM et/ou d'une phase de reconnaissance complémentaire), le problème essentiel est celui de la prévention. Le choix de la méthode de mise en sécurité repose alors sur une alternative fondamentale à caractère technique et économique : **traiter, surveiller ou déplacer les enjeux**.

On peut alors définir un « espace » du risque décomposé en plusieurs domaines, dont en premier lieu le domaine du « risque acceptable » et celui du « risque inacceptable ». La séparation entre ces deux domaines émane de la décision collégiale des acteurs impliqués dans la maîtrise du risque.

Si la qualification ou la quantification du risque est suffisamment bien appréhendée, la maîtrise du risque peut se concevoir comme la représentation de trois concepts de prévention :

- l'information des populations par la prise en compte du risque dans l'aménagement ;
- la surveillance (au sens large) comme méthode de suivi de l'évolution du phénomène et d'alerte pour les populations menacées ;
- le traitement du risque proprement dit par des techniques de prévention actives (au niveau des cavités) ou passives (au niveau du bâti).

Si les mesures d'information et de surveillance s'exercent essentiellement dans le domaine de la prévention et de l'alerte assorties de mesures de déplacement des enjeux, sans s'opposer au phénomène proprement dit, les mesures de traitement consistent à supprimer ou à minimiser la gravité du phénomène redouté, en rendant impossible son occurrence (dans certaines limites) ou en réduisant ses effets potentiels (intensité), jusqu'à ce que le risque soit ramené dans le domaine considéré comme acceptable.

5.1 AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE

L'information du public par la prise en compte du risque dans l'aménagement a pour objectif de maîtriser l'occupation du sol de façon à réduire la vulnérabilité des populations exposées. Il s'agit d'une politique à long terme menée par le biais d'une réglementation spécifique qui s'appuie sur des documents cartographiques particuliers représentant les espaces sous-minés ou un zonage des aléas identifiés, comme les plans de prévention des risques (PPR), instaurés par la loi du 2 février 1995.

En l'absence de PPR, des informations sur la présence de cavités souterraines, quand elles sont connues, peuvent être obtenues dans les Plans Locaux d'Urbanisme (remplaçant les anciens POS).

La réglementation visant l'information du public est assortie de mesures techniques obligatoires ou recommandées, selon les cas, visant les constructions existantes ou futures. En cas de péril imminent, la loi du 2 février 1995 prévoit des arrêtés de péril qui peuvent être pris pour procéder à **l'évacuation des personnes**.

5.2 SURVEILLANCE

Cette mesure de prévention a pour but d'avertir ou d'alerter du danger sans s'opposer au phénomène proprement dit. Elle fait appel à des techniques de surveillance dont le principe est de suivre l'évolution des mouvements de terrain et de prendre les mesures de sécurité conservatoires qui s'imposent en cas d'instabilité avérée.

Elle représente le plus souvent une stratégie d'attente en reportant ou en fragmentant dans le temps les travaux pour mieux en répartir le coût.

En tant que solution palliative, la prévention par surveillance se limite aux objectifs suivants :

- prévoir au mieux, avec les moyens d'information dont on dispose, le processus d'évolution des conditions de stabilité de la cavité avant que les premières manifestations de sa rupture ne se produisent ;
- fournir une alarme dans l'objectif d'alerter sur l'imminence de la ruine et de permettre de prendre les dispositions de sauvegarde qui s'imposent.

En fonction des résultats issus de l'examen géotechnique du site et des considérations technico-économiques, on peut avoir recours à différentes techniques de surveillance (au sens large du terme) de la plus simple, l'inspection, à la plus complexe, la télésurveillance. Ces techniques doivent être, tout d'abord, adaptées aux conditions de site et définies en fonction des enjeux, mais aussi de la probabilité d'occurrence et de la gravité potentielle de l'aléa.

Dans les zones très dégradées, le caractère dynamique du phénomène de fontis nécessite la mise en place d'une surveillance régulière de l'évolution.

Les techniques de surveillance sont adaptées aux configurations du site et comportent plusieurs niveaux d'investigation et d'alarme :

- l'inspection visuelle avec analyse de l'évolution des désordres ;
- l'observation de témoins ;
- la mesure des déformations ou des déplacements (extensomètre ou inclinomètre) ;
- la télémessure (mesure à distance) ;
- la télésurveillance automatique avec ou sans dispositif d'alerte, notamment à partir de méthodes géophysiques.

Cette surveillance peut être périodique dans le temps ou se faire de façon plus continue (exemple de l'inspection vidéo à Thil, 54).

5.2.1 INSPECTION VISUELLE

Elle permet de surveiller l'évolution des désordres qui affectent progressivement les ouvrages souterrains avant qu'ils ne s'aggravent et ne mettent en péril la sécurité publique. Elle donne le moyen d'entreprendre à temps les travaux préventifs nécessaires. L'inspection nécessite que les cavités souterraines soient accessibles et en suffisamment bon état, géotechnique et d'aérage, pour ne pas mettre en péril la sécurité des inspecteurs (fiche A de l'annexe 2).

A partir d'une carte, de type plan des anciens travaux, on peut établir un état des lieux dressé au travers d'une carte géotechnique et définir un itinéraire de visite

adapté à la surveillance des zones à risque. La périodicité des visites de contrôle est un facteur essentiel de la pertinence de l'inspection. Elle doit être définie spécifiquement en fonction de l'état des cavités et des enjeux.

Les observations peuvent s'accompagner de relevés effectués à partir de témoins posés en travers de fissures mécaniques (plâtre, règle graduée ou autre dispositif), ou à partir d'indices de chutes de blocs établis à partir de systèmes de repérage préparés à cet effet (bâches disposées au sol, peinture projetée sur le ciel ou les piliers, etc.).

5.2.2 INSPECTION PAR MÉTHODES INDIRECTES

Lorsque les travaux sont inaccessibles (accès effondré, zone ennoyée ou trop dangereuse...), il est possible de surveiller l'évolution de l'état des cavités depuis la surface grâce à des sondages atteignant les travaux. Plusieurs techniques d'auscultation peuvent être descendues dans les forages selon les conditions du site : laser, sonar (zone ennoyée), vidéo, photographies. En Lorraine par exemple, les zones à risque de fontis, dangereuses d'accès, sont suivies par video-surveillance.

Comme pour l'inspection visuelle, la périodicité des visites de contrôle doit être définie spécifiquement en fonction de l'état des cavités et des enjeux.

Dans le cas des zones à risque très étendues et des galeries ennoyées, la surveillance ponctuelle et directe n'est plus suffisante. Il est indispensable de mettre en œuvre des moyens de surveillance performants et capables de détecter des signaux prémonitoires d'un effondrement avant que des dommages n'arrivent à la surface du sol.

Depuis 1995, l'INERIS a mené des études visant à qualifier des méthodes de surveillance adaptées au contexte et à la problématique du bassin ferrifère lorrain. L'état de l'art a rapidement montré que la méthode microsismique pouvait être une méthode adaptée à la détection des prémices d'un processus d'effondrement (ruptures des piliers au fond, puis du toit immédiat, et enfin du recouvrement) des zones assez étendues et inaccessibles. Grâce à cette technique, les phénomènes de foisonnement et de rupture peuvent être surveillés dans un rayon d'environ 300 m autour de la station de mesure. La méthode de surveillance microsismique a notamment permis de détecter des microruptures du massif pendant une expérimentation in situ d'ennoyage (site de Tressange) : l'étude montre que c'est particulièrement pendant la montée de l'eau dans la cavité que la microfissuration la plus importante se produit (Wassermann 2003, Wasserman et al 2004). Plus particulièrement, la surveillance opérationnelle de zones à risques de fontis dans le bassin ferrifère lorrain sera développée dans le programme d'appui aux Ministères (MinEFI et MEDD) EAT-DRS-06. Une campagne d'essai, basée sur l'utilisation de centrales d'acquisition mixte autonome (à très faible consommation), permettra a priori l'écoute permanente acoustique par le déploiement souterrain de microphones large bande de très haute sensibilité, spécifiquement développés en 2004, ainsi que celui de capteurs géotechniques conventionnels de type cannes de convergence.

5.2.3 SURVEILLANCE INSTRUMENTÉE

La surveillance instrumentée est effectuée à partir de dispositifs et appareillages de mesure judicieusement implantés. Elle apporte aux méthodes d'inspection un complément d'analyse à la fois qualitatif et quantitatif (fiche B de l'annexe 2).

Ce mode de surveillance est mis en œuvre lorsque les études géotechniques préliminaires concluent à une incertitude sur l'évolution de la stabilité. Elle conforte l'analyse du géotechnicien en lui fournissant des éléments complémentaires pour ausculter, diagnostiquer et prévenir de l'imminence d'une éventuelle rupture (rupture de piliers, déflexion du toit, soulèvement du mur, etc.). Une technique, récemment mise en place dans les mines de fer abandonnées de Lorraine, consiste à tendre des filets instrumentés au toit des cavités à surveiller. Lors de chute de blocs, le filet transmet automatiquement l'information.

La détection des instabilités des terrains par les techniques de surveillance repose sur le principe de l'enregistrement de l'évolution des déformations, en vitesse ou accélération.

Dans les situations les plus préoccupantes, la surveillance peut être complétée par des mesures d'auscultation sur les structures de la cavité (piliers, mur, ciel) qui permettent, par exemple, de détecter des fissures mécaniques dans les piliers par des essais de vitesse ultrasonique, de la tomographie sismique ou d'imagerie radar, ou encore, d'estimer le comportement du massif par des mesures de contraintes (au vérin plat ou par des cellules de surcarottage).

Les mesures sont effectuées à partir d'une grande variété de capteurs de déplacement et de pression, à lecture directe ou indirecte (par télémesure ou télésurveillance). L'adaptation des capteurs ou du système de mesure (lecture ou transmission) dépend des conditions pratiques et économiques et surtout des risques encourus au fond par les opérateurs.

Les techniques actuelles de surveillance instrumentée font appel de plus en plus à la télémesure ou à la télésurveillance en remplacement de la surveillance par lecture directe, difficile à gérer sur le plan de la cadence des relevés et de l'immobilisation du personnel technique. Ces méthodes permettent d'alléger considérablement les tâches de relevé et de contrôle sur un grand nombre de points et d'optimiser la fréquence des mesures.

Notons aussi l'auscultation in situ basée sur un balayage laser des cavités. C'est une technique onéreuse, longue et complexe à mettre en œuvre mais qui pourrait augmenter la précision et la qualité de la surveillance en zone sous-minée urbanisée.

5.3 TECHNIQUES DE TRAITEMENT

Le choix du mode de traitement n'est pas que purement technique ou économique en première analyse. Dans la mesure où ces méthodes ne sont pas universelles, le choix dépend aussi, essentiellement :

- des objectifs à atteindre en termes de maîtrise du risque et de destination du site (espaces verts, infrastructures routières ou ferroviaires, zones bâties...);
- des domaines d'utilisation, c'est-à-dire des configurations de site et des caractéristiques du milieu dans lequel le traitement est envisagé ;

- du niveau de sécurité admissible en fonction des enjeux en surface.

Mais également :

- des aspects techniques ;
- des aspects économiques.

Une analyse synthétique de comparaison des méthodes de mise en sécurité, réalisée à partir des critères de choix essentiels, est donnée sur le tableau 7. Chaque méthode est ensuite décrite dans les paragraphes suivants et détaillée dans les fiches techniques de l'annexe 3.

Le choix définitif de la mise en sécurité devra être réalisé par un organisme compétent, dans le respect des règles de bon sens technique et économique.

Par exemple, l'IGC de Paris préconise, quelque soit la destination des terrains en surface (zones bâties ou en voie de l'être, espaces verts, infrastructures routières ou ferroviaires) le comblement total du vide souterrain avec clavage et traitement des terrains déconsolidés.

Objectif	Méthodes	Configuration de site	Techniques de réalisation	Risque résiduel	Aspects financiers
empêcher le fontis d'atteindre la surface	comblement intégral des vides	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts chaussées constructions existantes constructions nouvelles si complété par injections 	<ul style="list-style-type: none"> à partir du fond par des engins mécanisés par déversement gravitaire à partir de la surface injections de mortier ou de coulis mousses therm durcissables 	tassement différé si pas de clavage	145€/m ³ pour le comblement de 18000m ³ à Moyeuve-Grande (57)
	remblayage partiel	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts 	<ul style="list-style-type: none"> à partir du fond par des engins mécanisés par déversement gravitaire à partir de la surface injections 	tassements	entre 15 et 30€/m ³ pour des chantiers de plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes à combler
	renforcement des sols	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts constructions nouvelles 	<ul style="list-style-type: none"> inclusions rigides 	affaissement important	30 k€ pour une maison de 250k€
	pilonnage intensif	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts chaussées constructions nouvelles si complété par consolidation 	<ul style="list-style-type: none"> compaction dynamique vibro-compaction 	tassements différés	?
	comblement-terrassement	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts chaussées constructions nouvelles si complété par consolidation 	<ul style="list-style-type: none"> comblement-terrassement 	tassements différés des remblais	5 à 6€/m ³ pour combler 300000m ³ à Montfermeil
diminuer l'intensité prévisible du fontis	remblayage partiel	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts 	<ul style="list-style-type: none"> à partir du fond par des engins mécanisés par déversement gravitaire à partir de la surface injections 	tassements	entre 15 et 30€/m ³ pour des chantiers de plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes à combler
	méthodes parachutes	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts chaussés réseaux 	<ul style="list-style-type: none"> treillis galvanisés géotextile 	tassements et fontis à long terme	très variable mise en place = 5€/m ²
	consolidation des cavités	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts chaussées constructions existantes et constructions nouvelles 	<ul style="list-style-type: none"> boulonnage soutènement porteur en galerie armement des piliers projection de béton ou de résine ceinturage des piliers édification de piliers artificiels 	fontis à long terme affaissement	350 à 400€/m ³ pour un pilier maçonné en carrière
	renforcement des sols	<ul style="list-style-type: none"> espaces verts constructions nouvelles 	<ul style="list-style-type: none"> inclusions rigides 	affaissement important	30k€ pour une maison de 250k€

Objectif	Méthodes	Configuration de site	Techniques de réalisation	Risque résiduel	Aspects financiers
diminuer les dommages en surface	fondations profondes	<ul style="list-style-type: none"> • constructions nouvelles ou existantes (reprise en sous-œuvre) 	<ul style="list-style-type: none"> • pieux • micro-pieux... 	fontis à proximité affaissement fissures sur bâti	150 à 250€/m ³ pour un pieu foré (5000 à 10000€ amené-repli)
	fondations superficielles renforcement de structure	<ul style="list-style-type: none"> • constructions nouvelles • chaussées 	<ul style="list-style-type: none"> • fondations continues • radier 	fontis à proximité affaissement fissures sur bâti	5 à 15% du coût de la construction neuve
interdire l'accès	Clôtures (grillages, treillis...)	<ul style="list-style-type: none"> • espaces verts • hors zone urbaine 	<ul style="list-style-type: none"> • Clôtures (grillages, treillis...) 	fontis	20 à 50€/ml

Tableau 7 : Techniques de traitement de l'aléa fontis

Les techniques de traitement du risque peuvent se classer au sein de trois groupes :

- les mesures actives qui visent à agir sur les mécanismes du fontis afin d'en éviter l'occurrence ;
- les mesures passives qui visent à agir sur les terrains superficiels ou les structures de surface en vue de minimiser les conséquences d'un éventuel fontis ;
- les mesures de réhabilitation qui visent à agir sur un fontis après sa venue au jour.

Les mesures préconisées peuvent devenir très lourdes techniquement et économiquement dès le moment où aucune localisation précise des fontis potentiels n'existe.

Les mesures répertoriées dans ce rapport, pour lutter ou remédier au phénomène de fontis, concernent les cavités anthropiques. Cependant, de nombreuses études existent et qui concernent les fontis d'origine naturelle, associés à des phénomènes de dissolution. Il est évident que certains parallèles sont possibles et certaines mesures transposables.

5.3.1 TECHNIQUES DE PRÉVENTION ACTIVES

Les techniques de prévention dites « actives » font appel à des traitements qui s'opèrent sur les cavités soit en consolidant les ouvrages souterrains, soit en comblant les vides, soit en les effondrant. Leur principal objectif est de diminuer, voire d'annuler, la prédisposition du site à subir des instabilités. On notera que certaines techniques permettent de conserver ouvertes les cavités, les autres les condamnant définitivement.

On peut les décomposer en quatre catégories :

5.3.1.1 TECHNIQUES DE CONSOLIDATION

Les techniques de consolidation des ouvrages souterrains par différentes méthodes de renforcement ponctuelles sont utilisées presque exclusivement dans les sites accessibles que l'on veut conserver ouverts (fiche 1 de l'annexe 3). Elles exigent un entretien et une surveillance de leur évolution.

Contrairement aux techniques de comblement des cavités, décrites plus loin, les techniques de renforcement permettent, de conserver les vides souterrains en quasi-totalité. Cet aspect présente un grand intérêt dans le cadre de l'aménagement des espaces souterrains (abris, stockages souterrains, création de parking, musée, etc.).

Les méthodes de renforcement ou de consolidation reposent sur deux principes généraux :

- améliorer l'état des ouvrages dégradés (piliers, toit, mur, galeries d'accès, etc.) ;
- améliorer la portance, c'est-à-dire la réaction des appuis face aux sollicitations du toit.

Dans la problématique des fontis, l'amélioration de la portance doit être privilégiée par rapport à l'amélioration de l'état des ouvrages. Il s'agit essentiellement de

techniques de soutènement du toit dont le but est de soulager la structure d'ensemble de l'ouvrage souterrain (piliers, appuis et voûtes).

Les techniques visant à améliorer la portance consistent à soulager la structure par une augmentation de la surface portante, par exemple, en édifiant de nouveaux piliers (piliers « artificiels », piliers maçonnés, Figure 9), en reprenant, avec du béton coffré, les piliers rompus avec un éventuel élargissement du pilier ou en mettant en place un soutènement porteur par cadres ou maçonneries dans les endroits les plus sollicités.

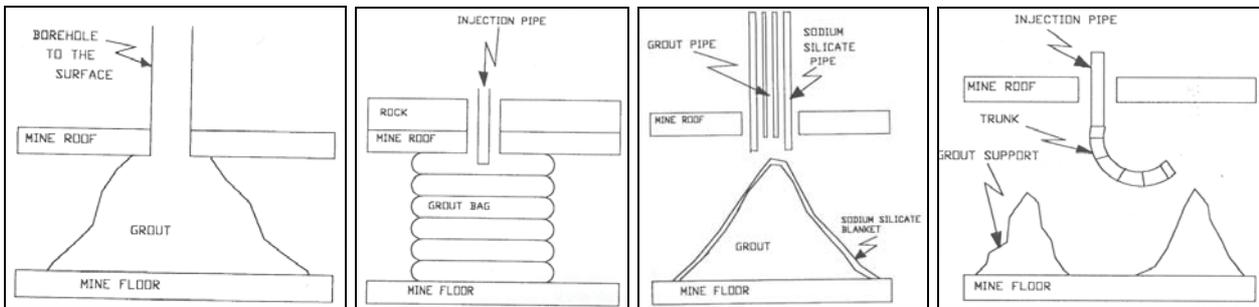


Figure 9 (a, b, c et d) : Illustration des techniques d'injection pour la création de piliers supplémentaires dans une cavité souterraine (Stump, 1998).

En fait, l'augmentation de la portance et l'amélioration de l'état des ouvrages dégradés se combinent le plus souvent, comme dans le cas d'un revêtement par béton projeté sur treillis soudé en association avec du boulonnage : le premier effet sera un confinement du pilier par un blocage de l'expansion latérale, le second un effet de soutènement après remise en charge du pilier.

Il est évident que ces deux types de technique influent sur le mécanisme initiateur d'un fontis et qu'elles s'avèreront, dans la plupart des cas inefficaces, pour éliminer le risque fontis dans des zones connaissant déjà des montées de voûte.

5.3.1.2 TECHNIQUES DE COMPLEMENT DES VIDES

Les méthodes de traitement par remplissage des vides (ou comblement) représentent des solutions de traitement définitives (pérennes à long terme) des cavités souterraines instables et en particulier du phénomène de fontis.

Le comblement total (ou quasi-total) des cavités est accompagné (ou non) d'un clavage final et d'une consolidation des terrains par injections. Ces traitements peuvent, selon les conditions de site et les techniques utilisées, être opérés directement par le fond ou depuis la surface à partir de forages.

Elles reposent sur des principes qui varient entre deux pôles :

- réduction du plus grand volume possible de vide par un simple comblement afin d'écartier le risque de fontis et de limiter les mouvements de terrain en surface (affaissement, tassement) à des amplitudes « admissibles » dans les zones non urbanisées ;
- remplissage total des vides avec restitution de la compacité initiale du terrain (par injections de mortiers et de coulis) pour interdire tout mouvement perceptible en surface dans le cas de zones destinées à la construction.

Différentes méthodes de comblement peuvent être envisagées pour assurer le remplissage des cavités. Hormis l'utilisation récente et encore très limitée des

mousses thermodurcissables, les méthodes de comblement les plus classiques sont les suivantes :

- le remblaiement partiel, par la méthode la plus simple (fiche 2 de l'annexe 3) ;
- le remblaiement direct à partir du fond, par engins mécanisés (fiche 3 de l'annexe 3) ;
- le remblaiement gravitaire par simple déversement depuis la surface (fiches 4, 5 et 6 de l'annexe 3) ;
- le remblaiement par injections de mortiers ou de coulis (sous pression) (fiches 7 et 8 de l'annexe 3).

Le choix de la méthode est déterminé à partir d'études (faisabilité technique, faisabilité technico-économique et socio-économique) dont les principaux paramètres sont :

- les conditions d'accessibilité au fond et de sécurité du personnel opérateur ;
- les caractéristiques géométriques des cavités souterraines et l'estimation du volume des vides (difficile dans le cas de terrains déconsolidés ou effondrés) ;
- les conditions opératoires (profondeur, topographie, environnement urbain ou boisé, etc.) ;
- les matériaux disponibles, les moyens de transports adaptés, les possibilités de stockage, les à-coups de production ou d'approvisionnement ;
- la destination de la surface, les projets d'urbanisme, la valorisation du sol ;
- les aspects financiers ;
- la densité de population, le mode d'urbanisation ;
- les aspects sociologiques, économiques ou administratifs ;
- l'impact sur l'environnement.

La variabilité de ces paramètres montre tout l'intérêt d'une analyse méthodologique préalable.

Pour les opérations de traitement de grande envergure, il faut souvent envisager la possibilité de combiner plusieurs méthodes selon les spécificités locales du site.

En effet, en l'absence d'une méthode universelle, la tentation simplificatrice de choisir une seule et même méthode, doit toujours être évitée avant d'avoir parfaitement analysé l'implication de l'aspect technique ou économique sur le niveau admissible de mise en sécurité des personnes ou des biens. Les injections, par exemple, qui assure le meilleur comblement (avec clavage), sont de plus en plus largement utilisées, mais leur coût reste, malgré les progrès de la technique, toujours très élevé et, le plus souvent, difficile à maîtriser.

