



Méthodologie pour la détermination de dispositions constructives permettant de gérer les ouvrages existants et futurs soumis aux mouvements de terrains (affaissement ou fontis)

Jean-Bernard Kazmierczak, Marwan Al Heib

► To cite this version:

Jean-Bernard Kazmierczak, Marwan Al Heib. Méthodologie pour la détermination de dispositions constructives permettant de gérer les ouvrages existants et futurs soumis aux mouvements de terrains (affaissement ou fontis). Evaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées : séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS -réseau des LPC, May 2005, Paris, France. pp.230-245. ineris-00976162

HAL Id: ineris-00976162

<https://ineris.hal.science/ineris-00976162>

Submitted on 9 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MÉTHODOLOGIE POUR LA DÉTERMINATION DE DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES PERMETTANT DE GÉRER LES OUVRAGES EXISTANTS ET FUTURS SOUMIS AUX MOUVEMENTS DE TERRAINS (AFFAISSEMENT OU FONTIS)

Jean-Bernard KAZMIERCZAK ⁽¹⁾, Marwan AL HEIB ⁽²⁾

⁽¹⁾ INERIS, Parc technologique Alata, 60550 VERNEUIL-EN-HALATTE

⁽²⁾ INERIS-LAEGO, Ecole des Mines, 54042 NANCY

Résumé

Les affaissements ou les effondrements en surface, provoqués par des ruptures de cavités ou d'exploitations souterraines peuvent induire des dommages sérieux au bâti. Un travail d'analyse et de synthèse a été réalisé afin de proposer des solutions techniques adaptées à l'aléa et aux caractéristiques des ouvrages rencontrés. Une méthodologie a été établie pour gérer les ouvrages existants et futurs soumis à des risques d'affaissement ou de fontis.

Pour les ouvrages neufs, la méthode proposée s'attache à établir une procédure permettant :

1. d'évaluer le contexte géo-anthropique ;
2. d'évaluer les risques d'affaissement ou d'effondrement en fonction de ce contexte ;
3. de déterminer si les risques de sollicitations entrent dans la gamme d'amplitude des perturbations techniquement admissibles par le bâti;
4. de définir les dispositions constructives à prendre pour que les perturbations atteignant la surface n'affectent pas le bâti au-delà des limites acceptables.

Pour les ouvrages anciens, la méthodologie propose des modes de confortement ou de réhabilitation.

1. Introduction

La prévention et la gestion des risques de mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines constituent deux des objectifs de la Sous-Direction de la Prévention des Risques Majeurs (SDPRM) du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (MEDD).

Dans ce cadre, la SDPRM a confié à la Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol de l'INERIS, la réalisation d'un programme de recherche intitulé «Analyse, Prévention et maîtrise de risques de mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines», ayant comme objectif d'évaluer et de perfectionner les outils permettant d'améliorer la gestion des risques liés aux cavités souterraines.

Un travail d'analyse et de synthèse a été réalisé pour proposer des solutions techniques permettant de gérer les ouvrages existants et futurs soumis à des risques d'affaissement ou de fontis.

Pour les ouvrages neufs, l'outil s'attache à établir une procédure permettant :

- d'évaluer le contexte géo-anthropique (localisation des cavités, profondeur, ouverture, caractéristiques des terrains concernés, historique régional) ;
- d'évaluer les risques d'affaissement ou d'effondrement en fonction de ce contexte ;
- de déterminer si les risques de sollicitations entrent dans la gamme d'amplitude des perturbations techniquement admissibles par le bâti (type de sollicitations attendues (fontis ou affaissement) à comparer à des valeurs de seuils) ;
- de définir les dispositions constructives à prendre pour que les perturbations atteignant la surface n'affectent pas le bâti au-delà des limites acceptables.

Pour les ouvrages anciens, la méthodologie propose des modes de confortement ou de réhabilitation.