Ces techniques de comblement requièrent, en outre, des travaux de reconnaissance préliminaire poussés et soignés, réalisés à partir de forages lorsque les vides souterrains sont inaccessibles, à maillage serré, mettant en œuvre les moyens d'investigation les plus avancés comme les diagraphies en forage, la caméra ou l'endoscopie des vides, les tests géophysiques, etc. On conçoit donc parfaitement l'adaptation de ce traitement lorsqu'il s'agit de réaliser un vaste projet d'urbanisation, mais beaucoup moins lorsqu'il s'agit de traiter des terrains en zones naturelles.

La solution de traiter par comblement est souvent choisie lorsque les travaux souterrains sont dégradés et présentent des risques imminents de remontée de fontis. Il s'agit alors de traiter en priorité ces secteurs à risque en les délimitant au mieux à l'aide de barrages étanches. La détermination du volume de remplissage présente des difficultés en terme d'évaluation des pertes en matériaux dues aux fuites latérales (barrages ou karsts par exemple), des pertes liées aux vides persistant au sein des remblais ou des zones foisonnées (en particulier dans les cavités dégradées ou difficilement identifiables) et de l'essorage du coulis ou du remblai hydraulique.

Matériaux de remblayage

D'une manière générale, les caractéristiques des matériaux de remblayage font maintenant l'objet de spécifications assez rigoureuses. Ces spécifications concernent les propriétés de résistance mécanique, mais la nature du matériau de remblai est rarement imposée de manière précise, sauf pour d'utilisation de mortiers ou coulis dans les chantiers d'injection pour lesquels les pourcentages et les constituants sont détaillés.

Pour les coulis et mortiers qui comprennent toujours un liant hydraulique, la charge inerte est le plus souvent constituée d'un matériau noble, sable ou « sablon » (matériau de granulométrie plus fine et moins étendue). Les cendres volantes de centrale thermique ont longtemps été, et sont encore, utilisées dans la composition de ces coulis.

Pour le remplissage des cavités sans injections, on utilise classiquement les matériaux dit « tout-venant », comme les sables, les graves, les granulats calcaires, les terres de fouilles, les matériaux issus de démolition, etc. En présence ou à proximité d'une nappe superficielle, le maître d'ouvrage peut imposer une charge inerte constituée de sables naturels, de stériles miniers ou éventuellement de matériaux recyclés. Dans le cas de la présence ou de la proximité d'une nappe superficielle circulante, le matériau de remblai et surtout de barrage ne doit pas contenir d'éléments à granulométrie trop fine susceptibles d'être emportés à terme et par effet renard, de mettre en péril l'étanchéité et la stabilité des barrages de confinement.

Dans le cas des stériles miniers (de différentes origines possibles) les produits utilisés peuvent n'avoir subi que des transformations mécaniques, avant ou après lavage et, éventuellement, avoir été soumis à un procédé de séparation par flottation utilisant une liqueur dense non polluante. Dans le cas des matériaux recyclés, ceux-ci ne doivent comporter ni matières organiques, ni produits hydrocarbonés.

Les laitiers de hauts fourneaux, produits poreux et de bonne résistance mécanique a priori, peuvent aussi être envisagés en matériaux de comblement (exemple du comblement de Moyeuve-Grande, annexe 5).

Les scories d'incinération, les matériaux issus des friches industrielles et les sables de dragage sont rarement proposés et la plupart du temps exclus a priori.

Enfin, certaines mousses thermodurcissables pourraient être utilisées (fiche 8 de l'annexe 3). Elles sont issues d'applications particulières du domaine minier. Elles sont aussi appliquées ponctuellement pour le traitement des carrières depuis un peu plus d'une dizaine d'années. On retiendra qu'elles sont essentiellement utilisées là où les méthodes traditionnelles de comblement trouvent leurs limites,

pour des raisons de mise en œuvre ou de sécurité. Technique plutôt onéreuse, leur application est réservée aux cavités d'un assez faible volume (quelques milliers de mètres cube, au maximum). Il s'agit d'une technique récente et innovante sur laquelle le retour d'expérience livre des premières connaissances intéressantes sur plusieurs sites (facilité et rapidité de mise en œuvre par exemple), mais encore limitées dans le temps (recul d'une dizaine d'années).

Interaction entre le matériau injecté et l'encaissant

Le but étant toujours d'assurer, au minimum, un confinement satisfaisant des piliers ou un remplissage des vides aussi complet que possible, la nature du (ou des) matériaux de remblai retenu(s) doit répondre à des exigences qui conditionnent la qualité du traitement. En particulier, les propriétés mécaniques du remblai ne doivent pas être altérées par la présence d'eau (les eaux sulfatées peuvent attaquer le béton par exemple).

Pour les mêmes raisons, le remblayage hydraulique (quelque soit le matériau injecté) ne sera pas recommandé dans le cas de cavités salines sauf avec de l'eau de gâchage à la saumure.

Impacts du comblement sur l'environnement

Les matériaux de remblai ne doivent pas présenter de risque de pollution, en particulier vis-à-vis de l'eau. Même si les vides souterrains ayant engendré des mouvements de terrain de type fontis sont souvent localisés au-dessus du niveau de la nappe superficielle, la configuration géologique des terrains environnants peut favoriser la percolation d'eau depuis la surface et la migration potentielle de polluants. Ce dernier paramètre est aujourd'hui examiné de manière systématique et l'appréciation technique interfère avec les réglementations, nationale et européenne, actuelle et à venir, sur les déchets et les décharges.

La connaissance de la nature physico-chimique du (ou des) matériau(x) de remblai et des contaminants potentiels qu'il contient, le comportement à long terme du coulis réalisé sont analysés pour prévoir la concentration des différents contaminants dans les lixiviats du coulis. La modélisation du transport des contaminants éventuels, issus du matériau de comblement utilisé, jusqu'aux points de captage par exemple, permet de déterminer si les concentrations restent compatibles avec l'exploitation de la ressource en eau souterraine pour la production d'eau potable (exemple du comblement des vides sous la ville de Thil, 54).

Contrôle

Compte tenu des enjeux, des contrôles doivent être réalisés pendant et après l'opération de comblement : nature et volume des matériaux injectés, conformité des dosages, qualité du remblayage, état et étanchéité des barrages... Après le comblement, des forages destructifs de contrôle sont recommandés (l'IGC de Paris, par exemple, recommande au minimum 1 forage de contrôle pour 10 forages de comblement).

Le remblayage partiel

Les techniques dites de remblayage partiel^[*] consistent à opérer un remplissage progressif de la cavité avec des matériaux tout-venant, si possible compactés, jusqu'à une hauteur suffisante pour assurer l'auto-comblement des fontis susceptibles de se produire (fiche 2 de l'annexe 3). Elles sont utilisées dans les sites accessibles ou inaccessibles. Un vide résiduel parfois important peut être éventuellement laissé à la partie supérieure de la cavité.

Le but recherché est d'assurer à moindre coût :

- une amélioration de la stabilité des cavités en maintenant un niveau de sécurité suffisant adapté aux enjeux ;
- une diminution notable des conséquences du risque, en cas de déstabilisation des cavités (affaissement possible mais limité de la surface, tassements, etc.).

Le rôle du remblaiement partiel repose donc sur deux actions fondamentales :

- un renforcement des piliers par effet de confinement grâce à l'effet de butée dû au remblai (« frettage ») et une diminution de leur élancement ;
- une diminution effective du volume des vides permettant une stabilisation des terrains à long terme par autocomblement des vides (éboulement progressif des bancs du toit) ;

Le processus de dégradation localisée par chutes de blocs, écaillage de piliers, ou éboulement de voûtes (fontis), n'est pas directement empêché par ce traitement. Toutefois, les dégradations seront interrompues dans leur évolution (remontée de fontis) lorsque le volume « foisonné » de la cloche d'éboulement additionné au volume remblayé sera égal au volume du vide initial (on parle alors de processus « d'autocomblement »). Le résultat n'est possible que lorsque les conditions de recouvrement sont favorables (caractéristiques de foisonnement des terrains, hauteur suffisante du recouvrement, absence d'aquifère, etc.).

Ce traitement rudimentaire peut être inopérant vis-à-vis du risque de fontis si le recouvrement n'est pas favorable au processus d'autocomblement (épaisseur trop faible, insuffisance du foisonnement).

On retiendra que ce traitement n'est envisageable que pour un niveau de sécurité minimal pour un site de surcroît non urbanisé. Ceci implique l'acceptation de l'occurrence de phénomènes d'instabilité différés susceptibles d'induire des tassements, tolérables sans conséquences fâcheuses pour des usages du type espaces verts, mais pas nécessairement compatibles pour des constructions.

Remplissage et traitement des terrains par injections

Le principe de l'injection est de faire pénétrer dans les vides du milieu (cavités souterraines, poches, vides résiduels, vides karstiques, vides fissuraux ou intergranulaires, etc.), un produit aussi pénétrant que possible (fluide peu visqueux) et capable de durcir (fiche 7 de l'annexe 3). Il s'agit de produits comme les coulis dont les caractéristiques sont adaptées à l'objectif recherché.

[*] On veillera à ne pas confondre le remblayage partiel avec le comblement localisé qui correspond à un comblement total du vide, c'est-à-dire sur toute sa hauteur, mais localisé à une zone bien délimitée par des barrages.

La mise en pratique d'opérations d'injections de mortier ou de coulis représente le mode de traitement le plus accompli en assurant une consolidation efficace et définitive du sous-sol par restitution des propriétés de résistance.

Opérations coûteuses de par la nature et la qualité des produits injectés, le traitement par injections est réservé aux sites difficiles qui nécessitent un niveau de sécurité maximal. Elles sont, de ce fait, plus spécifiquement dédiées au traitement des terrains en sites urbains destinés à recevoir des constructions nouvelles (projet d'aménagement d'une zone pavillonnaire ou d'immeubles collectifs).

Le procédé de comblement par injections se différencie essentiellement des autres modes de comblement par la mise en œuvre de granulats fins de qualité toujours traités au ciment, mélangés à de l'eau et injectés sous forme d'émulsion soit gravitairement soit, le plus souvent, sous faible pression à partir de forages en petits diamètres. Cette technique est donc opérable en terrains décomprimés et à grande profondeur pour les cavités inaccessibles ou même impossibles à reconnaître précisément. Dans le cas de vides de relativement faible volume, il est nécessaire d'utiliser un coulis à haute pénétrabilité et à le mettre en œuvre sous pression (Figure 10).

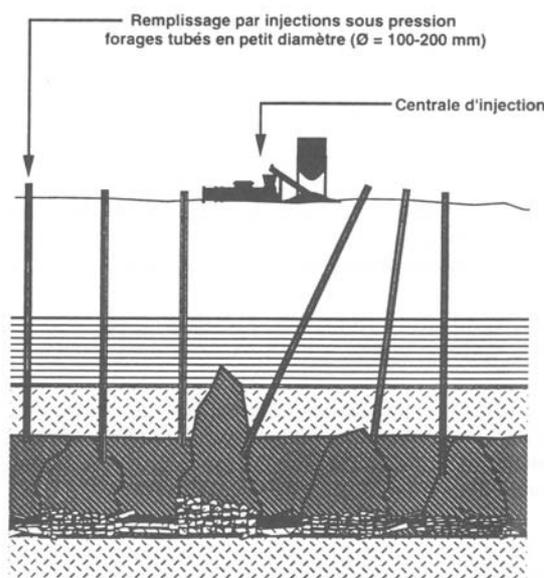


Figure 10 : Injections de mortier ou de coulis par voie gravitaire ou sous faible pression (0,1 - 0,5 MPa)

Le traitement des terrains par injections doit répondre à différents objectifs dont les principaux sont :

- le remplissage des vides par un produit capable de durcir dans le temps ;
- le collage ou le serrage des terrains encaissants (clavage des remblais au toit, traitement des niveaux décomprimés, etc.) ;
- l'amélioration ou la restitution des caractéristiques mécaniques des terrains.

En outre, ce traitement permet de participer à un système d'étanchéité particulier des terrains ou encore à la réalisation de barrages de protection spécifiques.

La pénétration du coulis exige presque toujours une certaine pression d'injection, la technique de mise en œuvre dépendant, par ailleurs, des caractéristiques des vides et des configurations de site (terrains, profondeur, environnement, etc.).

5.3.1.3 TECHNIQUES DE SUPPRESSION DES VIDES

Ces techniques consistent, dans le cas du comblement – terrassement, à décaisser et remplir les cavités par voie mécanique ou à provoquer un affaissement des terrains de recouvrement par pilonnage. Ces techniques présentent un intérêt particulier lorsque la localisation des vides n'est pas connue. Ces méthodes sont donc des méthodes « destructrices » et par conséquent non utilisables directement en site urbanisé.

La méthode de comblement – terrassement (fiche 9 de l'annexe 3) a pour objectif d'opérer :

- soit un comblement direct des cavités sous-jacentes à partir des matériaux de recouvrement abattus par voie mécanique ;
- soit un remblaiement (suivi d'un compactage), effectué après mise à jour des cavités par décaissement mécanisé. Les remblais correspondent bien évidemment aux matériaux de la couverture enlevés par les engins.

La méthode de remblaiement étant généralement suivie d'un compactage destiné à minimiser les tassements différés des remblais, les terrains peuvent être réhabilités comme espaces verts.

S'ils sont destinés à supporter des constructions nouvelles, les terrains doivent faire l'objet d'une consolidation par injections. Le traitement est éventuellement complété par des mesures de protection passive des structures (renforcement, fondations profondes, etc.).

Dans certaines conditions de site très favorables (faible hauteur de recouvrement, fort taux de défruitement...), on peut envisager le foudroyage des ouvrages souterrains par un abattage mécanique (compaction dynamique, vibro-compaction) plutôt que par explosif.

Par analogie à la méthode du pilonnage intensif utilisée dans les Travaux Publics, il s'agit de provoquer, depuis la surface, un effondrement total des structures souterraines par le lâcher en chute libre d'une masse (ou pilon) pouvant peser jusqu'à 40 tonnes ou plus, d'une hauteur de 30 à 50 m environ.

Cette technique aurait en fait deux rôles distincts :

- un effet de choc provoquant l'effondrement local de la cavité souterraine,
- un effet de compactage ou de consolidation par chocs superficiels répétés des terrains foudroyés.

A cet égard, cette méthode paraît très intéressante dans les cas simples sur les plans techniques et économiques, ce qui limite son domaine d'utilisation (faible couverture : 15 à 20 m, conditions de site non dangereuses, pas de risque de nuisances, etc.), d'autant plus que son application en site urbain s'avère a priori très délicate (ébranlements très violents créés par la chute du pilon).



Figure 11 : Illustration de la technique de compaction dynamique (Guyot, 1984)

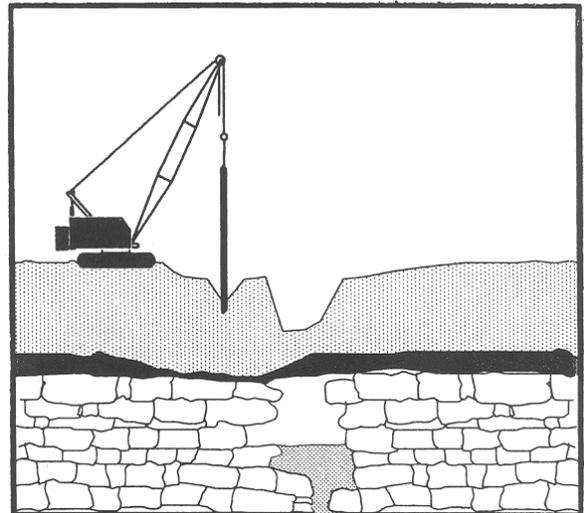


Figure 12 : Illustration de la technique de la vibro-compaction (Guyot, 1984)

5.3.2 TECHNIQUES DE PRÉVENTION PASSIVES

Les techniques de prévention dites « passives » correspondent à des dispositions constructives spéciales qui s'appliquent essentiellement aux constructions et ouvrages neufs et très souvent en accompagnement des dispositions de traitement du sol établies préalablement. Ces mesures visent à agir sur les terrains superficiels ou les structures de surface en vue de minimiser les conséquences d'un éventuel fontis.

L'intégration de la probabilité d'occurrence d'un fontis dans la conception des constructions consiste à doter l'ouvrage de dispositifs lui permettant de résister en cas d'apparition de fontis. Les principales méthodes de prévention et de protection du bâti par rapport aux mouvements du sous-sol, notamment les fontis, sont détaillées par AL HEIB [7]. La synthèse est présentée en annexe 4.

De nombreuses solutions techniques s'appliquant aux ouvrages neufs ou anciens peuvent être proposées pour réduire la vulnérabilité des ouvrages de surface. Le propos de ce document n'est pas de les décrire en détail. Leurs modalités d'applications pourront être consultées dans les principaux documents cités en référence ([14], [7], [8], [26]). Toutes ces solutions techniques ne sont souvent considérées que lorsqu'il n'est pas techniquement et/ou économiquement possible de supprimer le vide souterrain car elles ne suppriment pas l'aléa fontis.

On peut citer parmi ces techniques :

5.3.2.1 RENFORCEMENT DE LA STRUCTURE

Le renforcement de la structure d'une construction par chaînages, fondations superficielles renforcées (radier général, longrines en béton armé) est en principe réservée au cas de petits vides dont la répartition est inconnue : fontis, poches de dissolution, karsts, marnières, sapes, terrains foisonnés ou décomprimés ou à l'aplomb d'une zone anciennement effondrée.

5.3.2.2 RENFORCEMENT DU SOL DE FONDATION

Il peut se faire par des géotextiles ou des inclusions rigides.

Pour la technique des inclusions rigides (fiche 10 de l'annexe 3), il s'agit non pas de faire supporter des charges gravitaires placées en surface mais de faire reprendre, par des inclusions rigides inclinées dans le sol, des efforts « négatifs » en provenance de cavités souterraines. La fonction principale de ces inclusions sera d'intercepter la propagation des phénomènes d'affaissement ou d'effondrement de terrain en constituant une « barrière » dont le comportement homogénéisé pourrait être assimilé à une rigidification des horizons de subsurface afin de constituer un équivalent de « banc raide ». La Figure 13 illustre un exemple d'utilisation des inclusions rigides dans le sol.

Des modélisations numériques en 2D et en 3D ont été réalisées pour évaluer l'effet des inclusions rigides utilisées à « l'envers » [26] et [36].

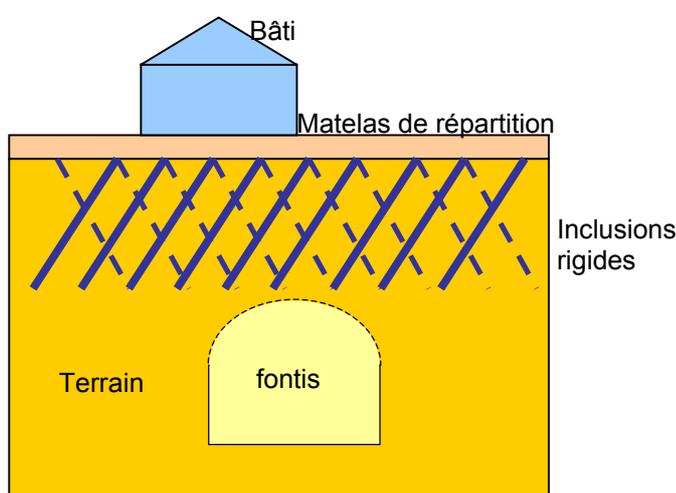


Figure 13 : Schéma d'implantation d'inclusions rigides dans le terrain

Les résultats des modélisations numériques sont encourageants puisque la mise en place d'un renforcement par inclusions rigides dans le terrain bloque, a priori, la remontée d'un fontis et entraîne une réduction des facteurs déterminant l'affaissement. Cependant, l'affaissement et la mise en pente restent encore relativement importants (en regard de la protection des biens) en valeur absolue.

Le renforcement par inclusions rigides semble jouer son rôle vis-à-vis de la protection des personnes mais n'est pas complètement satisfaisant en regard de la pérennité du bâti (la mise en pente n'est pas systématiquement améliorée par l'introduction d'inclusions rigides). Vis-à-vis de la protection du bien, la mise en place d'un réseau d'inclusions rigides implique de recourir, concomitamment, à une disposition constructive capable de tolérer une mise en pente de l'ordre de 1 % (chaînage, par exemple).

Seule une approche numérique a été réalisée jusqu'à présent. Elle mériterait d'être complétée par une approche expérimentale à l'aide de modèles physiques ou d'essais en vraie grandeur de manière à évaluer les différents modes d'interaction mis en jeu au-dessus et le long des inclusions et à valider les résultats numériques.

Différentes techniques de protection passive sont désignées sous le terme de méthodes « parachutes » (fiche 11 de l'annexe 3, [7][26]) :

- dans des zones où ne circulent que des piétons (espaces verts, chemins,...), il s'agit de la pose, sous la couche de terre végétale, d'un treillis galvanisé à larges mailles, qui sert de filet pour retenir les personnes en cas d'éboulement ;
- sous les chaussées ou les réseaux, il s'agit de l'utilisation d'un géotextile (membrane composite ou polyester) disposé et ancré sous la structure. Leur bonne résistance à la traction leur permet d'enjamber certaines zones décomprimées et de réduire les déformations à la surface. Plusieurs sites équipés de la sorte ont démontré l'efficacité de cette solution pour le remblai d'une route construite sur une zone de fontis (Kempton, 1992).

Le rôle d'un géotextile mis en place au sein d'une zone d'éboulement potentiel consiste à supporter les éléments le surplombant en s'appuyant sur l'effet d'arche (Figure 14) et à éviter toute déformation inadmissible susceptible de mettre en péril la stabilité du talus et/ou des ouvrages en zone de fontis (routes, éventuellement bâtiments, etc.).

Souvent, l'objectif n'est pas tant d'empêcher des déformations mais de prévenir, par l'apparition d'une déformation modérée, que le débouché de fontis en surface n'engendre un risque pour les personnes présentes en surface.

Cette solution technique est également envisagée pour la protection des bâtiments exposés aux problèmes de fontis. Des recherches sont actuellement en cours au sein de l'INERIS en collaboration avec la société BIDIM. Le programme de recherche RAFAEL³ a déjà permis de démontrer expérimentalement l'intérêt de cette technique et de proposer des méthodes de dimensionnement dans le cas de remblais routiers et ferroviaires sur des zones de fontis.

En extension de cette méthodologie, une technique de renforcement par géogrille pré-instrumentée (GEODETECT) est proposée par la société BIDIM. Dans le cas des fontis, l'intérêt de cette technologie est double puisqu'elle permet à la fois de renforcer le sous-sol tout en assurant un rôle d'alerte dès l'apparition des premiers mouvements de terrain. Une expérimentation en vraie grandeur s'avère toutefois nécessaire pour s'assurer de la pertinence de cette technique et permettre l'émergence de méthodes de dimensionnement.

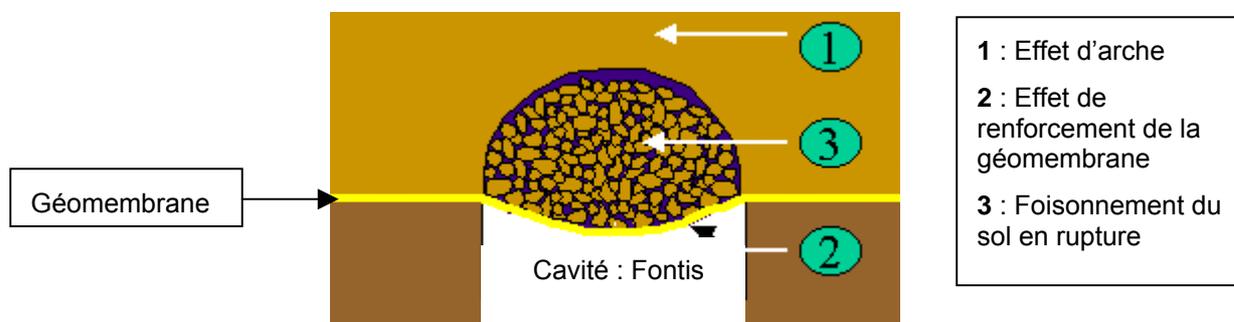


Figure 14 : Illustration de l'effet d'arche mobilisé grâce à la présence de la géomembrane

³ Programme expérimental commun à : LIRIGM, SNCF, SCETAURROUTE, CETE et BIDIM-POLYFELT GEOSYNTHETICS

5.3.2.3 DIMENSIONNEMENT DES FONDATIONS

Le choix et le dimensionnement des fondations exigent classiquement la prise en compte du poids et de la charge des bâtiments, mais également de la classe de risque associée aux fontis : faible, moyen ou fort. Ces trois types sont déterminés en fonction de la fréquence d'apparition de fontis, la hauteur de recouvrement, des contraintes tectoniques et de la variation du niveau piézométrique.

De manière générale, les fondations réalisées au sein d'une zone potentielle de fontis doivent être mises en œuvre sur un sol naturel présentant une portance aussi grande que possible. En cas de besoin, le sol peut être renforcé par des éléments métalliques ou des géomembranes.

Cas d'un risque faible : pour minimiser le risque, on peut avoir recours à des fondations isolées superficielles. Cette solution doit être associée à un drainage efficace et un sol relativement renforcé et permet de contrôler les tassements différentiels entre les différents éléments de la structure. Des poutres (longrines) peuvent également être associées aux fondations isolées. Elles permettent de former des ponts au-dessus des zones de fontis de petit diamètre (<10 m).

Cas d'un risque moyen : les fondations de type dalle avec poutres porteuses peuvent être utilisées dans le cas d'un risque de fontis faible à moyen.

Cas d'un risque fort : les fondations profondes sont généralement réservées aux constructions entreprises dans les secteurs présentant un risque de fontis élevé à très élevé. Ce type de fondation peut être constitué de palplanches, de pieux ou de puits. Les fondations de type puits sont très efficaces mais présentent des coûts de réalisation très élevés. Le rôle est de reporter les charges en dessous du niveau de la cavité. Il y a nécessité de chemiser les pieux ou de les ceinturer en maçonnerie (cavité accessible), au niveau de la traversée de la cavité. La réalisation de fondations profondes n'empêche pas la remontée des fontis mais limite les dégradations sur le bâti. On lui associe, le plus souvent, un traitement des vides par remplissage ou par des renforcements ponctuels.

5.3.2.4 ADAPTATION DES RÉSEAUX SOUTERRAINS ET DE LA VOIRIE

Il s'agit de limiter le risque de rupture et, en particulier, d'éviter les fuites d'eau qui peuvent accélérer le processus de dégradation d'une cavité. Les techniques consistent à utiliser des raccords souples adaptés aux déformations ou, au contraire, à renforcer l'ouvrage (pour les canalisations en gros diamètre) pour s'opposer aux déformations.

6. MESURES CURATIVES

Les méthodes curatives visent à intervenir après l'apparition d'un fontis afin d'atténuer la gravité du phénomène ou de permettre la construction d'ouvrage. Ces méthodes peuvent être :

- remblai de l'excavation ;
- compactage accéléré de l'excavation ;
- mise en œuvre d'un dispositif constitué de poutres enjambant l'excavation ;
- mise en valeur du fontis pour en faire un élément touristique (Stelmack et al., 1995).

La plupart de ces techniques ont été développées dans les paragraphes précédents. Des exemples d'application sont présentés en annexe 5.

Le remblayage de l'excavation en surface peut se faire avec divers produits de comblement. Précisons toutefois que dans la plupart des cas, l'injection de béton est recommandée par rapport à des matériaux granulaires qui peuvent déboucher avec le temps, en particulier dans des galeries pentées et /ou grâce à des circulations d'eau. Les mousses thermodurcissables (Figure 15, cf. §5.3.1.2 et fiche 8 de l'annexe 3) sont aussi utilisées dans les cas de crise pour leur rapidité de mise en œuvre et leurs propriétés expansives. Il ne s'agit toutefois pas d'une solution pérenne.



Figure 15 : Remplissage d'un fontis par de la mousse thermodurcissable et mise en place d'une couverture végétale (Conflans Ste-Honorine, Val-d'Oise)

7. CONCLUSION

Les résultats des études techniques PPRM par l'INERIS ces dernières années montrent que, parmi les phénomènes de « mouvements de terrain » résiduels, l'effondrement localisé, et plus particulièrement le fontis au droit de travaux miniers à faible profondeur, correspond à un aléa fréquemment rencontré à faible profondeur et important à considérer. Il l'est d'autant plus lorsqu'il se manifeste en contexte urbanisé.

Ce rapport, réalisé dans le cadre du programme EAT-DRS-03, d'appui technique au Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie (MinEFI), présente :

- un état de l'art et des recommandations sur les méthodes et outils d'évaluation du risque de remontée de fontis en surface (identification des règles, outils et méthodes, mise en évidence de différences d'approches selon les contextes ou de difficultés dans le processus d'évaluation) ;
- des éléments comparatifs, dans le cadre d'une approche technico-économique, des méthodes de mise en sécurité des sites soumis au risque de « fontis ».

On remarquera que, si dans les domaines de l'évaluation et du traitement du risque de fontis, il existe un savoir-faire et une expertise formalisés, le domaine de la surveillance des fontis est, à ce jour, peu développé.

Notons qu'en 2007, dans le cadre du programme EAT-DRS06, 2 sites à fontis seront instrumentés (écoute microsismique) constituant une expérience novatrice dans ce domaine.

Il apparaît donc important de renforcer la réflexion sur la surveillance du risque de fontis afin d'apprécier les domaines d'application des méthodes existantes ou nouvelles et leur caractère opérationnel.

8. BIBLIOGRAPHIE

- [1] (octobre 2005) L'Après Mines dans le Bassin Ferrifère Lorrain. Rapport de la Préfecture de la Région Lorraine – Préfecture de la Moselle ;
- [2] (4 mai 2006) *L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers. Guide méthodologique. Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa. Les risques mouvements de terrain, d'inondations et d'émissions de gaz de mine.* Contribution de divers organismes (INERIS, BRGM, GEODERIS, ENSMP, IRSN, CSTB) sous la direction de l'INERIS. Rapport INERIS DRS-06-51198/R01 ;
- [3] (juin 2006) *Synthèse des travaux de recherche « Après-mine fer » 2005.* Rapport GISOS LG.FH.SOS.PSI.RPRE.06.0047.C.doc.
- [4] ABBASS FAYAD A. (2004). Etude de stabilité de fontis au toit des carrières souterraines et traitements apportés aux conséquences induites en surface. Thèse INPL, 39-100.
- [5] ABBASS FAYAD A., AL HEIB M. (2004). Modélisation numérique de la formation d'un fontis à l'aide du code de calcul UDEC : Influence de la stratification et de la rigidité de la couche exploitée. Acte du colloque international de géotechnique (Beyrouth, Liban).
- [6] AL HEIB M., KAZMIERCZAK J.B. (juillet 2005) *Recommandations pour l'évaluation et le traitement des conséquences des mouvements du sous-sol sur le bâti, programme EAT-DRS-02, INERIS-DRS-05-56408/R03PROJET* en cours de validation ;
- [7] AL HEIB M. (18 juin 2001) *Effets et conséquences des mouvements du sous-sol sur le bâti. Synthèse des principales méthodes de prévention et de protection, programme EAT-DRS-02, INERIS-DRS-01-25315/RN01 ;*
- [8] AL HEIB M. (23 décembre 2003), *Effets et conséquences des mouvements du sous-sol sur le bâti : modélisation des conséquences des mouvements de terrains sur les structures, Programme EAT-DRS-02, INERIS-DRS-03-45828/RN05 ;*
- [9] AL HEIB M. (27 octobre 2004), *Utilisation de géotextile pour améliorer le comportement du sol au-dessus des cavités souterraines - Rapport intermédiaire - Programme EAT-DRS-02, INERIS-DRS-04-56408/RN02 ;*
- [10] ASTE J.P., BADJI N., BURLET D., CARBONEL A., DESBUISSON D., HOPP S. et LEFEBVRE-ALBARET P. (septembre 2006) Lasergrammétrie terrestre et Géomécanique en carrières, travaux au rocher et travaux souterrains, volume 25 de *IM Environnement (supplément à la revue Mines et Carrières n°129), pp 4-10 ;*
- [11] BAUDRON J.C., FABRIOL R., FOURNIGUET G., HAMM V., VAUTE L. (décembre 2003), *Modélisation hydrogéologique du réservoir minier de Godbrange et influence du comblement partiel à cendres volantes, Rapport final brgm/RP-52802-FR ;*
- [12] BENNANI M., JOSIEN J.P., BIGARRE P. (2004), Surveillance des risques d'effondrement dans l'après mine, besoins, méthodes : apport de la microsismique, volume 21 de *Les Techniques de l'Industrie Minérale, pp 15-22.*

- [13] BLIVET J.-C., GOURC J.-P. et VILLARD P. (2002), Prévention des risques d'effondrement de surface liés à la présence de cavités souterraines : une solution de renforcement par géosynthétique des remblais routiers et ferroviaires, volume 99 de la *Revue Française de Géotechnique*, 2^{ème} trimestre 2002, pp 23-34.
- [14] DECK O. (Septembre 2002) *Etude et conséquences des affaissements miniers sur le bâti : propositions pour une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité du bâti*, Thèse INPL ;
- [15] DECK O. (19 septembre 2003) *Inventaire des principales mesures constructives pour la prévention et la remédiation des fontis*, Programme DRS-02, INERIS-DRS-03-45828/RN02 ;
- [16] DEVILLERS D. (1999), L'après-mine, *Annales des Mines – Responsabilité et environnement de juillet 1999*, pp 44-50.
- [17] DIDIER C., SALMON R. (2004). Evaluation du risque d'apparition d'un fontis en surface : un modèle volumétrique probabiliste. Acte des JNGG, 451-462.
- [18] DUFFAUT P. (2004), De l'exploitation à l'aménagement du sous-sol, *Annales des Mines – Responsabilité et environnement d'avril 2004*, pp 67-73.
- [19] FENK J. (1984). Berechnung von Tagesbrüchen. *Neue Bergbautechnik*, 14, 11, 414-416.
- [20] HAZA E. et KHAY M. (2005), Zone de cavités souterraines : le renforcement par géosynthétique prévient le risque d'effondrement localisé, *article issu du séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS – Réseau des LCPC, Ecole Nationale des ponts et chaussées, Paris*, 11 mai 2005.
- [21] HUNT, S.R. (1980) Surface Subsidence due to Coal Mining in Illinois, PhD Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, IL.
- [22] JOSIEN J.P. (27 août 2003), *Fontis du 8 août 2003 – Rue des Marronniers – Ottange (57)*, rapport GEODERIS R-2003/093 ;
- [23] JOSIEN J.-P. (1 septembre 2006) *Qualification de l'aléa fontis – Méthodologie pour le bassin ferrifère lorrain*, rapport GEODERIS E2006/320DE – 06LOR2500 ;
- [24] KALENDRA B. SINGH, BHARAT B. DHAR (21 juillet 1997) Sinkhole subsidence due to mining, volume 15 de *Geotechnical and Geological Engineering*, 1997, pp 327-341 ;
- [25] KANNAN R. C. (1999) Designing foundations around sinkholes, volume 52 *Engineering Geology*, pp 75-82 ;
- [26] KAZMIERCZAK J.B. (12 octobre 2004), *Apport des inclusions rigides à la réduction des phénomènes d'affaissement et d'effondrement - Modélisations numériques 2D*, programme EAT-DRS-02, INERIS-DRS-04-56408/R02 ;

- [27] KAZMIERCZAK J.B. et AL HEIB M. (2005), Méthodologie pour la détermination de dispositions constructives permettant de gérer les ouvrages existants et futurs soumis aux mouvements de terrain (affaissement et fontis), *article issu du séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS – Réseau des LCPC, Ecole Nationale des ponts et chaussées, Paris, 11 mai 2005.*
- [28] LAMBERT C. (29 juillet 2005) *Typologie des événements redoutés au droit d'exploitations pentés ou filoniennes - 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, rapport INERIS DRS-05-55102/R01 ;*
- [29] LAMBERT C. (22 décembre 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, rapport INERIS DRS-05-55102/R02 ;*
- [30] MATHESON G.M. and ECKERT-CLIFT A.D. (1986) Characteristics of chimney subsidence and sink hole development from abandoned underground coal mines along the Colorado Front Range, *Proceedings of the 2nd Workshop on Surface Subsidence due to Underground Mining, West Virginia University, Morgantown, WV, pp. 204-214.*
- [31] MEIER G. (2001). Numerische Abschätzung von Tagesbruchfährdungen in Altbergbaugebieten. *Nationale Tagung für Ingenieurgeologie Sonderband Geotechnik Karlsruhe, Berichte 13, 95-100.*
- [32] MIDOT D., MARNET A. GIONTA J.-P. et TREBUCQ S. (2006) De la découverte au remblayage de vides miniers potentiellement instables : le cas de Thil (54), *Proceedings of the symposium Post mining 2005, Nancy, 16-18 novembre 2005 ;*
- [33] NICHOL D. (1998) Sinkholes at Glan Llyn on the A55 North Wales Coast Road, UK, volume 50 *Engineering Geology, pp 101-109 ;*
- [34] PIGGOTT R.J. and EYNON P. (1977) Ground movements arising from the presence of shallow abandoned mine workings, in *Proceedings of the Conference on Large Ground Movements and Structures, UWIST, Cardiff, Geddes, J.D. (ed.) Pentech Press, pp. 749-80.*
- [35] RAT M. (30 juillet 2002), *Risques liés aux fontis sur la ligne LGV NORD, Conseil Général des Ponts et Chaussées rapport n°2001-0179-01 ;*
- [36] RENAUD V. (1 septembre 2006), *Apport des inclusions rigides à la réduction des mouvements de terrain (affaissement, fontis) - Modélisations numériques 3D, programme EAT-DRS02, INERIS-DRS-06-75741/RN01.*
- [37] SALMON R. (1998) *Validation d'une nouvelle méthode de mise en sécurité des anciennes carrières souterraines abandonnées : le remblayage partiel. Rapport de DEA de l'Ecole Centrale de Paris.*

- [38] SENFAUTE G., ABDUL WAHED M., PIGUET J.P., JOSIEN J.P. (2000), Technique d'écoute microsismique appliquée au risque d'effondrement dans les mines du bassin ferrifère lorrain, volume 92 de *la Revue Française de Géotechnique*, pp 57-62.
- [39] STATHAM I. and TREHAME G. (1991) Subsidence due to abandoned mining in the South Wales Coalfield, UK: Causes and Mechanisms and Environmental Risk Assessment, *Proceedings of the 4th International Symposium on Land Subsidence, IAHS Publication No. 200*, pp. 143-52.
- [40] KALENDRA B. SINGH BHARAT B. Dhar (1997), Sinkhole subsidence due to mining, *Geotechnical and geological Engineering, 1997, vol. 15*, pp 327-341.
- [41] TIMOSHENKO S. (1961) *Théorie des plaques et coques*, Editions Dunod.
- [42] TRITSCH J.-J. (14 octobre 2005) *Méthodes de mise en sécurité des populations face au risque d'effondrement de cavités souterraines, programme EAT-DRS-02, Guide technique, INERIS-DRS-05-66174/R01-PROJET2*.
- [43] VACHAT J.C. (1982). *Les désordres survenants dans les carrières de la région parisienne. Etude théorique et pratique de l'évolution des fontis*, Thèse du CNAM, 115-126.
- [44] WATELET J.M. (2005), Réduction du risque d'effondrement en surface par comblement des anciennes carrières souterraines abandonnées. Evaluation technique de l'utilisation de résidus industriels comme matériaux de remblayage, *article issu du séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS – Réseau des LCPC, Ecole Nationale des ponts et chaussées, Paris, 11 mai 2005*.
- [45] WHITTAKER B.N. and REDDISH D.J. (1989) *Subsidence : occurrence, prediction and control*, Elsevier Science Publishers, Barking.

Sites internet :

<http://www.geopolis-fr.com/intox4.html>

http://www.lorraine.drire.gouv.fr/mines/2_5_surveillance.htm

<http://www.univ-savoie.fr/mse/ressources/rapports/rapports98/xpisti/A12.htm>

http://www.limousin.drire.gouv.fr/environnement/etatenv2004/IR_apres_mines.htm

<http://www.limousin.drire.gouv.fr/publications/3T2005/Apr%C3%A8sMine/page1.htm>

9. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Cahiers des charges de campagne de reconnaissance géotechnique par sondages	11 A4
Annexe 2	Fiches synthétiques des principales méthodes de surveillance du risque fontis	4 A4
Annexe 3	Fiches synthétiques des principales méthodes de traitement du risque fontis	19 A4
Annexe 4	Principales techniques et mesures de prévention et de protection du bâti pour le risque fontis	4 A4
Annexe 5	Exemples de mitigation du risque fontis	15 A4
Annexe 6	Principales méthodes analytiques pour évaluer la hauteur de remontée prévisible en surface d'un fontis	4 A4
Annexe 7	Coefficients de foisonnement préconisés par la R.T.R.	2 A4

ANNEXE 1

CAHIERS DES CHARGES DE CAMPAGNE DE RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE PAR SONDAGES

1. Cahier des charges de sondages carottés et pressiométriques
2. Cahier des charges de sondages destructifs et/ou carottés avec inspection vidéo
3. Mesures de sécurité à prendre pour la réalisation de sondages dans des vides pouvant contenir du gaz

1. CAHIER DES CHARGES DE SONDAGES CAROTTÉS ET PRESSIOMÉTRIQUES

Toutes les informations *en italique* sont à adapter en fonction de la campagne de reconnaissance et de son objectif.

1.1 OBJECTIFS DE L'EXPÉRIENCE ET MOYENS MIS EN ŒUVRE

1.1.1 OBJECTIFS DES SONDAGES

L'objectif de la présente reconnaissance, dont le protocole est présenté ci-après, consiste à connaître les caractéristiques mécaniques (module d'élasticité, pression de fluage, pression limite, RQD) des terrains de surface à proximité des *ouvrages miniers xx*.

1.1.2 MOYENS DE RECONNAISSANCE IN SITU MIS EN ŒUVRE

La technique préconisée est le sondage carotté et le sondage pressiométrique, les paramètres d'avancement du sondage étant enregistrés automatiquement pour ce dernier.

On procèdera à un sondage carotté à proximité immédiate *de l'ouvrage x*. On procèdera à un sondage pressiométrique à proximité de chacun *des ouvrages*

1.1.3 POSITIONNEMENT ET PROFONDEUR DES SONDAGES

Les sondages seront positionnés à une distance de 5 à 10 m du bord du puits (en fonction de l'accessibilité et des réseaux).

Ces sondages seront géoréférencés et nivelés par un géomètre.

Ces sondages devront permettre de reconnaître la profondeur à partir de laquelle les terrains de surface présentent les caractéristiques géomécaniques suffisantes pour *le traitement de mise en sécurité envisagé (support d'un éventuel bouchon autoportant pour un puits par exemple)*.

1.2 PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

1.2.1 PRESCRIPTIONS RELATIVES AU SONDAGE CAROTTÉ

Les prélèvements seront réalisés suivant les prescriptions de la norme XP P 94-202.

1.2.1.1 RÉALISATION DES SONDAGES

Matériel

Le type de carottier employé devra être adapté au carottage *de marnes indurées*.

Le diamètre de foration n'est pas imposé. Il devra cependant être optimisé dans l'optique du carottage et de la finalité de l'ouvrage.

Conditionnement des échantillons

Les carottes seront disposées dans des caisses prévues à cet effet protégées des intempéries.

En cas de foration à l'air, les cuttings seront échantillonnés mètre par mètre et conservés dans des sacs sur lesquels sera indiquée la profondeur de prélèvement. Ils devront être stockés à l'abri des intempéries.

En cas de foration à l'eau, les arrivées principales de fluide seront récupérées et conditionnées en flacons sur lesquels sera indiquée la profondeur de prélèvement.

Organisation des opérations

Les opérations de carottage devront être réalisées en étroite collaboration avec l'INERIS qui :

- confirmera ou adaptera en fonction des terrains traversés les profondeurs de carottage ;
- procédera avant conditionnement des carottes :
 - à leur description lithologique (nature, fracturation pour calcul du RQD ...) ;
 - à des prises de vue ;
- s'assurera du bon conditionnement des carottes ;
- procédera au choix des carottes à faire parvenir au laboratoire et assurera leur transport jusqu'à celui-ci.

Pour assurer une bonne coordination des opérations, le foreur devra établir un planning prévisionnel des travaux qu'il réactualisera quotidiennement.

Une réunion préparatoire entre les différents intervenants devra être réalisée un mois avant le début du chantier.

1.2.1.2 RÉALISATION DES MESURES

La foration devra être accompagnée de la mesure et de l'enregistrement en continu des paramètres suivants :

- Paramètres devant demeurer constants dans la mesure du possible :
 - couple de rotation ;
 - vitesse de rotation ;
 - poussée sur l'outil ;
 - débit du fluide d'injection (s'il y a lieu) ;
- Paramètres variables :
 - vitesse instantanée d'avancement ;
 - pression du fluide ;
 - pression de frappe ou percussion réfléchie.

Ces paramètres seront transmis sous forme de log sur support papier et informatique.

Le sondeur notera toute anomalie constatée lors de la foration et du carottage et mesurera sur les carottes le RQD ainsi que le pourcentage de récupération.

1.2.2 PRESCRIPTIONS RELATIVES AUX SONDAGES PRESSIOMÉTRIQUES

Au préalable, un avant-trou sera réalisé afin d'éviter tout percement de canalisation ou de réseau.