2. Les phénomènes à l'origine des perturbations

Un guide pour l'élaboration de Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM) a été établi récemment (référéncé INERIS-DRS-04-51198/R01 du 30 juin 2004). Il fournit une description des phénomènes susceptibles d'induire des risques ou des nuisances d'origines minières en surface ainsi que l'identification des principaux mécanismes pouvant être à l'origine de ces désordres. On rappelle ci-après la définition des phénomènes principaux et induits, à l'origine des perturbations débouchant en surface sur les bâtis.

2.1 L'affaissement

L'affaissement se manifeste par un réajustement des terrains de surface induit par l'éboulement de cavités souterraines résultant de l'extraction ou de la disparition (dissolution, combustion) de minerai. Les désordres, dont le caractère est généralement lent, progressif et souple, prennent la forme d'une dépression topographique, sans rupture cassante importante, présentant une allure de cuvette (Figure 6).

Le mouvement subi par les terrains de surface se décompose classiquement en un déplacement vertical des points du sol, c'est l'**affaissement** proprement dit, et un **déplacement** dans le plan horizontal. La déformation de la surface résulte du fait que deux points voisins de la surface subissent des mouvements différents, ce qui induit de fait, des variations différentielles de la longueur du sol. L'affaissement diffère lui-aussi d'un point à un autre, ce qui génère un déplacement différentiel appelé **pente** dont la variation est appelée **courbure**. La Figure 7 illustre ces différentes notions.

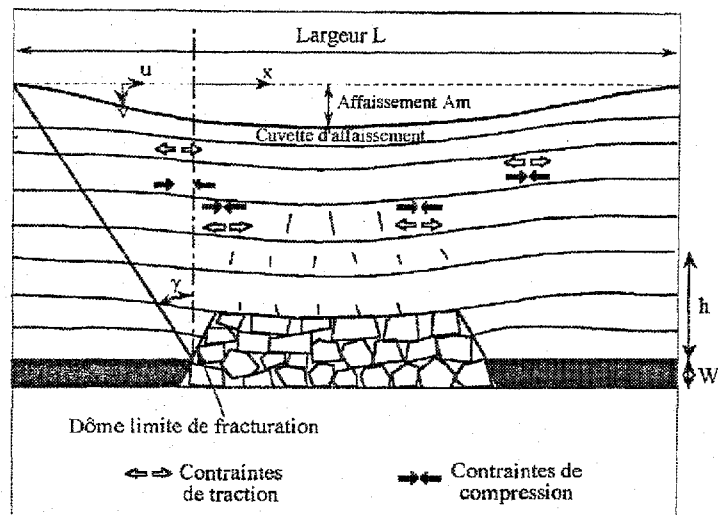


Figure 6. Une cuvette d'affaissement.

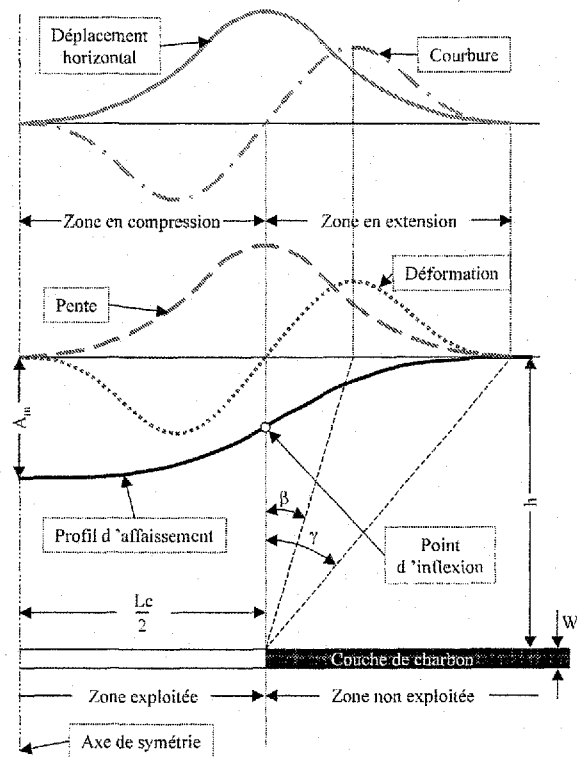


Figure 7. Les différents mouvements de surface engendrés par une exploitation souterraine horizontale suivant une coupe transversale (d'après Aissaoui, 1999).