L'outil de foration sera adapté aux terrains à traverser (remblai divers, possibilité de présence d'anciennes maçonneries ou de béton...). Il sera équipé d'un enregistreur automatique des paramètres d'avancement : vitesse d'avancement, pression d'injection du fluide de foration, pression sur l'outil.

Cet enregistreur sera étalonné au préalable par un essai de chute libre.

On veillera à ce que la foration soit réalisée avec une pression sur l'outil la plus constante possible.

Toute anomalie d'avancement (perte d'injection, vitesse d'avancement très faible ou très élevée, chute d'outil) devra être mentionnée très précisément dans la coupe sondeur. Le maître d'ouvrage devra être averti dans les plus brefs délais dans le cas d'une anomalie majeure (présence de vides ou de zone très décomprimée, par exemple).

Le sondeur devra également établir une coupe des terrains en fonction de la remontée des matériaux désagrégés par la foration.

1.2.3 PRESCRIPTIONS RELATIVES AUX ESSAIS PRESSIOMÉTRIQUES

Les essais seront réalisés suivant les prescriptions de la norme en vigueur NF P 94-110.

1.2.4 NOMBRE D'ESSAIS PAR PROFIL

Il sera procédé à un essai pressiométrique tous les mètres de profondeur.

1.2.4.1 INSERTION DE LA SONDE DANS LE TERRAIN

Le mode normal d'insertion de la sonde dans le terrain est l'introduction dans un avant-trou effectué suivant les prescriptions de la norme.

1.2.4.2 RÉALISATION DES ESSAIS

Programme de chargement

Tous les essais seront effectués suivant le programme de chargement par paliers de pression croissante décrit dans la norme NF P 94-110.

Matériel pressiométrique

- *Sonde pressiométrique - pression maximale d'essai*

Les essais seront effectués à l'aide de la sonde pressiométrique type G. La capacité de montée en pression du pressiomètre sera d'au moins 5 MPa.

- *Enregistrement des essais*

L'enregistrement des essais sera automatisé avec du matériel agréé. Toutefois l'opérateur relèvera manuellement les diverses informations des essais, afin de se prémunir d'une éventuelle panne d'enregistrement.

1.2.5 PRESCRIPTIONS RELATIVES À L'INTERPRÉTATION DES ESSAIS

Les essais seront interprétés par un programme qui assurera deux types de présentation:

- les courbes pressiométriques (P, V) de chaque essai, avec les caractéristiques pressiométriques mesurées ou calculées ;
- le profil pressiométrique de chaque sondage, présentant le module pressiométrique E_p , la pression de fluage P_f et la pression limite P_l .

2. CAHIER DES CHARGES DE SONDAGES DESTRUCTIFS ET/OU CAROTTÉS AVEC INSPECTION VIDÉO

Toutes les informations *en italique* sont à adapter en fonction de la campagne de reconnaissance et de son objectif.

2.1 OBJECTIFS DE LA CAMPAGNE DE RECONNAISSANCE

La campagne de reconnaissance a pour objectifs :

- de vérifier l'existence ou non de vides résiduels dans les anciens travaux miniers *situés à l'aplomb de zones bâties* ;
- de vérifier la profondeur des travaux ;
- d'apprécier la nature et l'état des terrains sus-jacents les travaux .

Pour ce faire, les forages seront effectués *en destructif et/ou en carottés* avec enregistrements des paramètres de forage.

2.2 SPÉCIFICATIONS TECHNIQUES GÉNÉRALES

2.2.1 FINALITÉ DES FORAGES

Les sondages destructifs sont destinés à rechercher des cavités. Ils seront forés généralement verticalement avec enregistrement des paramètres à l'avancement mais il est demandé à l'Entreprise de prévoir la possibilité de réaliser des sondages inclinés. Au cours de cette campagne, les sondages destructifs ne devraient pas dépasser *30 m* de longueur en moyenne. Il est demandé à l'Entreprise de provisionner chaque atelier de sondage avec *50 m* de tiges.

Les forages atteindront la base du vide, quant il existe, et sera *in fine* tubé sur toute la hauteur des terrains surmontant les travaux et équipé pour permettre le passage de caméra et d'appareils de mesures de distance (laser ou sonar). Cette méthode permettra d'obtenir des informations quant à l'ouverture des travaux et l'état des terrains sous-jacents.

2.2.2 IMPLANTATION DES FORAGES

Les forages seront implantés à l'aplomb des anciens travaux miniers de la zone, à des emplacements définis sur la *figure 1* en accord avec *l'exploitant et/ou le client de l'étude*.

Ces sondages seront géoréférencés et nivelés par un géomètre.

Toutefois l'incertitude de positionnement fond-jour et la méthode utilisée pour dépiler font que pour, qu'un sondage soit correctement positionné, plusieurs autres seront peut-être nécessaires.

La réalisation et la position d'autres forages éventuels seront décidées en cours de la campagne en fonction des résultats obtenus et en suivant les principes de reconnaissance décrits au paragraphe 2.2.5.

Dans cette zone la cote du terrain varie de *a* à *b m NGF* environ.

(indiquer les enjeux en surface) se trouvent au droit de la zone investiguée.

2.2.3 COUPE DE RÉFÉRENCE, ÉPAISSEURS ET PROFONDEURS ATTENDUS DES TERRAINS

Les sondages devront traverser l'ensemble des couches ferrifères exploitées. Toutefois, si le sondage rencontre du vide, la foration sera suspendue et le forage sera équipé comme indiqué dans le paragraphe 2.2.6.

Les profondeurs et épaisseurs des terrains ferrifères rencontrés sont indicatives. Elles pourront évoluer de quelques mètres en fonction des variations latérales de faciès, de la zone d'implantation et de la topographie. *(noter la présence de faille à proximité de la zone à reconnaître)*

Couches exploitées	Profondeur estimée	Ouverture estimée des travaux	Etat estimé des travaux	Epaisseur estimée de l'intercalaire

Tableau 1 : Caractéristiques estimées des couches à reconnaître

2.2.4 PARAMÈTRES À ACQUÉRIR LORS DE LA FORATION

Les sondages seront réalisés en petit diamètre et réalisés ultérieurement pour la pose des tubages.

La foration devra être accompagnée de la mesure et de l'enregistrement en continu des paramètres suivants (selon la méthode de foration proposée) :

- paramètres devant demeurer constants dans la mesure du possible :
 - couple de rotation ;
 - vitesse de rotation ;
 - poussée de l'outil ;
 - débit de fluide d'injection (s'il y a lieu) ;
- paramètres variables :
 - vitesse instantanée d'avancement ;
 - pression de fluide
 - pression de frappe ou percussion réfléchie.

Ces paramètres de forage devront être enregistrer dès le début du forage afin d'acquérir également des données sur les terrains de recouvrement. Ils seront transmis sous forme de log sur supports papier et informatique.

La longueur de sondage prise en compte sera mesurée à partir du niveau du sol.

Toutes les indications relatives à la foration seront notées dans le compte rendu de chantier : en particulier, seront notées les pertes de fluide, les chutes perçues du train de tige, les variations de vitesse d'avancement, toutes les informations utiles sur la présence de discontinuités et de vides dans les terrains traversés.

2.2.5 CONDITIONNEMENT DES ÉCHANTILLONS

Il est demandé à l'Entreprise d'effectuer par passe métrique une récupération d'échantillons de cuttings (environ 1 dm³). Pour chaque échantillon seront indiqués, à l'encre indélébile sur le sac et/ou sur une étiquette glissée dans le sac, le numéro du sondage ainsi que les profondeurs inférieure et supérieure du prélèvement. Ils devront être stockés à l'abri des intempéries.

Les carottes seront disposées dans des caisses prévues à cet effet protégées des intempéries.

En cas de foration à l'eau, les arrivées principales de fluide seront récupérées et conditionnées en flacons sur lesquels sera indiquée la profondeur de prélèvement.

2.2.6 ORGANISATION DES OPÉRATIONS

Pour la recherche de galeries, les sondages sont généralement réalisés sous la forme de triplets. Si le premier sondage est négatif, un second puis un troisième (voire plus) pourront être réalisés en se décalant de part et d'autre du premier forage. L'espacement entre forages sera déterminé par le MO ou son représentant.

Les opérations de *sondage/carottage* devront être réalisées en étroite collaboration avec l'INERIS qui :

- confirmera ou adaptera en fonction des terrains traversés les profondeurs de *foration/carottage* ;
- *procèdera avant conditionnement des carottes* :
 - à leur description lithologique (*nature, fracturation pour calcul du RQD ...*) ;
 - à des prises de vue ;
- s'assurera du bon conditionnement des échantillons ;
- *procèdera au choix des carottes à faire parvenir au laboratoire et assurera leur transport jusqu'à celui-ci.*

Pour assurer une bonne coordination des opérations, le foreur devra établir un planning prévisionnel des travaux qu'il réactualisera quotidiennement.

Une réunion préparatoire entre les différents intervenants devra être réalisée un mois avant le début du chantier.

Un technicien de l'INERIS sera sur place pour optimiser l'emplacement de ces forages.

Les sondages destructifs seront réalisés à l'eau. Par définition, les sites de sondages sont à proximité d'enjeux existants et donc facilement accessibles à une foreuse. Dans la mesure du possible, ils seront également implantés à moins de 1 km d'un point d'eau. Néanmoins, il est demandé à l'Entreprise de prévoir, dans le bordereau des prix, une estimation du citernage.

2.2.7 EQUIPEMENT DES SONDAGES ET INSPECTIONS PAR CAMÉRA

Sur instruction du MO ou de son représentant, les sondages pourront soit :

- être tubés en PVC d'un diamètre de 112 x 125 mm jusqu'au toit de la cavité rencontrée, pour permettre de réaliser ultérieurement une inspection par caméra vidéo, des mesures laser ou autres diagraphies différées. Les têtes de forages seront alors équipées d'une bouche à clé, qui ne devra pas dépasser du revêtement de la chaussée ;
- être rebouchés avec du ciment - tout-venant et pose d'une rustine sur la chaussée suivis d'une remise en état du site.

3. MESURES DE SÉCURITÉ À PRENDRE POUR LA RÉALISATION DE SONDAGES DANS DES VIDES POUVANT CONTENIR DU GAZ

Lorsque les sondages sont susceptibles de rencontrer des vides miniers contenant du gaz de mine éventuellement inflammable, asphyxiant et/ou toxique et sous pression, l'entreprise prendra toute mesure adaptée, pouvant s'inspirer de celles qui suivent.

En tête de sondage, on aura posé, après quelques mètres de foration et tubage cimenté de la tête du sondage, un té équipé :

- dans l'axe du trou, d'une vanne presse-étoupe ;
- sur le côté (en déviation), d'une vanne prolongée d'un tube (flexible avec mise à la terre).

Ce dispositif devra permettre, en cas de venue importante de gaz, de fermer la tête du sondage aussi rapidement que possible et de dévier le gaz, avec un flux contrôlé, vers le côté, en un point éloigné de toute source potentielle d'inflammation.

Le flexible sera équipé, près de la tête de sondage, d'une prise pour y injecter de l'air comprimé destiné à la purger et à diluer le gaz qu'il véhicule.

Le jet d'air comprimé sera agencé de façon à favoriser la sortie du gaz à l'opposé de la tête de sondage.

Après l'achèvement du sondage, la tête de sondage sera fermée par un plateau muni d'un robinet permettant le contrôle de l'atmosphère au sein du sondage.

L'entrepreneur définira et matérialisera une zone de danger d'un rayon minimum de 3 m autour du point de sondage, du flexible d'évacuation du gaz et du réservoir éventuel de décantation du fluide de forage. Cette zone sera interdite à toute personne non indispensable. Tout engin ou machine non nécessaire aux opérations de forage en sera exclu et éloigné au maximum de la zone des opérations.

Toute source chaude ou flamme sera proscrite.

Toutes les masses métalliques du chantier seront mises à la terre (piquet de terre unique).

Les engins (électriques ou à moteur à explosion) nécessaires à la foration seront tous reliés à un bouton d'arrêt, unique, qui en arrêtera le fonctionnement instantanément par simple poussée.

Pendant les opérations de foration, et pendant toute la durée des arrêts si l'étanchéité n'est pas assurée au droit de la tête de sondage, la qualité de l'atmosphère sera contrôlée en permanence :

- à proximité immédiate de la tête de forage ;
- à la sortie du flexible d'évacuation du gaz.

On utilisera, à cet effet :

- un oxygéno-mètre ;
- un détecteur de CO ;

- un détecteur de H₂S ;
- un détecteur de CO₂ ;
- un explosimètre.

Ces appareils (ou cet appareil unique de type « multigaz ») devront être d'un type agréé pour l'utilisation en atmosphère inflammable.

A proximité immédiate de la tête de forage, en cas de baisse de la concentration en oxygène en dessous du seuil de 19% volumique ou de dépassement de la concentration en méthane du seuil de 1% volumique (soit 20% de la LIE aux abords de la tête de sondage) ou de dépassement de la concentration en CO₂ du seuil de 1% volumique ou encore de dépassement de la concentration en CO du seuil de 50 ppmv (parties par million en volumes) ou de celle du H₂S du seuil de 10 ppm, toutes les installations seront immédiatement arrêtées grâce au bouton d'urgence.

A la sortie du flexible d'évacuation du gaz, si la concentration en oxygène est supérieure à 7% volumique, on injectera de l'air comprimé dans le flexible pour obtenir une concentration en méthane inférieure à 1% volumique (soit 20% de la LIE).

Les équipements ne pourront être remis en service que 5 minutes au moins après le retour de la situation à la normale.

On disposera d'un moyen de dilution de gaz (jet d'air ou mieux éjecteur à air comprimé) à la sortie de la tête de sondage, en veillant bien à ne pas dévier la sortie du gaz vers une machine en fonctionnement ou vers une source d'inflammation.

Si la foration se fait à l'eau, celle-ci pouvant dégager du méthane après sa mise à l'air, on proscriera l'emploi d'une cuve fermée dessus et on éloignera toute source d'inflammation de la cuve.

Préalablement aux opérations, l'entrepreneur rédigera les consignes adéquates et informera le personnel des risques encourus et de la conduite à tenir.

Au cours ou à l'issue de cette campagne d'investigations, en fonction des résultats obtenus, on évaluera l'intérêt de transformer certains des sondages de reconnaissance en sondages de décompression.

ANNEXE 2

FICHES SYNTHÉTIQUES DES PRINCIPALES MÉTHODES DE SURVEILLANCE

Fiche A : INSPECTION PAR EXAMEN VISUEL

Rôle	<ul style="list-style-type: none"> • Opérer des investigations en site inconnu • Assurer une surveillance périodique de l'état du site et de son évolution • Prévenir en cas d'évolution rapide des dégradations
Principe	<ul style="list-style-type: none"> • Reconnaissance par observations visuelles accompagnées, éventuellement, de relevés instrumentés sommaires • Suivi de l'évolution des dégradations à partir d'un circuit de visite (périodicité mensuelle à annuelle)
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Cartographier la géométrie des travaux du fond • Etablir un état des lieux, des relevés géologiques et géotechniques • Contrôler les évolutions par des observations sur témoins de plâtre, surfaces peintes, etc.
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Cavités obligatoirement accessibles ou rendues telles • Accessibilité définie à la fois par les conditions d'accès et les conditions de sécurité (dégradations, effondrements, présence d'eau, atmosphère insalubre...) • Possibilité occasionnelle de reconnaissance voire de surveillance en mine inaccessible par investigations effectuées par forages depuis la surface (endoscopie, vidéo, etc.)
Performances	<ul style="list-style-type: none"> • Examens purement visuels mais souvent très efficaces (carte géotechnique évolutive) • Méthode préliminaire de contrôle permettant d'établir à terme une stratégie de mise en sécurité
Niveau de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode de prévention élémentaire, considérée comme préliminaire à toute solution de maîtrise du risque
Exigences de la technique	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode de surveillance exigeant un personnel qualifié et expérimenté (services d'inspection spécialisés)
Pérennité	<ul style="list-style-type: none"> • Sans objet, elle peut s'exprimer toutefois sous forme d'adaptation de la fréquence des visites au contexte du site
Contrôle	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de contrôles spécifiques autres que des investigations complémentaires visant à lever une incertitude
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode rustique mais économique • Surveillance possible de grandes surfaces de vides
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode purement qualitative faisant souvent appel au « sens » du géotechnicien • Possibilités d'erreurs de diagnostic (difficultés d'interprétation, mécanisme d'évolution non perceptible par absence de signes prémonitoires, etc.) • Périodicité des visites non adaptée à une évolution brusque des instabilités • Méthode adaptée aux sites souterrains en bon état et peu évolutifs
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode économique réservée principalement à des agents de services publics spécialisés
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de méthode normalisée

Fiche B : SURVEILLANCE INSTRUMENTÉE

Rôle	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer le diagnostic de stabilité • Fournir une alarme (télésurveillance avec système d'alerte) • Solution palliative permettant de différer les travaux de traitement
Principe	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse de l'évolution des mouvements par mesures des vitesses et accélération de déformations • Possibilité de transmission des données à distance (télésurveillance)
Types	<ul style="list-style-type: none"> • Surveillance instrumentée par : <ul style="list-style-type: none"> ◆ lecture directe sur place ◆ télémesure avec raccordement à un système centralisé ◆ télésurveillance avec interrogation à distance
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Convergence entre épontes • Expansion du toit • Dilatation des piliers • Pression dans les piliers • Chutes de blocs (filets instrumentés)
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Cavités obligatoirement accessibles ou rendues telles • Conditions d'accès <ul style="list-style-type: none"> ◆ accès par galerie ou puits ◆ état de stabilité suffisant des ouvrages • Cavités non accessibles : possibilité de mise en œuvre de techniques depuis la surface (caméra vidéo en sondage, dispositifs de mesures en forages)
Performances	<ul style="list-style-type: none"> • Dispositifs de mesure : Mesures normalement très précises, effectuées avec une sensibilité de l'ordre de 1 micron jusqu'à 1/10ème de mm, et le plus souvent à 1/100ème de mm (selon le type de capteur) • Autres performances dépendant des caractéristiques électroniques de la chaîne d'acquisition et du traitement des informations (précision résiduelle, vitesse de scrutation, etc.)
Niveau de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode de prévention par alerte ne garantissant pas une mise en sécurité définitive et totalement sûre, quelle que soit la qualité du système de surveillance
Exigences de la technique	<ul style="list-style-type: none"> • Technique qui ne devrait être mise en œuvre que par des organismes spécialisés • Compétences exigées dans les domaines de la géotechnique, de la métrologie et de l'électronique
Pérennité	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne fiabilité des capteurs classiques (potentiométriques), durée de vie d'une dizaine d'année, difficile à estimer et dépendant étroitement du site • Système de mesures électronique ou informatisé : 5 à 10 ans de vie • La maintenance de l'ensemble des instrumentations est nécessaire annuellement
Contrôle	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôles périodiques du fonctionnement des matériels • Maintenance (annuelle) obligatoire des dispositifs de mesure
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Conserver ouverts ouvrages (stockages souterrains, ERP, tels que musées, etc.) • Différer les travaux (aspect financier ou autre) • Surveiller à distance (en conditions difficiles)

Fiche B : SURVEILLANCE INSTRUMENTÉE

(suite)

Inconvénients	<ul style="list-style-type: none">• Surveillance réservée à des zones minières peu importantes (quelques hectares au maximum)• Caractère local et ponctuel, pertinence du choix de l'implantation• Difficulté du diagnostic et fausses alertes• Définition de cadence d'interrogation• Instrumentation (fiabilité, pérennité,...), dysfonctionnements• Organisation pour une gestion de la crise en cas d'alerte• Responsabilités en situation de crise
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none">• Ponctuellement, pour un système automatique de télésurveillance sur un à quelques hectares :<ul style="list-style-type: none">♦ coût équipement et installation = 30 à 60 k€(investissement de base)♦ coût annuel maintenance et exploitation = 10 à 15 k€(par année)• Inspection SDICS (Nord) sur 400 ha dont 10 - 15 ha instrumentés activité par an :<ul style="list-style-type: none">♦ 3 à 3,5 technicien♦ 0,2 ingénieur
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none">• Guide méthodologie de la Surveillance à la Télésurveillance, 1994. Projet National ITELOS

ANNEXE 3

FICHES SYNTHÉTIQUES DES PRINCIPALES MÉTHODES DE TRAITEMENT

- 1. Renforcement des ouvrages**
- 2. Remblayage partiel**
- 3. Remblaiement direct depuis le fond par engins mécanisés**
- 4. Remblaiement par déversement gravitaire - Voie sèche**
- 5. Remblaiement par déversement gravitaire - Voie semi-humide**
- 6. Remblayage hydraulique**
- 7. Remplissage et traitement par injections**
- 8. Remplissage par mousses thermodurcissables**
- 9. Accélération du phénomène de fontis (méthode par terrassement –
comblement)**
- 10. Renforcement du sol par inclusions rigides**
- 11. Méthodes parachutes**

Fiche 1 : RENFORCEMENT DES OUVRAGES

Rôle	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer les conditions de stabilité locales d'un site souterrain • Maintenir le site souterrain ouvert, dans de bonnes conditions de sécurité • Eviter le remblaiement systématique • Mise en sécurité des terrains de surface (espaces verts, voirie, bâti existant)
Principe	<ul style="list-style-type: none"> • Augmenter la portance (piliers) • Améliorer la solidarisation entre bancs (toit) • Assurer un revêtement protecteur (parements et toit) • Améliorer la cohésion par confinement (piliers et galeries)
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Adaptation de techniques différentes à des traitements spécifiques, en fonction de : <ul style="list-style-type: none"> ◆ la nature des ouvrages (piliers, toit, mur, galerie d'accès, etc.) ◆ l'état des ouvrages (écaillage, épaufrure, fracturation, rupture, etc.) • Traitement du toit et des galeries par : <ul style="list-style-type: none"> ◆ boulonnage (soutien, confinement, renforcement) <ul style="list-style-type: none"> ⇒ ancrage ponctuel mécanique ⇒ ancrage réparti avec scellement à la résine ◆ soutènements porteurs en galeries <ul style="list-style-type: none"> ⇒ maçonnerie ⇒ cadres ⇒ revêtements bétonnés (béton projeté ou béton coffré) ◆ soutènement des têtes de catiches par dalle bétonnée • Traitement des piliers <ul style="list-style-type: none"> ◆ injections de consolidation ◆ boulonnage des parements ◆ projection de béton ou résine ◆ ceinturage - cerclage • Edification de piliers artificiels • Maçonnerie <ul style="list-style-type: none"> ◆ piliers bétonnés coffrés et clavés ◆ piliers bétonnés depuis la surface ◆ piliers injectés par coulis à rigidification rapide
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Cavités accessibles non dangereuses • Nécessité de maintenir l'ouverture des ouvrages • Traitement local, ampleur limitée des travaux • Techniques opérables indépendamment de la profondeur et de la nature des terrains de couverture
Performances	<ul style="list-style-type: none"> • Renforcement local des ouvrages souterrains pouvant être extrêmement important en fonctionnement des matériaux et produits utilisés (boulons, tirants, cadres, grillage, treillis, béton, maçonnerie, etc.) et de leur dimensionnement (densité à la pose, longueur, épaisseur, etc.)
Niveaux de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Faible à élevé en fonction de la destination du site (calculs de dimensionnement)
Exigences de la technique	<ul style="list-style-type: none"> • Certaines techniques exigent un matériel de pose important (engins mécanisés), du personnel compétent (boulonnage, béton projeté, etc.) et des spécialistes pour les calculs de dimensionnement du soutènement
Pérennité	<ul style="list-style-type: none"> • Dans l'ensemble plutôt faible pour les techniques utilisant des métaux (fonte, acier, etc.), surtout en milieu agressif (sel). En présence d'eaux séléniteuses, le béton projeté subit également des altérations géochimiques. La durée de vie des cadres et des boulons serait en moyenne d'une trentaine d'années en conditions normales (mines non salines)

Fiche 1 : RENFORCEMENT DES OUVRAGES

(suite)

Contrôles	<ul style="list-style-type: none">• Techniques exigeant de nombreux contrôles : à la réception (contrôle qualité des matériaux et produits), à la pose (essais de traction sur boulons, etc.) ou après pose (essais de résistance des bétons projetés ou coulis)
Avantages	<ul style="list-style-type: none">• Conservation ou réaménagement des sites (parkings, stockages, musées, abris, ERP, etc.)• Eviter à moindres frais l'exécution de fondations profondes• Techniques minimisant les nuisances sur l'environnement
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none">• Mise en sécurité non pérenne vis-à-vis du risque fontis (pas de suppression du vide)• Inutilisable avec un trop mauvais état des ouvrages• Difficile ou non pérenne en milieu agressif• Pérennité du matériel (boulons, aciers, bétons, etc.) à long terme• Opérations parfois dangereuses (purgeage, foration, etc.)• Non préconisé pour la construction de bâtiments nouveaux importants• Compétences « techniques minières » exigées• Contrôle a posteriori des travaux• Coût économique souvent prohibitif
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none">• Boulonnage = 45 à 100 €/m² ou 1 500 à 5 000 €/pilier• Grillage et revêtement béton (5 cm) = 40 à 60 €/m²• Revêtement maçonné en galerie = 800 € à 2 500 €/ml• Cadre = 500 à 1000 €/m²• Revêtement en béton projeté (10-15 cm) sur pilier = 80 à 100 €/m²• Ceinturage bétonné (50 cm) des piliers = 10 000 à 15 000 €/pilier• Pilier artificiel = 250 à 400 €/m³• Coût moyen consolidations maçonnées à Paris (carrière) de l'ordre de 180 €/m² de terrain traité en surface, soit 1,8 M€/ha
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none">• Recommandations AFTES : condition d'emploi du boulonnage, 1979• Recommandations AFTES : conception et dimensionnement du boulonnage (à paraître)• Recommandations AFTES : conception et dimensionnement du béton projeté, 2001• Recommandations AFTES : emploi des cintres en travaux souterrains, 1978• Recommandations AFTES : béton projeté et boulonnage, 1979• Recommandations Traitement des cavités souterraines, Annales de l'ITBTP, 1979• Notice technique relative aux travaux de consolidation par piliers maçonnés dans les carrières de calcaire grossier situées en région parisienne, Inspection Générale des Carrières (nouvelle version à paraître)

Fiche 2 : REMBLAYAGE PARTIEL

Rôle	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer à un moindre coût la stabilité des ouvrages • Diminuer la gravité du risque d'effondrement
Principe	<ul style="list-style-type: none"> • Remplissage limité à une certaine hauteur ($\frac{1}{2}$ hauteur jusqu'à $\frac{1}{10} \cdot H_{\text{Recouvrement}}$) • Confortement des piliers par confinement (frettage des piliers) • Diminution du volume des vides • Profiter le cas échéant du foisonnement des terrains de recouvrement
Nature des produits	<ul style="list-style-type: none"> • Remblais tout-venant, stériles miniers, éventuellement par des matériaux nobles (sablons) • Sauf matériaux argileux, organiques, polluants (déchets industriels)
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Directement par le fond par remblayage par engins • Depuis la surface : <ul style="list-style-type: none"> ♦ gravitairement (forages gros diamètres = 600 à 1 000 mm) ♦ par voie humide (forages en plus petits diamètres = 200 à 400 mm) • Compactage final souhaitable
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Tous types de cavités souterraines, accessibles ou non accessibles • Ouvrages ne présentant pas d'intérêt particulier
Performances	<ul style="list-style-type: none"> • Etreinte maximale de confinement = 0,1 à 0,3 MPa • Augmentation de la portance de 5 à 10 %
Niveaux de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode de traitement partiel rudimentaire pour une mise en sécurité minimale d'un site (espaces verts, zones de loisirs, zones naturelles) • Opérable seulement qu'après vérification du comportement des terrains vis-à-vis des exigences de la méthode (frettage-confinement des piliers et foisonnement des terrains sus-jacents) • Affaissement important possible en surface (centimétrique à métrique)
Exigences de la technique	<ul style="list-style-type: none"> • Risque d'effondrement ou d'affaissement en surface nécessitant des études géotechniques spécifiques faisant appel à des spécialistes (prévision des risques, étude du foisonnement des terrains de recouvrement, etc.)
Pérennité	<ul style="list-style-type: none"> • Pérennité plutôt bonne des produits (inertes) et du traitement à condition qu'aucun évènement extérieur ne vienne perturber le milieu (perturbations hydrologiques, etc.)
Contrôles	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôles faciles à réaliser lorsque les travaux de remblaiement sont effectués depuis le fond
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode simple et peu coûteuse • Solution provisoire avant traitement plus complet
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement insuffisant en cas de risque d'effondrement généralisé • Inopérant sur le phénomène de fontis (sauf étude du foisonnement) • Efficacité difficile à établir pour un non spécialiste
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode peu coûteuse utilisant le plus souvent les stériles miniers sur place • Estimation du coût moyen = 10 à 35 €/m³
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de normes ou de recommandations dans ce domaine

Fiche 3 : REMBLAIEMENT DIRECT DEPUIS LE FOND PAR ENGIN MECANISES

Rôle	<ul style="list-style-type: none"> • Stopper ou réduire les mouvements du sol par remplissage quasi-total des vides • Supprimer tout risque d'effondrement ou de fontis à long terme
Principe	<ul style="list-style-type: none"> • Opérations de comblement mécanisées opérées depuis le fond <ul style="list-style-type: none"> ◆ approvisionnement - transport ◆ manutention ◆ déchargement ◆ compactage
Nature des produits	<ul style="list-style-type: none"> • Produits tout-venant avec un traitement minimal (criblage) <ul style="list-style-type: none"> ◆ matériaux bruts bon marché, déchets, déblais ◆ terres de fouilles ◆ stériles miniers ◆ matériaux plus nobles = sablons ou graves • Interdiction de matériaux argileux, organiques, polluants (déchets industriels)
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Phase préparatoire par purgeage et éventuellement boulonnage • Acheminement par passage d'engins par les galeries d'accès ou déversement depuis la surface (bure, puits, fontis, etc.) • Reprise au bulldozer ou chargeur-mine • Bourrage final, éventuellement compactage • Stratégie = méthode rabattante sur les entrées
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Mines accessibles et en suffisamment bon état • Mines sous fort recouvrement (méthode indépendante de la profondeur) • Vides de grandes dimensions (vides importants) • D'une manière générale, le domaine d'application est limité (accessibilité, conditions d'hygiène et de sécurité)
Performances	<ul style="list-style-type: none"> • Vide résiduel faible (20 à 30 cm), maximum = 50 cm (règle du 1/15ème $H_{\text{recouvrement}}$) • Excellent comblement possible si la granulométrie est suffisamment fine
Niveau de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Faible à moyen (sans clavage final) convient aux zones naturelles • Protection de la population (espaces verts, zones de loisirs...) • Risque de dégâts légers sur le bâti existant (tassements différés possibles en surface)
Exigences de la technique	<ul style="list-style-type: none"> • Technique simple de mise en oeuvre mais exigeante sur les aspects hygiène et sécurité du personnel
Pérennité	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne pérennité des produits (inertes) et d'une manière générale du traitement, toutes choses demeurant égales par ailleurs
Contrôles	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôles du remblaiement faciles depuis le fond (hauteur des vides résiduels, qualité de la mise en place, vérification des remblais par compactage)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode simple, peu onéreuse et fiable (contrôle facile sur mine accessible) • Technique plutôt douce (sans pression, ni eau) • Adaptée à tous types de terrains • Opérable à toutes profondeurs
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Conditions de site favorables (accès suffisants) • Inopérables en mines de petites dimensions (ouverture, largeur) • Difficile pour des géométries complexes • Conditions de travail pénibles et dangereuses
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Sur chantiers importants, les coûts oscillent entre 20 à 50 €/m³ • Pour les ouvrages plus complexes = jusqu'à 50 à 80 €/m³ • Injections de clavage complémentaires = 120 à 180 €/m³ (sur la base 80 % avec 20 % de clavage)
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> • Recommandations pour le traitement des cavités souterraines. Annales de l'ITBTP, 1979

Fiche 4 : REMBLAIEMENT PAR DEVERSEMENT GRAVITAIRE - VOIE SECHE

Rôle	<ul style="list-style-type: none"> • Supprimer tout risque d'effondrement ou de fontis à long terme • Minimiser tout risque de tassement résiduel en surface • Réhabiliter les terrains de surface (zones naturelles)
Principe	<ul style="list-style-type: none"> • Déverser un matériau de remblai sec de façon purement gravitaire depuis la surface à partir de forages en gros diamètre
Nature des produits	<ul style="list-style-type: none"> • Matériaux inertes bon marché bruts : déblais, déchets, terres de fouilles, stériles miniers • Produits indésirables : matériaux argileux, organiques ou polluants (déchets industriels) • Traitement éventuel par lavage
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Déversement gravitaire <u>par voie sèche</u> à partir de forages en gros diamètres (400 à 1 000 mm), granulats d'assez grandes dimensions mais criblés, formant un tas • Maillage de foration adapté à la géométrie des cavités souterraines (en général 15 x 15 m à 25 x 25 m) mais suffisamment dense pour minimiser les vides résiduels (distance entre axes < 2 fois l'ouverture du vide) • Phase de reconnaissance préliminaire des cavités nécessaire • Traitement complémentaire éventuel par injections de clavage (coulis) pour un remplissage maximal des vides et la restitution d'une certaine résistance mécanique du sous-sol
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Remplissage des cavités souterraines, accessibles ou inaccessibles, à partir de la surface • Méthode praticable jusqu'à une profondeur de l'ordre de 30 à 40 m, environ • Traitement des cavités de grandes dimensions (grandes volumes de vides) • Tubage nécessaire en présence de niveaux aquifères ou de terrains sans cohésion, rendant la méthode moins économique • Comblement possible sur un site sans ressources en eau suffisantes
Performances	<ul style="list-style-type: none"> • Vides résiduels souvent importants entre les déversements en tas coniques (ordre de grandeur métrique) • Tassements résiduels possibles mais le plus souvent tolérables en surface, dans les zones naturelles
Niveau de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Minimal mais suffisant en zones naturelles • Réhabilitation des sols destinés à servir d'espaces verts ou de zones de loisirs. • Possibilité d'élever le niveau de sécurité en complétant le traitement d'injections de clavage (constructions nouvelles avec protections passives éventuelles)
Exigences de la technique	<ul style="list-style-type: none"> • Technique relativement simple et peu exigeante sur le plan du matériel et de la compétence du personnel en dehors des études géologiques nécessaires aux opérations de foration (gros diamètre de foration, en général pas de tubage) en conditions difficiles
Pérennité	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne pérennité des produits (inertes) et du traitement considéré de façon globale. Une défaillance dans ce domaine serait imputable à une modification des conditions de site (perturbations d'ordre hydrologique ou autres...)
Contrôles	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle de la qualité des produits à réception • Contrôles du remblaiement relativement difficiles a priori dans la mesure où les remblais forment des tas coniques laissant des vides importants entre les trous de déversement
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode efficace et pérenne • Coût économique intéressant pour les fortes profondeurs (> 30 m) • Mise en œuvre relativement aisée

Fiche 4 : REMBLAIEMENT PAR DEVERSEMENT GRAVITAIRE - VOIE SECHE
(suite)

Limites et inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Profondeur limitée • Foration en gros diamètre • Mauvaise dispersion des remblais • Caractéristiques médiocres des remblais • Tassement des remblais avec le temps (nécessitant souvent une reprise ultérieure du remblaiement)
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Les coûts économiques de ces techniques de remblaiement sont extrêmement variables en fonction de facteurs liés au matériau et aux conditions de foration. <ul style="list-style-type: none"> ♦ chantiers importants à profondeur moyenne = 14 à 22 €/m³ ♦ petits chantiers difficiles = 50 à 85 €/m³ • Traitement complémentaire par injections de clavage = 100 à 180 €/m³.
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> • Recommandations sur le traitement des cavités souterraines, Annales de l'ITBTP, 1979

Fiche 5 : REMBLAIEMENT PAR DEVERSEMENT GRAVITAIRE - VOIE SEMI-HUMIDE

Rôle	<ul style="list-style-type: none"> • Supprimer tout risque d'effondrement ou de fontis à long terme • Stopper ou réduire les mouvements du sol par remplissage quasi-total (ou total) des vides • Réhabiliter les terrains de surface en zones naturelles et zones urbanisées (espaces verts, bâti existant)
Principe	<ul style="list-style-type: none"> • Déverser un matériau de remblai de façon purement gravitaire (ou sous très faible pression) depuis la surface à partir de forages • Faciliter la dispersion des remblais en fluidisant les produits (mélangés à de l'eau)
Nature des produits	<ul style="list-style-type: none"> • Matériaux inertes bon marché bruts : déblais, déchets, terres de fouilles, stériles miniers, éventuellement matériaux plus nobles (sablon, cendres volantes) • Produits indésirables : matériaux argileux, organiques ou polluants (déchets industriels) • Traitement éventuel par lavage
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • déversement par voie semi-humide (environ 500 l/m³) mélange boueux : moitié eau, moitié terres (coupure granulométrique = 200 mm) • Foration en gros diamètre (400 à 800 mm) • Tubage souvent nécessaire (eau) • Maille de foration plus lâche (15 x 15 m à 25 x 25 m) adaptée à la géométrie des cavités (reconnaitances préliminaires)
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Remplissage des cavités souterraines, accessibles ou inaccessibles à partir de la surface • Méthode praticable jusqu'à une profondeur de l'ordre de 30 à 45 m environ • Utilisable en terrains difficiles ou aquifères (tubage nécessaire) • Obligation de disposer sur le site de ressources en eau importantes • Traitement de zones dégradées ou partiellement effondrées, de toutes dimensions
Performances	<ul style="list-style-type: none"> • Vides résiduels faibles (20-30 cm, maximum autorisé = 50 cm) • Meilleure dispersion des produits • Tassements résiduels possibles en surface
Niveau de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Très suffisant dans les zones naturelles pour la sécurité des populations • Réhabilitation des sols destinés à servir d'espaces verts, de zones de loisirs • Mise en sécurité du bâti existant possible sous réserve d'un contrôle sévère du remplissage des vides (clavage final souvent nécessaire) • Possibilité d'élérer le niveau de sécurité en complétant le traitement d'injections de clavage (Protection du bâti existant ou des constructions nouvelles avec adoption éventuelle de mesures complémentaires de protection passive)
Exigences de la technique	<ul style="list-style-type: none"> • Technique relativement simple et peu exigeante sur le plan du matériel et de la compétence du personnel en dehors des études géologiques nécessaires aux opérations de foration
Pérennité	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne pérennité des produits (inertes) et du traitement considéré de façon globale. Une défaillance dans ce domaine serait imputable à une modification des conditions de site (perturbations d'ordre hydrologique ou autres, etc.)
Contrôles	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle de la qualité des produits à réception • Contrôle du remblaiement assez difficile depuis le fond (cavités accessibles) en raison de la dispersion des remblais ou de la présence des barrages d'arrêt. Depuis la surface, le contrôle s'effectue par des sondages de reconnaissance avec diagraphies ou caméra (type IGC ou autre)

Fiche 5 : REMBLAIEMENT PAR DEVERSEMENT GRAVITAIRE - VOIE SEMI-HUMIDE
(suite)

Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode efficace et pérenne • Coût économique intéressant pour les faibles profondeurs (< 30 m) • Mise en œuvre relativement aisée • Relative universalité d'utilisation, adaptabilité des techniques • Remplissage presque total des vides par la bonne dispersion des produits de remblais
Limites et inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Profondeur relativement limitée, fonction de la technique de foration • Présence de grandes quantités d'eau imposant des précautions particulières • Dégradation possible des ouvrages souterrains • Mises en œuvre progressive par phases • Caractéristiques médiocres des remblais • Tassements des remblais très importants et durée très longue de consolidation (plusieurs mois) • Tendance à une certaine imperméabilité des remblais (risque d'effet « barrage » sur la circulation des eaux) • Nécessité des « barrages » de remblais pour éviter une dispersion non contrôlée des produits
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Les coûts économiques de ces techniques de remblaiement sont extrêmement variables en fonction de facteurs liés au matériau et aux conditions de foration • Exemples de coûts de remblaiement par déversement par voie semi-humide : <ul style="list-style-type: none"> ♦ gros chantiers en région parisienne = 15 à 22 €/m³ ♦ chantiers à faible profondeur (Nord) = 12 à 28 €/m³ ♦ chantiers à grande profondeur (> 50 m) = 50 à 110 €/m³ • Traitement complémentaire par injections de clavage : 120 à 180 €/m³
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> • Recommandations sur le traitement des cavités souterraines, Annales de l'ITBTP, 1979

Fiche 6 : REMBLAYAGE HYDRAULIQUE

Rôle	<ul style="list-style-type: none"> • Supprimer tout risque d'effondrement ou de fontis à long terme • Minimiser les risques de tassements résiduels en surface • Réhabiliter les terrains de surface en zones naturelles et zones urbanisées (espaces verts, bâti existant) • Stopper ou réduire les mouvements du sol par remplissage quasi-total (ou total) des vides
Principe	<ul style="list-style-type: none"> • Déverser un matériau de remblai de façon purement gravitaire (ou sous très faible pression) depuis la surface à partir de forages
Nature des produits	<ul style="list-style-type: none"> • Matériaux inertes bon marché bruts : déblais, déchets, terres de fouilles, stériles miniers • Matériaux nobles = sablons, cendres volantes, parfois additionnés de ciment • Produits indésirables : matériaux argileux, organiques ou polluants (déchets industriels) • Traitement éventuel par criblage ou lavage
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Déversement par <u>voie hydraulique</u> (500 l/m³ mélange de produits plus fins et nobles (cendres volantes ou sablons) additionnés éventuellement de ciment (500 kg/ m³) • Foration en petit diamètre (100-250 mm), tubage systématique • Maille de foration souvent serrée (7 x 7 m à 10 x 10 m)
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Remplissage des cavités souterraines, accessibles ou inaccessibles, à partir de la surface • Utilisable à de fortes profondeurs (jusqu'à 80 m) • Traitement des zones très dégradées ou effondrées, de toutes dimensions
Performances	<ul style="list-style-type: none"> • Vides résiduels faibles (10-20 cm) • Dispersion importante des remblais (voie hydraulique) • Tassements résiduels possibles en surface • Avec les mortiers durcissants, on peut obtenir une résistance du remblai de l'ordre de 0,4 à 2 MPa
Niveau de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Excellent pour les zones naturelles (mises en sécurité de la population) • Mise en sécurité du bâti existant (clavage recommandé) • Possibilité d'élever le niveau de sécurité en complétant le traitement d'injections de clavage (protection du bâti existant ou des constructions nouvelles peu importantes avec adoption éventuelle de mesures complémentaire de protection passive)
Exigences de la technique	<ul style="list-style-type: none"> • Pas d'exigences particulières sur la technicité ou la compétence du personnel
Pérennité	<ul style="list-style-type: none"> • Bonne pérennité des produits et du traitement, en dehors de l'occurrence d'un phénomène externe de déstabilisation (modification des conditions hydrologiques, par exemple)
Contrôles	<ul style="list-style-type: none"> • Importance d'un contrôle des produits à réception (produits nobles) • Contrôle du mélange à la mise en place (surtout avec un ajout de ciment) • Contrôle du remblaiement difficile depuis le fond (cavités accessibles) • Contrôle par sondages depuis la surface (avec diagraphies ou caméra)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode efficace et pérenne • Coût économique intéressant pour les fortes profondeurs (> 40 m) • Mise en œuvre relativement aisée • Relative universalité d'utilisation, adaptabilité des techniques • Remplissage presque total des vides (sauf technique par voie sèche) par la bonne pénétration des mélanges hydrauliques

Fiche 6 : REMBLAYAGE HYDRAULIQUE

(suite)

<i>Inconvénients</i>	<ul style="list-style-type: none">• Présence de grandes quantités d'eau• Mise en œuvre progressive par phases (essorage des remblais)• Caractéristiques médiocres des remblais (sans addition de liant hydraulique)• Dégradation possible des ouvrages souterrains (remblayage hydraulique)• Tassements des remblais très importants, et durée très longue de consolidation (plusieurs mois)• Utilisation locale possible derrière des « barrages » de remblais
<i>Aspects économiques</i>	<ul style="list-style-type: none">• Les coûts économiques de ces techniques de remblaiement sont extrêmement variables en fonction de facteurs liés au matériau et aux conditions de foration• Remblayage hydraulique (sans clavage) = 25 à 70 €/m³• Injections complémentaires de clavage = 120 à 180 €/m³
<i>Références Recommandations</i>	<ul style="list-style-type: none">• Pas de recommandations spécifiques• Recommandations générales sur le traitement des cavités souterraines, Annales de l'ITBTP, 1979