2.2 L'effondrement localisé

Par opposition au phénomène d'affaissement, on parle d'**effondrement** lorsque l'abaissement de la surface se fait de manière **discontinue** dans le **temps** (événement rapide et brutal) et dans l'**espace** (formation de fractures, de figures d'arrachement, de cratères...). En fonction de l'ampleur du phénomène, on différencie classiquement **différents types** d'effondrement qui vont **de l'effondrement localisé (fontis) à l'effondrement généralisé**. Les conséquences que ces derniers sont susceptibles d'induire sur le bâti sont telles qu'il est nécessaire d'éviter tout type d'occupation permanente de la surface dans les secteurs concernés par le risque d'effondrement généralisé. Nous focaliserons donc notre analyse sur le mécanisme d'effondrement le plus classiquement rencontré à l'aplomb de cavités souterraines : le fontis (Figure 8).

Il s'agit d'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" de quelques mètres de diamètre. Dans certaines configurations très particulières, les dimensions des fontis peuvent atteindre quelques dizaines de mètres. Le terme de fontis désigne aussi bien le mécanisme d'effondrement que le cratère classique observé en surface.

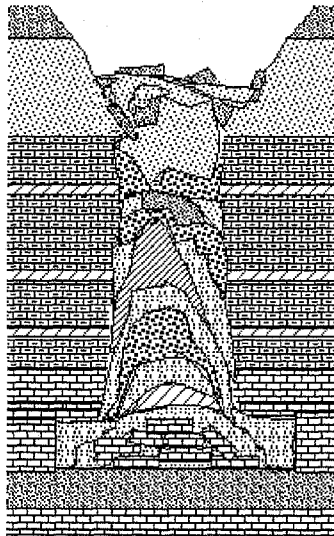


Figure 8. Etat ultime résultant de la rupture de toit d'une cavité souterraine (Fontis).

3. Impacts de ces phénomènes en surface

3.1 Cas des affaissements

Il existe trois effets essentiels résultant de la déformation des terrains de surface induits par les affaissements susceptibles d'affecter les ouvrages situés dans l'emprise des mouvements :

- les déformations horizontales ;
- la mise en pente ;
- la courbure.

Des études ont montré que les phénomènes de **mise en pente** et de **déformations horizontales** sont prédominants dans la dégradation d'une structure (Al Heib et al, 2003). Ces effets sont décrits ci-après.

3.1.1. Effets de mise en pente

L'affaissement modifie la pente naturelle des terrains en surface. Elle peut même, dans certains cas assez exceptionnels, l'inverser, ce qui peut induire des conséquences fâcheuses en présence de cours d'eau, de canaux et de réseaux d'assainissement en zone urbanisée.

Ces mises en pente peuvent enfin induire des conséquences dommageables aux constructions élevées, en raison du décalage de leur centre de gravité, voire aux constructions ordinaires lorsque les pentes deviennent particulièrement fortes. On note généralement une différence entre la pente du sol et celle de la structure.

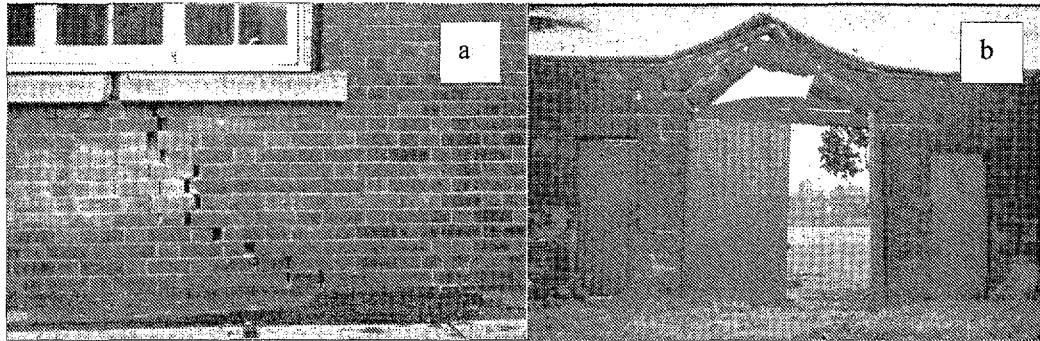
3.1.2. Effets des déformations horizontales