Fiche 7 : REMPLISSAGE ET TRAITEMENT PAR INJECTIONS

Rôle	<ul style="list-style-type: none"> • Comblent totalement les vides • Consolident définitivement les terrains du sous-sol par restitution de la résistance au moyen de produits d'injection durcissant dans le temps • Opérer un clavage final dans le cas d'un comblement gravitaire • Traiter des terrains décomprimés ou sans cohésion, traiter d'anciens remblais • Réhabilitation des terrains de surface pour sauvegarder le bâti existant ou édifier des constructions nouvelles même de grandes dimensions
Principe	<ul style="list-style-type: none"> • Remplir des cavités ou vides par pompage, c'est-à-dire injection gravitaire • Faire pénétrer un produit durcissant fluide dans un milieu vacuaire ou décomprimé par injection sous pression • Les produits à granulométrie aussi fine que possible, fluides et très pénétrants, finissent par durcir avec le temps
Nature des produits	<ul style="list-style-type: none"> • Coulis à base de ciment, instables ou actifs constitués uniquement à partir de matériaux nobles (ciment, cendres volantes, sablon, etc.) • Coulis stables ciment-argile (bentonite) • Coulis avec charge (= mortiers), sable, filer calcaire ou cendres volantes • Coulis spéciaux : <ul style="list-style-type: none"> ◆ coulis à rigidification rapide contrôlée (solicatés) ◆ coulis cellulaires type coulis « expansifs » ou coulis « mousse »
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement préparatoire des coulis en centrale d'injection • Délimitation des volumes à combler par des barrages d'arrêt ou des traitements d'injection spécifique à rigidification rapide (solicatés) • Foration en petit diamètre (80-160 mm) et tubage lisse ou crépiné (vides) • Maille serrée (de 15 x 15 m en gravitaire, à 3 x 3 m pour l'injection en terrains décomprimés). On distinguera : <ul style="list-style-type: none"> ◆ l'injection des grands vides inaccessibles avec remplissage primaire et clavage sous faible pression (0,1 à 0,3 MPa) ◆ l'injection des terrains décomprimés sous plus forte pression (0,3-1 MPa) ◆ le traitement des remblais par injections solides (jusqu'à 4 MPa) • Principe de maillage (chiffres purement indicatifs) : <ul style="list-style-type: none"> ◆ espaces verts = 10 x 10 m ◆ voies publiques = 7 x 7 m à 8 x 8 m ◆ bâtiments = 5 x 3 m ◆ terrains vacuaires = 3 x 3 m
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Terrains totalement inaccessibles • Terrains effondrés ou décomprimés, remblais de mauvaise qualité • Conditions de site défavorables (profondeur importante > 50 m), terrains bouleversés non identifiables, etc. • Technique adaptée à la réhabilitation des sols destinés à la protection du bâti ou à la construction (zones urbanisées et urbanisables)
Performances	<ul style="list-style-type: none"> • Comblement total des vides avec clavage et traitement des zones effondrées, décomprimées, etc. • Consolidation efficace du sous-sol, exemples de résistances moyennes (28 jours) : <ul style="list-style-type: none"> ◆ mortiers de remplissage = 1 à 2 MPa (espaces verts, voies publiques, bâti existant) ◆ coulis de clavage = 2 à 3 MPa (bâti existant, constructions légères nouvelles) ◆ coulis pour terrains décomprimés = 3 MPa (constructions nouvelles importantes)

Fiche 7 : REMPLISSAGE ET TRAITEMENT PAR INJECTIONS

(suite)

Niveau de sécurité	<ul style="list-style-type: none">• Maximal, il s'agit d'un traitement définitif et complet des vides avec consolidation• Tassements résiduels en surface considérés comme négligeables• Protection active du bâti existant et des constructions nouvelles• Complément éventuel de traitement des structures en surface par techniques de protection passive
Pérennité	<ul style="list-style-type: none">• Pérennité suffisamment bonne du traitement, toutefois les produits cimentés peuvent présenter à terme des problèmes d'altération en présence d'agents agressifs (eaux séléniteuses en particulier)
Contrôles	<ul style="list-style-type: none">• Technique imposant des contrôles délicats à tous les niveaux :<ul style="list-style-type: none">◆ réception et préparation des mortiers et coulis◆ contrôles à la mise en place (centrale d'injection)◆ contrôles des produits après remblaiement (contrôle qualité)• Importance des campagnes de reconnaissance préliminaire et après injection (sondages avec diagraphies, essais pressiométriques, essais de perméabilité)
Avantages	<ul style="list-style-type: none">• Méthodes très efficaces et sûres réduisant pratiquement totalement tout risque de dégâts mineurs• Traitement assurant une pérennité suffisante• Opérabilité sur tous types de site, même difficiles (profondeur, aquifère, etc.)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none">• Techniques complexes, longues et coûteuses (foration, paramètres de la centrale...)• Exigence d'un personnel compétent• Nécessité de reconnaissances préliminaires développées et de contrôles rigoureux pendant et après la mise en place• Possibilité de risque de dégâts sur des ouvrages ou structures voisins par fuite des coulis, hautement pénétrants, ou par trop forte pression d'injection• Risque de perturbation du régime hydrologique du site par effet « barrage »• Risques de pollutions du milieu par les produits• Pérennité des produits non garantie à long terme (les propriétés de résistance du milieu sont un impératif de la méthode et ne doivent pas être perturbées par des agents externes agressifs)
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none">• Les coûts dépendent essentiellement de la qualité des mortiers et coulis choisis, ainsi que des paramètres de foration (profondeur, type de tubage, maille, etc.), imposés par les configurations de site• Coûts indicatifs au mètre cube :<ul style="list-style-type: none">◆ injections gravitaires = 60 à 120 €/m³ (sans clavage)◆ injections de clavage = 120 à 180 €/m³◆ injections coulis sous pression = 130 à 180 €/m³◆ injections de coulis avec clavage = 180 à 275 €/m³
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none">• Recommandations sur le traitement des cavités souterraines, Annales de l'ITBTP, 1979• Recommandations AFTES sur les travaux d'injection pour les travaux souterrains GT n°8, 1975, 1987

Fiche 8 : REMPLISSAGE PAR MOUSSES THERMODURCISSABLES

Rôle	<ul style="list-style-type: none"> • Supprimer rapidement les risques d'effondrement ou de fontis (court terme ou péril imminent) • Empêcher les évolutions des dégradations des piliers ou du toit • Intervention en milieu dégradé ou conditions difficiles (méthode « douce »)
Principe	<ul style="list-style-type: none"> • Remplir les cavités ou vides en y faisant pénétrer un produit fluide durcissant et expansif par injection sous pression
Nature des produits	<ul style="list-style-type: none"> • Mousses formées à base de résine (urée-formol ou formophénolique) et de produits chimiques (durcisseur, catalyseur, agent gonflant,...)
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Préparation de la mousse sur le site à partir du mélange des produits stockés dans des bidons ou conteneurs ; les mousses à base d'urée-formol nécessite l'aide d'air comprimée • Traitement des cavités par le fond grâce à des flexibles et pistolets, possibilité d'opérer à partir de la surface par forages • Délimitation parfois nécessaire du volume à combler par des barrages légers
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Cavités à traiter en urgence et dans un délai très court • REMPLISSAGE des cavités souterraines, accessibles ou inaccessibles • Traitement des zones très dégradées ou effondrées ou de géométrie complexe • Comblement possible en un site urbanisé sur un emplacement limité
Performances	<ul style="list-style-type: none"> • Résistance mécanique variant entre 100 kPa à 500 kPa suivant le type de mousse • Augmentation de volume avec un facteur 50 pour certain type de mousse • Assure un rôle de confinement sur les parois plutôt que de reconstitution du milieu
Niveau de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Satisfaisant à court terme, demande un suivi dans le temps • Réhabilitation des sols destinés à servir d'espaces verts, de zones de loisirs • Mise en sécurité immédiate du bâti existant dans l'attente d'un traitement pérenne
Exigences de la technique	<ul style="list-style-type: none"> • Technique exigeante sur la qualité des produits
Pérennité	<ul style="list-style-type: none"> • Pérennité exacte non connue (recul d'une dizaine d'années) • Se dégrade rapidement à la lumière
Contrôles	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle périodique des opérations à la mise en place • Contrôle s'effectuant par des sondages de reconnaissance depuis la surface
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode rapide et simple disponible là où les autres traitements sont difficiles • Evite le phénomène de fuite • Moussage instantané et fort pouvoir d'expansion • Technique adaptée à tous les types de terrains • Unité d'injection mobile à emprise réduite

**Fiche 8 : REMPLISSAGE PAR MOUSSES THERMODURCISSABLES
(suite)**

Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Faible résistance mécanique (maximum 500kPa) • Tassement de la mousse avec le temps (exige une surveillance) • Sensibilité aux UV et peu de résistance aux intempéries • Acidité résiduelle dans les sols et la nappe avec l'utilisation de mousse formophénolique (augmentation du PH) • Toxicité par inhalation lors de la mise en œuvre (protection du personnel) • Mousses à base de phénol-formol et à base d'urée-formol non utilisables en milieu aqueux • Etanchéité parfaite des mousses polyuréthanes, une fois rigidifiées, pouvant perturber localement la circulation des eaux • Possible combustion des matériaux en place due à la réaction exothermique lors de la mise en œuvre des mousses polyuréthanes • Mousses formophénoliques utilisables dans les zones à risques d'échauffement (classement au feu M1), appropriées pour la lutte contre le feu
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement onéreux et réservé aux sites difficiles • Coût final moyen de l'ordre de 100 à 150 €/m³
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> • Pas de recommandations spécifiques • Références françaises (les mines du bassin houiller de Lorraine), et internationales (Allemagne, Pologne, Russie, République Tchèque...)

**Fiche 9 : ACCÉLÉRATION DU PHÉNOMÈNE DE FONTIS
(TERRASSEMENT – COMBLEMENT)**

Rôle	<ul style="list-style-type: none"> • Forcer l'apparition du fontis • Comblement direct des cavités par voie mécanisée à l'aide de matériaux abattus et terrassés issus du recouvrement • Compacter ou consolider par chocs superficiels répétés des terrains foudroyés
Principe	<ul style="list-style-type: none"> • Supprimer les vides représentés par les cavités par abattage mécanique (compactage, vibrations, pilonnage intensif) ou par décaissement des terrains de recouvrement en utilisant ces derniers comme matériaux de remblai
Nature des produits	<ul style="list-style-type: none"> • Matériaux issus des terrains de recouvrement, éventuellement apports complémentaires de matériaux inertes, déblais, terres de fouilles, etc... • Pas de traitement particulier sinon un criblage ou tri visant à éliminer les produits indésirables (argiles, résidus organiques, etc.)
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Travaux de terrassement, de décaissement, d'abattage et de comblement entièrement mécanisés • La technique repose sur un phasage précis des opérations défini par la stratégie d'exploitation • Prise en compte des impératifs de sécurité liés à la réalisation de travaux à l'aplomb de vides souterrains • Lorsque l'abattage des ouvrages souterrains et des terrains sus-jacents est effectué par tirs de mines à l'explosif, la méthode sera plutôt désignée de foudroyage
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Technique réservée au comblement des vides par abattage mécanisé sous faible hauteur de recouvrement ($H < 15 - 20$ m) • Comblement par simple remplissage des vides sans exigence de restitution des propriétés mécaniques du sol (traitement ultérieur possible par injections) • Utilisable en tous types de sites (accessibles ou non, en bon état ou effondrés, etc), sauf en zones urbanisées (destruction de la couverture)
Performances	<ul style="list-style-type: none"> • Vides résiduels en principe totalement éliminés par l'abattage des terrains de couverture • Diminution des vides résiduels dans les terrains de comblement décomprimés (porosité) par terrassement suivi d'un compactage dynamique • Traitement complémentaire des sols possible ultérieurement par injections de coulis
Niveau de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Réhabilitations des terrains destinés comme espaces verts, zones de loisirs. Tassements différés possibles en surface (comblement simple) • Utilisation des terrains pour des projets d'urbanisation à condition d'effectuer des traitements de consolidation (injections) ou de prendre des mesures de protection passive
Exigences de la technique	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode n'exigeant pas de compétences particulières en dehors de celles du secteur du Bâtiment - Travaux Publics • Exigence toutefois en matière de stratégie d'exploitation et de sécurité du personnel
Pérennité	<ul style="list-style-type: none"> • Technique fiable assurant un comportement suffisant stable à long terme des remblais, toutes choses égales par ailleurs
Contrôles	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôle visuel aisé du résultat du remplissage pendant les opérations • Contrôle a posteriori de la porosité des terrains de comblement (après compactage) par sondages accompagnés de diagraphies, essais pressiométriques ou de perméabilité (type Lugeon), etc.

Fiche 9 : TERRASSEMENT - COMBLEMENT

(suite)

Avantages	<ul style="list-style-type: none">• Mécanisation totale, simplicité de la mise en oeuvre, rapidité• Pas de problème d'approvisionnement (sauf insuffisance de matériaux sur place)• Pas de nuisances liées au transfert de matériaux• Fiabilité du traitement (vides résiduels négligeables) résultant de « l'aspect continu » des opérations mécanisées par opposition à l'aspect « discontinu » ou « ponctuel » d'un traitement par foration
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none">• Domaine d'utilisation assez limité (zones naturelles, faible hauteur de recouvrement)• Exigence de prise en compte de la sécurité (travaux à l'aplomb de cavités)• Nuisances possibles sur l'environnement mais limitées (bruits, poussières, vibrations...)• Traitement de la zone périphérique• Tassements différés possibles à long terme (hors traitement complémentaire)
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none">• Méthode très avantageuse sous le plan économique mais placée dans un domaine d'utilisation (profondeur) où les autres méthodes de comblement par déversement sont, elles aussi, peu onéreuses• Coût indicatif moyen de l'ordre de 8 à 30 €/m³• Possibilité de stocker des déchets extérieurs
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none">• Pas de procédure normalisée ou de recommandations méthodologiques

Fiche 10 : RENFORCEMENT DU SOL PAR INCLUSIONS RIGIDES

Rôle	<ul style="list-style-type: none"> • Supprimer le risque d’effondrement ou de fontis à long terme • Réhabilitation des terrains de surface en zones naturelles et zone urbanisable (constructions nouvelles)
Principe	<ul style="list-style-type: none"> • Renforcer le terrain par la mise en place d’éléments rigides inclinés recouverts d’un matelas de répartition • Constituer un équivalent de banc raide en rigidifiant les horizons de subsurface • Reprendre les efforts d’extension en provenance de cavités souterraines
Nature des produits	<ul style="list-style-type: none"> • Inclusions rigides (pieux, profilés...) • Matelas de répartition (nappes géosynthétiques, matériaux granulaires...)
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Depuis la surface : <ul style="list-style-type: none"> ◆ excavation du sol ◆ fonçage des éléments rigides ◆ mise en place du matelas de répartition
Domaines d’utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Tous types de cavités souterraines peu profondes, accessibles ou non accessibles
Performances	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction de 45% de l’amplitude de l’effondrement attendu pour les géométries testées • Réduction des déplacements horizontaux
Niveaux de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Suffisant dans les zones naturelles pour la sécurité des personnes • Pour une future construction, à compléter avec une disposition constructive capable de tolérer une forte mise en pente (chaînage...) • Affaissement important possible en surface (centimétrique à métrique)
Exigences de la technique	<ul style="list-style-type: none"> • Risque d’effondrement ou d’affaissement en surface nécessitant des études géotechniques spécifiques faisant appel à des spécialistes (prévision des risques, étude du foisonnement des terrains de recouvrement, etc.)
Pérennité	<ul style="list-style-type: none"> • Pérennité non connue
Contrôles	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôles ?
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Réduction des facteurs déterminants de l’affaissement • Traitement assurant une protection suffisante pour les personnes
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Fortes valeurs en affaissement maximal et en mise en pente • Efficacité non prouvée sur des cas concrets (uniquement modélisations numériques)
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Estimation du coût moyen = 30 k€ pour une maison de 250k€ • Surcoût acceptable uniquement dans zones de forte pression immobilière
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> • Recommandations en cours de rédaction pour les inclusions rigides verticales • Pas de normes ou de recommandations les inclusions rigides inclinées

Fiche 11 : MÉTHODES PARACHUTES

Rôle	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire les déformations en surface susceptible de mettre en péril des ouvrages en zone de fontis (routes, éventuellement bâtiments) • Renforcer le sous-sol • Garantir la stabilité de l'ouvrage protégé, même après formation du fontis • Possibilité d'alerter dès l'apparition des premiers mouvements de terrain (géogrille pré-instrumentée : GEODETECT)
Principe	<ul style="list-style-type: none"> • Un ou plusieurs géotextiles supportant les éléments le(s) surplombant en s'appuyant sur l'effet d'arche
Techniques	<ul style="list-style-type: none"> • Pose d'un treillis galvanisé à larges mailles servant de filet pour retenir les personnes • Géotextile(s) disposé(s) et ancré(s) sous la structure à protéger • Géotextile prétendu pour anticiper un allongement de 1% de la géogrille
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none"> • Vides soupçonnés ou identifiés sous chaussées, réseaux ou voies ferrées • Dimensions limitées des désordres attendus (fontis d'ordre métrique)
Performances	<ul style="list-style-type: none"> • Routes principales : déformation admissible inférieure à 1% • Petites routes : déformation admissible inférieure à 2%
Niveaux de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en sécurité des personnes mais pas du bâti • Affaissement possible en surface (centimétrique à métrique)
Exigences de la technique	<ul style="list-style-type: none"> • Connaître grossièrement la position de la cavité • Recouvrir la géomembrane par des terres ou des remblais et procéder à des travaux de terrassement et de réaménagement du site
Pérennité	<ul style="list-style-type: none"> • Durée de vie dépendante du vieillissement du géotextile (environ 120 ans) • Nécessité de travaux supplémentaires pour éliminer complètement le risque
Contrôles	<ul style="list-style-type: none"> • Contrôles ?
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Mise en œuvre facile • Abaques de dimensionnement et de choix du géotextile • Technique relativement peu onéreuse • Possibilité d'assurer une surveillance des déformations par fibres optiques (géogrille pré-instrumentée de type GEODETECT)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Technique uniquement adaptée pour traiter le fontis après son apparition • Ne pas dépasser 1,5 m de remblai au-dessus du géotextile • Utilisation d'une méthode simplifiée de dimensionnement du renforcement par géomembrane (grille et/ou textile), adaptée aux routes, qui ne tient pas compte de l'effet d'arche • Technique en cours de validation (projet RAFAEL)
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> • Estimation du coût moyen = 5 €/m² • Prix variant en fonction de l'importance du chantier
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> • Méthode simplifiée de dimensionnement du renforcement par géomembrane (grille et/ou textile) adaptée aux routes • Pas de normes ou de recommandations dans ce domaine

ANNEXE 4

PRINCIPALES TECHNIQUES ET MESURES DE PRÉVENTION ET DE PROTECTION DU BÂTI

Tableau 1 : Mesures d'échappement aux efforts induits par les mouvements du sous-sol (affaissement ou fontis)

Technique	Objectifs	Utilisation et/ou recommandation
Forme et choix de la fondation de l'ouvrage	Rigidité et résistance en traction, souplesse en flexion	Constructions neuve et ancienne
Limiter la hauteur des ouvrages	Eviter les risques de basculement	Construction neuve : -2 étages maximum - hauteur / largeur < 1,5
Respecter une distance minimale entre deux structures proches	Eviter les risques d'entrechoquement	2 m minimum entre 2 ouvrages, mais cette seule solution n'est pas suffisante
Conception des ouvrages pour que la petite longueur soit dans la direction de la pente	Minimiser les distances sur lesquelles agissent les sollicitations	Tout type d'ouvrage
Réaliser les fondations sur le sol (faible partie enterrée)	Annuler la poussée des terrains sur les parties enterrées	Cette solution est utile pour les constructions neuves Profondeur des fondations < 3 m
Concevoir des structures isostatiques	Sur trois points pour minimiser les sollicitations dans l'ouvrage, et qu'il ne trouve pas en porte-à-faux	Celle solution reste, pour l'instant, théorique mais elle peut être développée pour des ouvrages importants
Joint de glissement entre dallage et fondation	Minimiser les déformations transmissibles à la superstructure	Réalisation rare et reste difficile à réaliser, mais qui pourrait être améliorée
Joint de glissement entre fondation et sol	Minimiser les déformations transmissibles aux fondations	Idem à la solution précédente
Tranchées autour de l'ouvrage	Absorber les déformations du sol	Très efficace, réalisable pour toutes sortes d'ouvrage. S'adapte pour les structures anciennes et récentes
Joints verticaux d'affaissements	Diviser la structure en petits éléments moins vulnérables Autoriser des déplacements horizontaux, des rotations (3 axes) Minimiser le frottement	Solution de plus en plus pratiquée surtout pour des constructions neuves Réalizable sur des ouvrages anciens
Joints horizontaux entre la superstructure et le soubassement en parpaings	Diminuer les efforts transmis sur la partie supérieure de la structure	Solution peu utilisée
Utilisation de géotextiles	Éviter les déformations et les dommages des structures grâce à la capacité des géotextiles	Utilisation sous des talus ou des ouvrages d'infrastructure neufs dans des zones de fontis
Réaliser un terrassement et mettre une couche de sable, plus éventuellement une feuille de polyéthylène sous les fondations	Minimiser les déformations transmissibles aux fondations	Elle pourrait être recommandée, mais peu de mesures pour vérifier son efficacité. L'épaisseur de sable proposée est de 25 cm ou 15 cm, plus une feuille de polyéthylène

Tableau 2 : Mesures de résistance aux efforts

Technique	Objectifs	Utilisation et recommandation
Semelles en béton armé ou pré-fabriquées	Améliorer la résistance de la fondation vis-à-vis des déformations induites et le tassement différentiel	Cette solution est surtout recommandée pour des structures peu importantes pour lesquelles l'usage est l'utilisation de fondations simples
Fondation rigide et superstructure souple	Obtenir des structures avec une grande résistance vis-à-vis des mouvements du sous-sol grâce aux fondations avec chaînage et des structures souples avec des joints	Solution de plus en plus pratiquée. Il reste que la rigidité de la structure est difficile à évaluer
Chaînage minimum	L'objectif est de rendre solidaire les différentes parties de la structure Le chaînage est réalisé avec un minimum de ferrailage	Il est très utile pour les zones d'affaissement et de fontis de petits diamètres. Il est exigé pour les structures neuves (pavillons) et même réalisé après relevage pour les structures anciennes
Radier cellulaire rigide en flexion et torsion	Son rôle est identique au chaînage. Le radier pourrait être plus efficace que le chaînage	Il est souvent recommandé dans des zones d'affaissement ou de fontis
Structures en béton fortement armé	Cette solution s'inspire des recommandations parasismiques pour augmenter la ductilité (1,2% d'armatures aux jonctions)	Utilisation dans des bâtiments d'une certaine importance. Il n'y a jamais eu de retours d'expérience
Surdimensionnement des poteaux ou surdimensionnement des voiles en béton armé	Se prémunir de tout risque de flambement ($F_{service} < 0,2 \cdot S_{poteau} \cdot F_{c28}$)(1)	L'efficacité de cette solution n'a jamais été vérifiée
Fondations ajustables	Eviter le risque de tassement différentiel et d'inclinaison	Ouvrages d'une certaine importance
Injection des vides ou remblayage	Éviter le développement d'affaissement ou de fontis	Radical mais très coûteux Essentiellement adaptée aux risques de fontis à l'aplomb de travaux à faible profondeur
Construction des piliers au fond	Éviter le développement d'affaissement ou de fontis	L'accès par le fond est nécessaire, dimensionner pour supporter la totalité de la charge des ouvrages

(1) Spoteau : section du poteau

F_{C28} : résistance à la compression du béton à 28 jours

Tableau 3 : Mesures de réparation

Technique	Objectifs	Utilisation et recommandation
Structure sur vérins	Renforcer la structure pendant la phase dynamique de l'affaissement Réparer la structure après les dommages (fontis, affaissement)	Elle est justifiée pour des structures d'une certaine importance
Injection des vides et des fissures de la structure	Éviter la dégradation de l'état de la structure	Technique très utile pour les zones de fontis. La mise en place de l'injection doit être très rapide
Soutènement à l'aide de poutres, de câbles ou de tirants	Eviter le basculement des murs	Solution provisoire. Le dimensionnement des câbles est obligatoire
Installation à l'intérieur d'un réseau de poutres et poteaux	Eviter l'effondrement des planchers désolidarisés et la ruine de l'édifice	

ANNEXE 5
EXEMPLES DE TRAITEMENT DE L'ALÉA FONTIS

1. GESTION DES RISQUES FONTIS SUR LE BASSIN FERRIFÈRE LORRAIN

1.1 CONTRÔLE DES ZONES À RISQUE DE FONTIS

L'exploitation des mines de fer de Lorraine a laissé subsister des secteurs d'exploitation partielle dont la stabilité n'est pas assurée, couvrant une superficie proche d'une centaine d'hectares et notamment sous des zones bâties ou d'infrastructures. La suppression du risque par comblement nécessiterait la mise en œuvre de plus de 100 000 000 m³ de remblai et coûterait de l'ordre de 4 000 000 k€. De plus, les conditions de certaines zones sont telles que la réalisation technique du traitement est difficilement envisageable de manière opérationnelle. Il faut donc admettre qu'il subsistera des risques résiduels impossibles à résoudre techniquement ou dont la résolution demanderait des moyens rédhibitoires. La modification du code minier de mars 1999 reconnaît cette situation et prévoit dans ce cas, le choix et la mise en place de dispositifs de surveillance adaptés au risque, leur suivi et leur entretien.

Depuis 1998, la surveillance sur le bassin ferrifère lorrain est mise en place au fur et à mesure des résultats des études d'aléas sur les zones à risque (en particulier de fontis) sous bâti en priorité [2].

Ces zones à risque sont d'abord identifiées puis cartographiées avant d'être reconnues et inspectées visuellement pour préciser le risque dans les zones accessibles.

En 2006, une méthodologie de qualification de l'aléa fontis a été amorcée par GEODERIS dans le bassin ferrifère lorrain. Elle consiste à définir, selon des critères d'intensité et de prédisposition définis par la première inspection des vides, un niveau de l'aléa fontis :

- moyen ou faible : aucun risque pour la sécurité publique ne sera considéré et la constructibilité reste possible pour les bâtis existants. Toutefois, aucune construction nouvelle ne pourra être entreprise dans ces secteurs ;
- fort : il y a un risque pour la sécurité publique, il est nécessaire de mettre en place une surveillance. Si la surveillance n'est pas envisageable, l'article 95 du code minier impose le comblement ou l'expropriation (cf. §1.2).

Les zones à risque de fontis de niveau fort ne peuvent être surveillées de manière efficace avec les techniques utilisées pour les zones d'affaissement ou d'effondrement telles que le nivellement, la micro sismique, l'inclinométrie. C'est pourquoi, dans le dernier cas (aléa fort), une surveillance visuelle régulière de travaux miniers est réalisée pour contrôler l'état des ouvrages miniers et leur évolution dans le temps. Cette surveillance se fait par inspections visuelles des travaux selon un itinéraire défini, avec photographies des zones fragiles et/ou évolutives. Dans les zones les plus à risque, le profil de la galerie est relevé régulièrement par rapport à des repères au toit et au mur de la mine. Les blocs au sol sont marqués.

Toujours dans les zones accessibles, des tests sont en cours pour réaliser un profil 3D des travaux à l'aide d'un balayage laser [3]. Cette méthode complexe nécessite un séjour long en souterrain et des compétences techniques mais

permettra de conserver une image dimensionnelle des vides souterrains et de suivre de manière plus précise l'évolution des zones à risque.

Certaines zones à risque de fontis ne sont pas accessibles depuis le fond. La reconnaissance et la surveillance peuvent alors être réalisées depuis la surface par des techniques telles que laser, sonar, caméra de surveillance (cas de la galerie de Thil). La vidéo surveillance est très consommatrice en moyens humains mais elle s'avère, dans certains cas, la mieux adaptée ou la seule qui puisse être mise en place.

Cette surveillance ne devrait être interrompue qu'à la mise en sécurité pérenne de la surface surplombant ces cavités (par comblement par exemple).

1.2 TRAITEMENT PAR COMPLEMENT OU EXPROPRIATION

Cette alternative applicable à un risque minier menaçant gravement la sécurité des personnes concerne notamment les zones bâties à risque de fontis avéré (aléa fort) [2]. L'article 95 du code minier impose alors de vérifier la faisabilité du traitement envisagé (confortement ou comblement de la zone à risque) puis de comparer son coût à la valeur du bâti à sauvegarder. Selon les conclusions des études réalisées et validées par le Conseil Scientifique, le Préfet est conduit à engager soit des travaux de sauvegarde, soit une procédure d'expropriation des biens menacés.

A Fontoy, rue de Longwy, l'expropriation a été décidée par le Préfet en janvier 2004. Il est en effet apparu que les coûts du comblement étaient largement supérieurs à la valeur des habitations.

Des travaux de confortement ont ainsi été menés par l'Etat à Moyeuve-Grande (comblement d'une partie des zones à risque de fontis de la cité Curel), à Thil (comblement d'une cavité sous la cité Stock). L'ensemble de ces travaux s'est élevé à plus de 20 M€.

1.2.1 COMPLEMENT SOUS LA CITÉ DU STOCK À THIL (54)

En juin 2002, dans le cadre de travaux de reconnaissance pour la détermination des zones à risque de fontis, GEODERIS a découvert, sous la cité du Stock à Thil (54), un secteur dont d'exploitation était donnée comme foudroyée, mais qui comportait en réalité des vides résiduels à près de 60 m de profondeur. Un dispositif de surveillance par caméras des travaux miniers avait alors été mis en place dans les plus brefs délais. Les images étaient transmises au bureau de GEODERIS à Metz par liaison téléphonique où 7 jours sur 7 l'image du jour était comparée à celle de la veille. Le comblement de ce vide à l'aide d'un coulis à base de cendres volantes a été décidé par le Préfet en 2003. Les travaux ont démarré en août 2004 jusqu'en février 2005. La surveillance par caméra a pris fin avec le comblement total de la cavité.

L'étude de faisabilité technico-économique pour la mise en sécurité du site a dégagé les critères à satisfaire [7] :

- critère mécanique : le produit de remblayage doit avoir une résistance à la compression supérieure à 2,5 MPa et ne pas s'altérer avec le temps ;

- critère environnemental : la contamination des eaux d'infiltration percolant à travers la zone remblayée doit être la plus faible possible afin de ne pas polluer le captage à proximité ;
- la méthode de traitement doit être mise en place dans un environnement urbain, sans déplacement des populations ni interruption de la surveillance.

- Techniques mises en œuvre

Des sondages ont permis le passage de plusieurs sondes pour contrôler la géométrie des cavités (tirs laser couplés à des images vidéo) et pour caler précisément les cavités par rapport aux éléments de surface (bâti et infrastructure).

Il a été choisi un comblement par la surface par injection de coulis à base de cendres volantes et ciment [7] avec (pour 1 m³ de coulis) :

- 171 kg de ciment ;
- 727 kg de cendres volantes ;
- 619 l d'eau.

Une première composition testée en laboratoire n'a pas été concluante sur le terrain en terme de résistance mécanique (Rc). Les formulations ont dû être revues à la lumière des conditions de site (teneur en eau des cendres stockées, humidité au sein des travaux miniers...). Une façon de valider le dosage du coulis a été de visualiser dans les travaux miniers (par caméra ou directement dans une zone accessible de la cavité) l'aspect du coulis, et particulièrement sa fluidité, lors de son dépôt dans les vides souterrains.

Afin d'éviter les pertes de coulis, les bordures de la cavité principale ont été encagées par des barrages de coulis rigidifiés à l'exception d'un côté, laissé ouvert, à titre expérimental, en début de remplissage, afin de déterminer la distance de diffusion du coulis dans les défilés.

Les coulis rigidifiés de barrage sont dosés à :

- 300 kg de ciment ;
- 700 kg de cendres volantes ;
- 10% de silicate
- et de l'eau.

Les barrages les plus larges ont nécessité plusieurs sondages d'injection, espacés de 2 m. Les barrages ont été montés en même temps que le coulis de comblement. La montée du coulis de comblement et des barrages a été contrôlée par caméra vidéo et par sondes ultrasoniques disposées dans les sondages.

Environ 15 000 m³ d'un coulis ciment/cendres volantes ont été injectés. Le coût de l'opération s'élève à environ 2 700 000 € soit 180 €/m³ injecté.

Le suivi du chantier sur site comprenait notamment : le contrôle de la qualité des matériaux (cendres en particulier), le contrôle de la livraison, le contrôle du coulis (densité, fluidité, teneur en eau...), l'inspection vidéo pour suivre l'état de la cavité et la montée du coulis, des forages de contrôle après le comblement.

L'étude sur le comportement mécanique du coulis se poursuit avec des essais de résistance à la compression simple sur des échantillons prélevés un an après la mise en place du remblayage. La répartition du coulis dans les défilés sera

étudiée à l'aide d'un sondage carotté horizontal, réalisés en souterrain, à partir de l'entrée de la cavité.

- Impact sur l'environnement

Cette opération de comblement a été réalisée en amont du réservoir minier ennoyé de Godbrange, exploité pour l'alimentation en eau potable de Longwy. Une étude hydrogéologique préalable a permis de déterminer le mélange ciment et cendres volantes le moins polluant et d'étudier l'impact potentiel de l'opération sur la ressource en eau souterraine [4]. Selon les résultats de la modélisation, le captage AEP d'Hussigny-Godbrange ne serait pas touché par une éventuelle contamination provenant du lessivage des cendres volantes de la zone remblayée (les concentrations calculées y sont de l'ordre d'un millier à un million de fois plus faibles que les concentrations limites pour un usage en eau potable).

Suite au remblayage, un suivi de la composition chimique des écoulements d'eau autour de la zone remblayée a été mise en place. Des prélèvements d'eau pour analyse chimique ont été réalisés régulièrement. Les résultats montrent qu'autour du remblayage, seuls les éléments majeurs habituels sont présents (Na, K, Ca, Mg, HCO₃, SO₄) et que les autres éléments comme les métaux, les métaux lourds ou l'arsenic sont en dessous ses seuils de détection. Ce résultat confirme la conclusion des résultats expérimentaux et de la modélisation réalisée en préalable au remblayage.

Des tests de lixiviations en colonne sur le matériau extrait, selon le procédé utilisé pour les tests préliminaires, étaient prévus en 2006 [1].

1.2.2 REMBLAYAGE DU QUARTIER CUREL À MOYEUVE-GRANDE (57)

Suite aux apparitions de fontis qui ont affecté le quartier Curel à Moyeuve-Grande en novembre 1998, une évacuation de 65 familles a été décidée, aucun traitement ne permettant de supprimer de façon pérenne le risque minier sous la zone concernée.

Le comblement de la zone voisine comportant également des habitations a permis de supprimer le risque de fontis. Situés à moins de 15 m de profondeur et sous le niveau de la nappe, les travaux miniers, au schéma très irrégulier, étaient constitués de galeries, légèrement pentées, de 2 à 6,5 m de largeur pour 2,2 m de hauteur. Le comblement a été réalisé à partir de la surface par des forages d'injection tous les 4 m. Compte tenu de la présence d'habitations sur le site, il a été nécessaire par endroit d'effectuer des sondages inclinés.

Pour des raisons économiques et géographiques, le laitier de haut fourneau cristallisé concassé, d'origine artificielle, a été retenu comme matériau de comblement. Il a été mis en place de manière hydraulique et complété par des injections de clavage à base de matériaux additionnés d'un liant hydraulique et de bentonite. Les barrages, permettant de confiner de manière pérenne la zone à combler, ont été réalisés de 2 manières différentes : chaussette géotextile remplie de coulis et glissée dans des forages depuis la surface ou déversement de sable depuis la surface. Une auscultation des barrages par caméra est possible à partir de trous de forage réalisés en amont du remblayage.

Les travaux de comblement se sont déroulés de 1999 à 2001. Près de 18 000 m³ de matériau de comblement ont été mis en œuvre pour remplir 1 250 m de longueur de galerie. Le coût de l'opération s'est élevé à 2 600 000 €.

Ce remblayage a été suivi à l'aide de diverses méthodes : contrôle de la montée du coulis à l'aide de pige dans les forages, diagraphies de radioactivité naturelle en forages, diagraphies nucléaires, forages de contrôle, inspections vidéo de l'étanchéité des barrages...

1.2.3 COMPLEMENT D'UN FONTIS À OTTANGE (57)

Un fontis d'origine minière est apparu en août 2003 sur la commune d'Ottange (57). Ce fontis, de 2 à 3 m de diamètre et de 5 à 6 m de profondeur, se localisait au droit d'une galerie minière de 3 m de hauteur et 3,5 m de largeur (6 à 10 m sous la surface) à proximité d'un garage privé.

Comme le reste de la galerie était en bon état (galerie accessible), il a été choisi de bloquer le fontis et de remblayer les zones de la galerie susceptibles d'être à risque de fontis dans le futur [6]. Pour ce faire, un mur de retenu a été réalisé dans la galerie puis 150 m³ de béton ont été injectés depuis la surface afin de combler la totalité de la zone éboulée et la partie de la galerie à risque. Un drainage a été installé en amont du fontis pour dérouter les eaux directement vers le réseau d'eaux de pluie. Ce traitement a aussi été complété par une surveillance visuelle périodique du reste de la galerie.

1.3 ORIENTATIONS DE CONSTRUCTIBILITÉ

Elles sont définies par la Directive Territoriale d'Aménagement (DTA) qui a été approuvée par décret en Conseil d'Etat du 2 août 2005. Cette directive guide l'élaboration des plans de prévention des risques miniers (PPRM).

Sur les zones à risque de fontis, seuls les travaux relatifs au maintien en l'état des constructions sont autorisés sur des constructions existantes. Toute nouvelle construction y est interdite [2].

2. MISE EN SÉCURITÉ DE MINES EN RÉGION LIMOUSIN

A la suite de désordres d'origine minière survenus en surface et notamment de fontis, des zones sous-minées du Limousin ont fait l'objet de mises en sécurité : Beaune-les-Mines (87), Chabrignac (19), les Briards (87), Le Châtelet (23) et Lavaveix-les-Mines (23).

Il s'agit principalement de :

- renforcement de routes par comblement de cavités et injection de coulis ciment ;
- remblayage et mise en place de bouchon ou dalle sur des puits.

Le coût ces opérations s'élève à 230k€ et 120 k€.

Dans le but d'élaborer le PPRM et de recueillir des informations en vue de procéder à la sécurisation des sites de Lavaveix-les-Mines, l'Etat a engagé les actions suivantes :

- une étude hydrogéologique sur la circulation des eaux dans les travaux miniers afin de connaître son influence sur la stabilité des anciens travaux ;
- une campagne de photogrammétrie aérienne afin de caler les anciens plans miniers, associée à une étude comparative des topographies de 1950 et de 2003 ;
- une campagne de sondages de reconnaissance sur plus de 60 sites (Lavaveix-les-Mines, zone urbaine) afin de détecter la présence de cavités sous les maisons d'habitation et de les dimensionner ;
- une 2^{ème} campagne de recherches de cavités minières sur Lavaveix-les-Mines et la surveillance des 5 sites à enjeux (4 maisons d'habitation, plus la traversée de la RD 942) ;
- le confortement des 5 sites à enjeux ;
- une 3^{ème} campagne de reconnaissance par sondages sur le siège Sud de "Courbarieux" ;
- la mise en sécurité des 15 sites prioritaires (mars à juin 2006) ;
- des travaux éventuels sous les sites à enjeux en fonction des résultats de la 3^{ème} campagne de reconnaissance (fonction de l'analyse des risques) ;

Le coût global de toutes ces opérations est estimé à 620 k€ + 700 k€ + 1 M€.

3. MESURES PRÉVENTIVES ET CURATIVES SUR LA LIGNE LGV NORD

De 1993 à 1994, on a dénombré plus d'une centaine de fontis affectant l'emprise de la ligne à grande vitesse Nord Europe. Leur répartition s'étendait sur environ 120 km le long de la LGV. Ces fontis ont plusieurs origines possibles : ouvrages militaires de la première guerre, carrières souterraines, karstification de la craie.

Suite au déraillement du TGV Valenciennes – Paris du 21 décembre 1993, des mesures ont été mises en application par la SNCF pour éviter le risque de fontis sur la ligne LGV Nord [9] :

- campagne de reconnaissance de vides par méthodes géophysiques et par sondages ;
- imperméabilisation des fossés dans les zones potentiellement dangereuses et aménagement des points de rejet des eaux pluviales ;
- traitement par injection des anomalies gravimétriques mises en évidence par les reconnaissances effectuées ;
- mise au point d'une procédure d'alerte en cas de pluies anormalement forte. Des seuils d'alerte pluviométriques ont été fixés. Au franchissement de ces seuils, un survol de la ligne en hélicoptère, une inspection et le ralentissement des TGV sont déclenchés ;
- surveillance régulière et fréquente de la plate-forme et de ses abords.

Par ailleurs, lorsque que les prospections par sondages mettaient en évidence des cavités franches, une opération de rebouchage immédiat avec du béton était réalisée. Le traitement d'urgence était complété par des injections de coulis de ciment pour consolider les terrains environnants et claver les cavités.

Des injections de consolidation étaient également engagées lorsque de grandes épaisseurs de terrains déconsolidés, sans vide franc, sont rencontrées en sondage. Deux types d'injection solide ou liquide sont opérés selon que l'on voulait recompresser ou injecter le terrain.

Le tableau suivant présente les méthodes d'injection employées.

Tableau 1 : Techniques d'injection utilisées pour la gestion du risque fontis sur la ligne LGV Nord [9]

	Objectif	Technique de réalisation
Injection classique	<ul style="list-style-type: none"> • comblement des vides ; • traitement des sols décomprimés. 	<p>Après sa réalisation, le forage est équipé d'un tube à manchettes. Grâce à des obturateurs descendus dans ce tube, on isole la profondeur à traiter. On réalise ensuite l'injection d'un coulis de ciment à cette profondeur : cette opération se déroule en 2 temps :</p> <ul style="list-style-type: none"> • injections de remplissage sous faible pression (traitement des vides) ; • injections de clavage et de traitement sous pression contrôlée de l'ordre de 5 bars et par passes remontantes de 0,5 m (traitement des sols décomprimés).
Injection solide	<ul style="list-style-type: none"> • comblement des vides ; • traitement des sols décomprimés ; • amélioration des caractéristiques des sols. 	<p>La technique de l'injection solide est identique à celle utilisée en injection classique. La différence réside dans le fait que l'on utilise des coulis de ciment plus fortement dosés en ciment, ce qui nécessite des pressions d'injection plus élevées (de l'ordre de 8 bars).</p>
Rebouchage immédiat	<p>comblement des vides (intervention en urgence en cas de remontée de fontis en surface).</p>	<p>Grâce à une pompe à béton, on vient combler gravitairement le vide à l'aide d'un béton maigre. Si ce vide est rempli d'eau, il convient d'utiliser des adjuvants dans la composition du béton de comblement (par exemple des colloïdes).</p>

Cependant, entre 1995 et 2001, plus de trente fontis ont été observés dans l'emprise de la plate-forme ou à proximité immédiate. L'apparition de ces fontis étant manifestement liée à la pluie, la gestion du risque a été basée sur des critères pluviométriques.

Outre des reconnaissances géophysique supplémentaires, d'autres recommandations ont été faites en 2001 pour limiter les zones potentiellement dangereuses et fixer des critères d'alerte plus réalistes :

- la constitution d'une base de données précise sur la date et l'origine des fontis, grâce par exemple au signalement par les maires ou fermiers riverains de la ligne ;
- recueil d'informations piézométriques pour améliorer la prévision ;
- la prise de photographies aériennes après un épisode pluvieux exceptionnel ;
- mesures des vibrations et analyse du comportement des limons sous-jacents la plate-forme.

4. MESURES PRÉVENTIVES ET CURATIVE SUR L'A55 NORTH WALES COAST ROAD À GLAN LLYN (GB)

Pendant le projet et la construction de la route A55 à Glan Llyn (GB), plusieurs techniques de prévention et de traitement ont été adoptées pour éviter les risques de fontis [8]. De part sa configuration géologique (roche calcaire pouvant se dissoudre facilement), ce site est connu pour sa prédisposition au phénomène de fontis.

Des campagnes géophysiques préliminaires (sismique réfraction, microgravimétrie entre autres) et des forages de reconnaissances avec enregistrement des paramètres ont permis de détecter, dans un premier temps, certains vides souterrains existants ou en cours d'évolution. Ces vides ont ensuite été inspectés par caméra vidéo et remblayés par injections de remblai rocheux ou de ciment (selon leur importance).

Enfin, lors de la construction de la voie routière, une attention particulière a été portée sur les anomalies géologiques de terrain rencontrées lors des excavations et sur le drainage des eaux (paramètre déterminant dans le phénomène de dissolution). Un géosynthétique prétendu a été mis en place au droit de la route sur l'ensemble de la zone à risque. Cette mesure préventive permet de limiter les dégâts sur la route et d'assurer la sécurité des personnes le temps qu'une méthode plus définitive de traitement soit mise en place. En complément, une surveillance géotechnique de l'ensemble de la structure routière a été installée. Elle se traduit notamment par une inspection annuelle de la chaussée et de ses abords pour détecter les signes d'éventuels désordres à venir (fissures, déformations...).

5. PROPOSITION DE FONDATIONS SUPERFICIELLES

Une proposition (Louw et al. 1984) consiste à construire les chaussées sur une structure en béton armé d'épaisseur modeste dont le rôle est d'assurer la stabilité à court terme et donc la sécurité en cas de fontis [5]. L'exemple de la Figure 1 représente un radier de 17 cm d'épaisseur, associé à des poutres perpendiculaires espacées de 10 m qui permettent d'assurer un ancrage de la structure dans le sol. Cette structure a été dimensionnée pour résister à des fontis de dimensions moyennes estimées entre 1 et 15 m de diamètre et dont moins de 2 % sont supérieurs à 50 m.