Les déformations horizontales constituent souvent la cause principale des dommages causés aux constructions par les déformations du sol. Elles se transmettent aux structures par l'intermédiaire des parties enterrées ou en contact avec le sol (murs verticaux enterrés, fondations, etc.). Suivant sa position par rapport à la cuvette d'affaissement, le bâti subit, soit une extension, soit un raccourcissement.

Les effets qui se manifestent dans les zones subissant une extension se traduisent par la création ou l'ouverture de fractures ou de fissures assez larges (quelques mm). Ces fractures se produisent généralement là où l'effet d'allongement est le plus important (aux points d'extension maximale). Les bâtiments situés à cet endroit subissent des fractures qui se développent en particulier aux angles des fenêtres et des portes (Figure 9).

Le phénomène diffère pour les effets qui se manifestent dans les zones subissant des contraintes de compression liées au raccourcissement. Généralement, les constructions peuvent subir de fortes compressions sans se rompre. Dans certaines situations, l'apparition de pliures peut alerter sur l'existence de telles contraintes. Lorsque ces dernières finissent par dépasser la limite de rupture d'un élément du bâtiment, des fractures peuvent apparaître sur les façades (Figure 9). Ces conséquences sont souvent

observables au niveau sur les chaussées (bordures de trottoir, écrasement de réseaux d'égouts,...) et sur les bâtiments (soulèvement de dallage, flèches de plancher, soulèvement de carrelage).



*Figure 9. Dommages induits par les mouvements du sous-sol
(a : rupture par extension-cisaillement ; b : rupture par compression)
(Source : Nottingham University).*

Notons qu'il est toujours particulièrement délicat de déterminer avec précision l'état de contrainte qui se développe au sein d'un bâtiment et de ses fondations. Ainsi, un état de compression régulier (*a priori* favorable) pour un bâtiment présentant des éléments renforcés peut entraîner des contraintes de traction dans les longrines et les murs.

3.2. Cas des effondrements

L'analyse des conséquences induites en surface par les fontis s'appuie sur une approche observationnelle basée sur le retour d'expérience d'ouvrages endommagés.

Quatre classes d'intensité de l'aléa « effondrement localisé – fontis » sont proposées. Elles sont établies en fonction de l'extension des fontis en surface :

- d'extension et de profondeur très limitées en surface ;
- de faibles dimensions (diamètre < 3 m) pouvant être nombreuses et adjacentes (Figure 10) ;
- de moyennes dimensions ($3 \text{ m} \leq \text{diamètre} \leq 10 \text{ m}$, Figure 10) ;
- de grandes dimensions (diamètre > 10 m).

En général, les dommages associés aux fontis d'une classe d'intensité modérée ou élevée sont importants : dégradation partielle (

Figure 11a) ou complète (

Figure 11b) des ouvrages superficiels (maisons, ouvrages d'art, usines...) ou des infrastructures (routes, tuyaux, canalisations).

Classe d'intensité	Diamètre de l'effondrement
Très limitée	Effondrements auto-remblayés à proximité immédiate de la surface (profondeur centimétrique)
Limitée	$\varnothing < 3 \text{ m}$
Modérée	$3 \text{ m} < \varnothing < 10 \text{ m}$
Elevée	$\varnothing > 10 \text{ m}$

Tableau 1. Classe d'intensité de l'aléa.



Figure 10. Différents types d'occurrence de fontis.