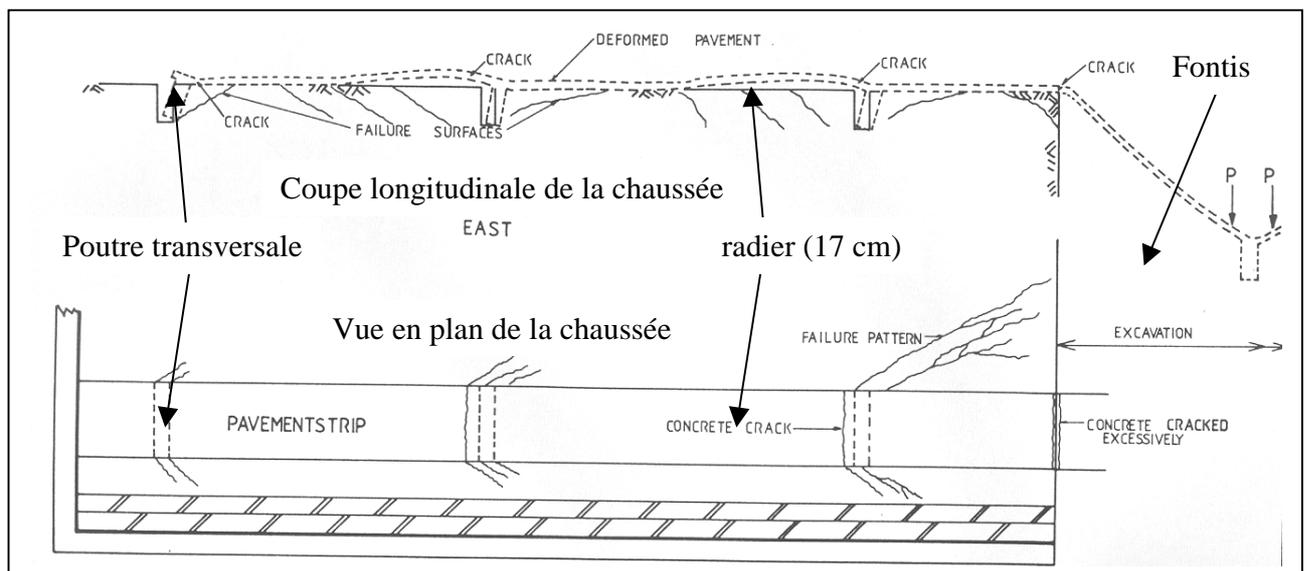


Figure 1 : Illustration de la protection partielle d'une chaussée par un complexe radier - poutres transversales (Louw et al. 1984).

6. L'UTILISATION DE LA TERRE ARMÉE

Steiner (1975) présente une portion d'autoroute de 335 m sur laquelle une étude comparative a été menée entre deux techniques de protection totale devant permettre la résistance à des fontis de 15 m de diamètre, sans déformation significative [5]. La première consistait en la réalisation d'un radier de 50 m de large et 90 cm d'épaisseur. La seconde consistait en un renforcement du terrain de type « terre armée » constitué d'une superposition de bandes métalliques entrecroisées noyées dans un matériau granulaire (Figure 2). Cette seconde technique nécessitait un recouvrement minimal de 4,6 m pour que les forces de frottement soient suffisantes. La seconde solution a été retenue et a permis une économie de 20% et un gain de temps de 60% par rapport à la solution "radier".

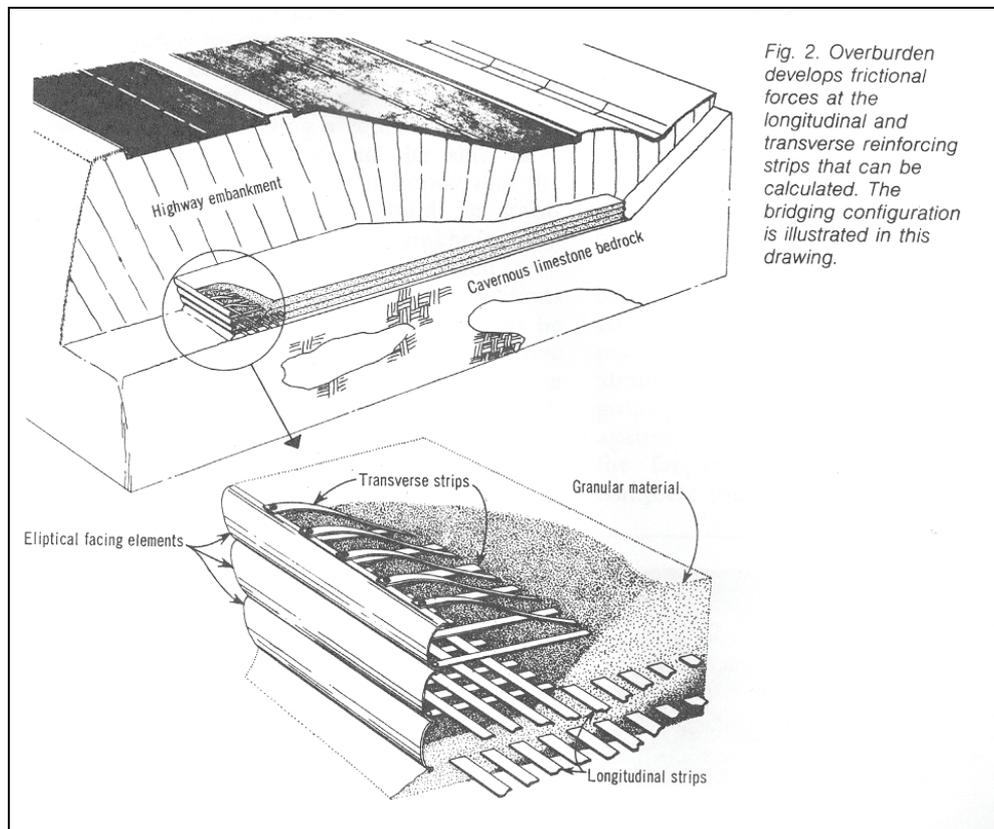


Figure 2 : Illustration de la technique de la terre armée pour la protection totale d'une portion d'autoroute (Steiner 1975).

7. EXEMPLE DE SOLUTIONS CURATIVES

7.1 REMBLAYAGE

Sowers (1984) propose plusieurs alternatives pour remblayer les excavations produites par des cavités de dissolution. Une première solution (Figure 3-a) consiste à combiner le remblayage avec un géotextile afin d'éviter "l'écoulement" des terrains superficiels dans la cavité. Une seconde solution consiste à combler l'excavation puis à la charger au moyen d'un remblai en vue d'aboutir à sa consolidation (Figure 3-b). Enfin une troisième solution consiste à utiliser un remblai de granularité croissante avec la profondeur afin d'assurer une stabilité naturelle du remblai (Figure 3-c). Dans chacune de ces trois techniques, un effort est mené sur la protection du remblai contre les infiltrations des eaux puisque ces dernières peuvent être à l'origine d'un tassement supplémentaire ou d'une aggravation du fontis par érosion ou dissolution. Sur ce sujet, Moore (1988) précise l'importance d'utiliser des matériaux de remblais les moins dégradables possible.

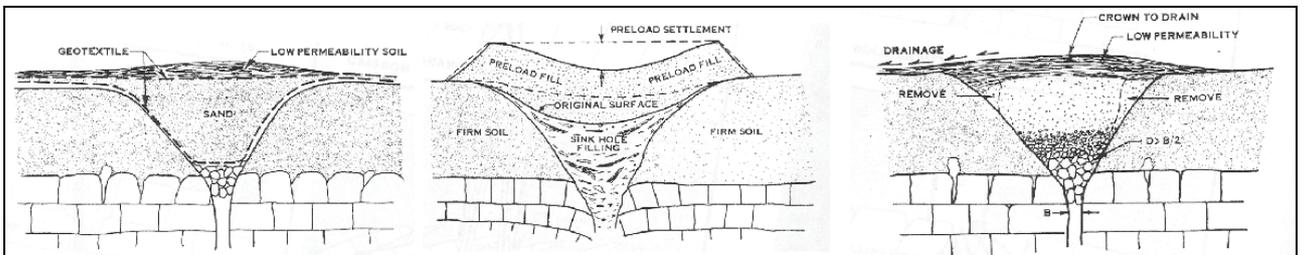


Figure 3 (a, b et c) : Illustrations de trois techniques de remblayage de fontis (Sowers, 1984).

7.2 ENJAMBEMENT

La mise en œuvre d'un dispositif de poutres enjambant l'excavation est proposée pour les bâtiments par Sowers (1984, Figure 4) et a été testée par Goehring et Sayed (1989) pour des réseaux enterrés (pipeline et réseau électrique). Dans ce dernier cas, une solution consiste à faire reposer les poutres sur des fondations superficielles (Figure 5-a) et une seconde à la faire reposer sur des fondations profondes (Figure 5-b).

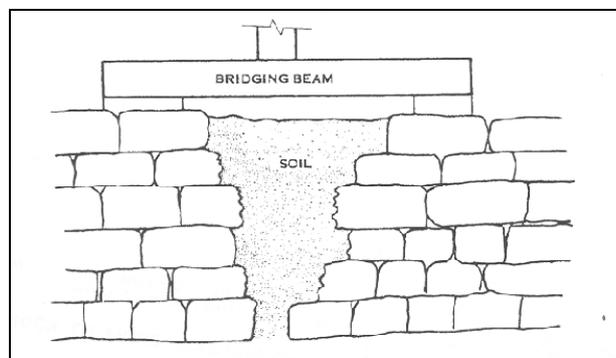


Figure 4 : Illustration de l'enjambement d'un fontis par une poutre (Sowers, 1984).

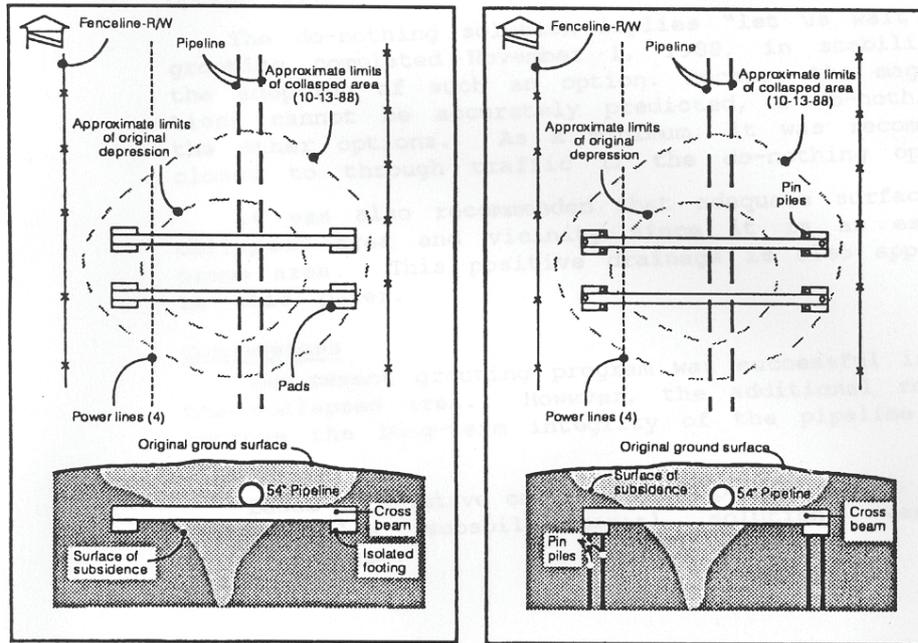


Figure 5 (a et b) : Illustration de l'enjambement d'un fontis par des poutres pour supporter un pipeline préexistant.

8. BIBLIOGRAPHIE

- [1] (juin 2006) *Synthèse des travaux de recherche « Après-mine fer » 2005*. Rapport GISOS LG.FH.SOS.PSI.RPRE.06.0047.C.doc ;
- [2] (octobre 2005) *L'Après Mines dans le Bassin Ferrifère Lorrain*. Rapport de la Préfecture de la Région Lorraine – Préfecture de la Moselle ;
- [3] ASTE J.P., BADJI N., BURLET D., CARBONEL A., DESBUISSON D., HOPP S. et LEFEBVRE-ALBARET P. (septembre 2006) *Lasergrammétrie terrestre et Géomécanique en carrières, travaux au rocher et travaux souterrains, volume 25 de IM Environnement (supplément à la revue Mines et Carrières n°129), pp 4-10 ;*
- [4] BAUDRON J.C., FABRIOL R., FOURNIGUET G., HAMM V., VAUTE L. (décembre 2003), *Modélisation hydrogéologique du réservoir minier de Godbrange et influence du comblement partiel à cendres volantes*, Rapport final brgm/RP-52802-FR ;
- [5] DECK O. (19 septembre 2003) *Inventaire des principales mesures constructives pour la prévention et la remédiation des fontis, Programme DRS-02*, INERIS-DRS-03-45828/RN02 ;
- [6] JOSIEN J.P. (27 août 2003), *Fontis du 8 août 2003 – Rue des Marronniers – Ottange (57)*, rapport GEODERIS R-2003/093 ;
- [7] MIDOT D., MARNET A. GIONTA J.-P. et TREBUCQ S. (2006) *De la découverte au remblayage de vides miniers potentiellement instables : le cas de Thil (54)*, *Proceedings of the symposium Post mining 2005, Nancy*, 16-18 novembre 2005 ;
- [8] NICHOL D. (1998) *Sinkholes at Glan Llyn on the A55 North Wales Coast Road, UK*, volume 50 *Engineering Geology*, pp 101-109 ;
- [9] RAT M. (30 juillet 2002), *Risques liés aux fontis sur la ligne LGV NORD*, Conseil Général des Ponts et Chaussées rapport n°2001-0179-01 ;

Sites internet :

http://www.lorraine.drire.gouv.fr/mines/2_5_surveillance.htm

<http://www.limousin.drire.gouv.fr/publications/3T2005/Apr%C3%A8sMine/page1.htm>

ANNEXE 6

**PRINCIPALES MÉTHODES ANALYTIQUES POUR
ÉVALUER LA HAUTEUR DE REMONTÉE
PRÉVISIBLE EN SURFACE D'UN FONTIS**

a. Piggott et Eynon (1977)

Il s'agit d'un simple rapport de proportionnalité entre la hauteur de remontée et la hauteur de vide :

$$h_{\text{cloche}} = \frac{3w}{(K-1)}$$

b. Modèle de Whittaker et Reddish (1989)

Dans ce modèle, la cloche de fontis est assimilée à un cylindre de rayon constant et égal au rayon de l'effondrement au niveau du toit de la cavité.

L'exploitation est supposée en chambres et piliers, et le fontis se forme à l'aplomb d'un carrefour de galeries.

Le matériau foisonné s'étale dans le carrefour, formant un cône caractérisé par l'angle de talus naturel du matériau (Figure 1).

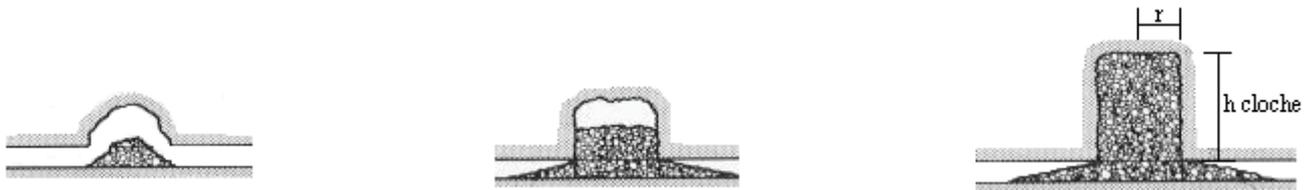


Figure 1 : Auto-comblement par foisonnement d'un fontis selon Whittaker et Reddish

L'équation suivante permet de calculer la hauteur maximale de remontée de fontis :

$$h_{\text{cloche}} = \frac{4}{\pi r^2 (K-1)} (2aw^2 \cotan\theta + wa^2) \quad (\text{notations du tableau 1})$$

c. Méthode de Vachat (1982)

La hauteur de remontée d'une cloche de fontis est calculée via l'estimation du volume de la cloche et du volume disponible pour le talus de matériaux effondrés.

Or, il est fréquemment impossible d'avoir accès directement à la forme de la cloche de fontis (cylindre, parabole, cône, ...), donc à son volume. Vachat introduit un coefficient de forme, noté α . L'expérience montre qu'il est toujours compris entre 1 et 3 et qu'il vaut en moyenne 1,5 dans le bassin parisien. Si α vaut 1, alors la cloche est un cylindre, si α vaut 2, elle a une forme parabolique et enfin si α vaut 3, c'est un cône.

D'autre part, pour calculer le volume à combler, il fait intervenir un second coefficient, le coefficient de site, noté β , qui permet de tenir compte de la densité de piliers au voisinage de la cloche de fontis. Il est compris entre 0 et 1 et augmente quand l'emprise de piliers diminue.

En égalisant le volume de la cloche à fontis avec le volume à combler pour aboutir à l'auto-comblement, Vachat déduit la hauteur de remontée de fontis :

$$h_{\text{cloche}} = \frac{\alpha w}{K-1} \left(\frac{\beta w^2}{3r^2 \tan^2 \theta} + \frac{\beta w}{r \tan \theta} + 1 \right)$$

d. **Modèle de Meier (1991)**

Ce modèle distingue les exploitations en chambres et piliers des galeries isolées. De plus, Meier n'assimile plus exclusivement la cheminée de fontis à un cylindre, il considère aussi une cheminée de forme parabolique. La hauteur de remontée de fontis doit alors être plus grande pour atteindre l'égalité des volumes.

Ainsi, la hauteur de remontée de fontis est donnée par quatre relations :

- galerie isolée et forme cylindrique :
$$h_{\text{cloche}} = \frac{w}{K-1} \left(1 + \frac{w}{D \tan \theta} \right) \quad (2)$$

- galerie isolée et forme parabolique :
$$h_{\text{cloche}} = 1.274 \times (2)$$

- chambres et piliers et forme cylindrique :
$$h_{\text{cloche}} = \frac{w}{K-1} \left(1 + \frac{w}{r \tan \theta} + \frac{w^2}{3r^2 \tan^2 \theta} \right) \quad (3)$$

- chambres et piliers et forme parabolique :
$$h_{\text{cloche}} = 1.5 \times (3)$$

e. **Modèle INERIS (Salmon, 1998 ; Didier & Salmon, 2004)**

i. Principe de calcul et domaines d'application

La cloche de fontis a la forme simplifiée d'un cylindre de rayon r , et le fontis se forme au niveau d'une intersection de galeries, c'est à dire au centre de quatre piliers.

A partir d'un certain moment, le cône formé par les matériaux effondrés atteint la base des piliers et son volume n'est alors plus le volume d'un cône parfait ; ce modèle tient compte de l'emprise des piliers dans les calculs.

Le modèle INERIS s'applique donc aux exploitations horizontales en chambres et piliers, mais aussi à des configurations et géométries d'exploitation plus complexes. Il traite plus précisément des cas de galeries trapézoïdales, de galeries en fer à cheval et de galeries fortement pentées, d'exploitations sur plusieurs niveaux superposés et d'exploitations où la lithologie du recouvrement est mixte, marno-sableuse. Le détail des calculs et les expressions du volume occupé par les piliers dans les trois premières situations sont donnés dans une notice explicative (annexe C).

ii. Présentation des résultats

Etant donnée la lourdeur des formules, un fichier Excel a été créé pour pouvoir mettre en application rapidement et simplement les différents modèles.

Chacune des géométries d'exploitation étudiée analytiquement (paragraphe précédent) fait l'objet d'une feuille de calcul Excel (Annexe D), qui invite l'utilisateur à entrer les paramètres d'entrée nécessaires, et qui indique, si oui ou non le fontis atteint la surface. Si le fontis n'atteint pas la surface, le code de calcul donne la hauteur maximale de remontée de fontis.

Pour quelques-unes des géométries proposées, nous distinguons :

- une approche déterministe, fournissant une seule et unique réponse quant à la hauteur de remontée de fontis, à partir d'une banque de données précises.
- une approche probabiliste, estimant un pourcentage de chance d'apparition de fontis à la surface, à partir de fourchettes de données et de 3000 simulations de remontées de fontis.

Enfin, deux dernières modélisations par approche mécanique sont proposées dans le cas où le recouvrement serait stratifié, surtout au toit immédiat du vide, l'objectif

est d'évaluer s'il y a rupture des différents bancs et d'en déduire la hauteur maximale de remontée de fontis, correspondant à la situation dans laquelle il se forme une voûte stable. Les deux versions diffèrent selon la connaissance précise de la stratification du recouvrement par l'utilisateur.

ANNEXE 7
COEFFICIENTS DE FOISONNEMENT PRÉCONISÉS
PAR LA R.T.R.

Classe R.T.R.	Dénomination R.T.R.	Types de sols le plus fréquemment rencontrés	Densité en place (t/m3)	Coefficient de foisonnement	Densité foisonnée (t/m3)
A	Sols fins	Limons peu plastiques	1,6 à 1,8	1,30 à 1,40	1,260
		Limons très plastiques	1,7 à 1,9	1,35 à 1,55	1,240
		Loess	1,5 à 1,7	1,20 à 1,30	1,280
		Arènes peu plastiques	1,7 à 1,9	1,30 à 1,45	1,310
		Argiles et marnes peu plastiques	1,6 à 1,8	1,30 à 1,45	1,240
		Argiles et marnes très plastiques	1,7 à 2,0	1,40 à 1,60	1,250
		Marnes	1,8 à 2,4	1,30 à 1,40	1,560
		Sables fins argileux	1,8 à 2,1	1,25 à 1,35	1,500
		Sables fins peu argileux	1,6 à 1,8	1,10 à 1,15	1,510
B	Sols sableux ou graveleux avec fines	Silts	1,5 à 1,7	1,10 à 1,20	1,390
		Sables silteux	1,6 à 1,8	1,05 à 1,15	1,545
		Graves silteuses	1,7 à 2,0	1,10 à 1,20	1,610
		Graves peu argileuses	1,8 à 2,1	1,10 à 1,20	1,695
		Graves argileuses	1,7 à 2,0	1,15 à 1,25	1,540
		Graves très silteuses	1,6 à 1,9	1,15 à 1,25	1,460
C	Sols comportant des fines et de gros éléments	Argiles à silex	1,9 à 2,2	1,30 à 1,45	1,490
		Argiles à meulière	1,8 à 2,1	1,30 à 1,45	1,420
		Eboulis	1,8 à 1,9	1,40 à 1,50	1,275
		Moraines	1,8 à 2,0	1,40 à 1,50	1,310
		Roches altérées	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520
		Alluvions grossières	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520
D	Sols et roches insensibles à l'eau	Sables alluvionnaires propres	1,6 à 1,9	1,05 à 1,15	1,590
		Sables de dunes	1,4 à 1,5	1,00 à 1,10	1,380
		Graves alluvionnaires	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520
		Roches non évolutives	1,8 à 2,0	1,20 à 1,30	1,520
		Calcaires durs	2,2 à 2,8	1,40 à 1,60	1,660
		Granit	2,4 à 2,9	1,40 à 1,60	1,770
		Porphyres	2,6 à 2,9	1,40 à 1,60	1,830
		Grès durs	1,9 à 2,7	1,40 à 1,60	1,530
		Basalte	2,7 à 3,0	1,40 à 1,60	1,900
E	Roches évolutives	Craies	1,5 à 2,3	1,30 à 1,50	1,360
		Schistes	1,9 à 2,3	1,30 à 1,50	1,500
F	Matériaux putrescibles et polluants	Terre végétale	1,2 à 1,4	1,07 à 1,15	1,170
		Humus forestiers	0,7 à 1,1	1,20 à 1,25	0,730
		Tourbes	0,3 à 0,9	1,00 à 1,10	0,570