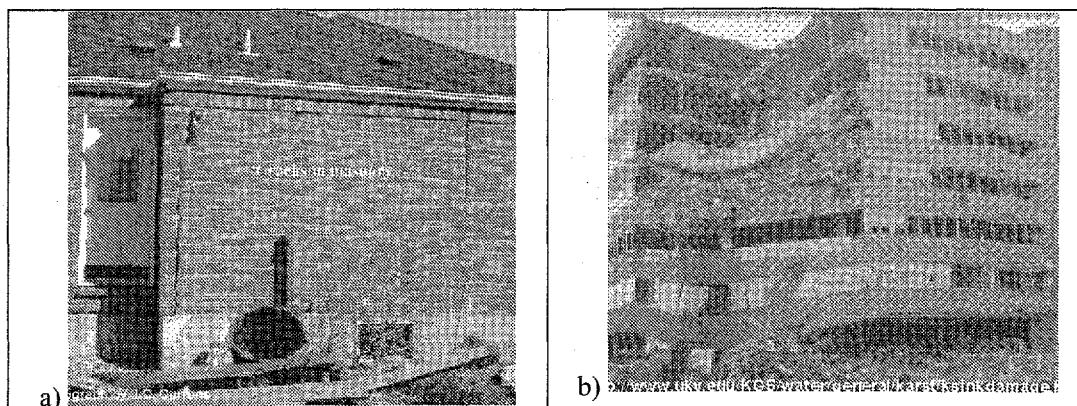


Figure 11. Types de dégradations des structures affectées par l'apparition de fontis.
a) dégradation partielle (architecturale)². b) dégradation lourde (complète)³.

La connaissance et l'analyse des aléas exposés dans cet article permettent de définir une méthodologie présentée sous la forme d'un arbre d'aide à la décision.

² Les fractures dans la maçonnerie montrent les dommages provoqués par l'occurrence d'un fontis sous cette maison située près de Louisville, K.Y. La réparation des dommages a coûté plus de 40.000 €. Site Internet (image) : <http://www.uky.edu/KGS/water/general/karst/ksinkdamage.html>.

³ Un fontis ($\varnothing = 15 \text{ m}$ et $P = 6 \text{ m}$) s'est développé le 24/02/1994 (Allentown, Pennsylvania) sous une fondation du bâtiment causant une défaillance des poteaux adjacents : www.phillyblast.com/Allentown/acp-sh04.jpg.

4. Méthodologie

L'arbre d'aide à la décision proposé en page suivante a pour objectif d'aider le projeteur à définir :

- s'il est envisageable d'édifier une construction sur un site susceptible de présenter des mouvements de terrains induits par des ouvrages souterrains ;
- la nature des méthodes les mieux adaptées pour dimensionner son ouvrage ou protéger un ouvrage existant.

Cet arbre ne doit être utilisé que si la solution optimale du remblayage ou du confortement des terrains excavés ne peut, pour des raisons techniques ou économiques, être employée.

Cet arbre établit une procédure s'appuyant sur quatre items :

- la définition du contexte géo-anthropique ;
- l'évaluation des risques encourus ;
- les conséquences éventuelles pour l'ouvrage ;
- les dispositions constructives susceptibles de rendre l'ouvrage résistant aux sollicitations parasites en provenance du sous-sol.

L'arbre a été conçu pour que son utilisation soit aussi aisée que possible. Les réponses aux différentes interrogations qui le constituent permettent de cheminer dans les branches concernées pour déboucher, dans le meilleur des cas, sur des solutions techniques.

Dans un certain nombre de cas, le site pourra être déclaré «inconstructible». Dans le cas contraire, la principale difficulté résidera dans le fait que plusieurs choix techniques sont envisageables. Même si certaines solutions techniques sont plus efficaces que d'autres, aucune quantification de l'apport des techniques sur la capacité de résistance de la structure n'existe. Pour guider le concepteur, un critère d'efficacité a donc été associé aux différentes techniques proposées. Ce critère est représenté par des étoiles (+). 5 étoiles correspondent au choix technique le plus efficace. Les étoiles ne doivent pas être considérées comme cumulatives.

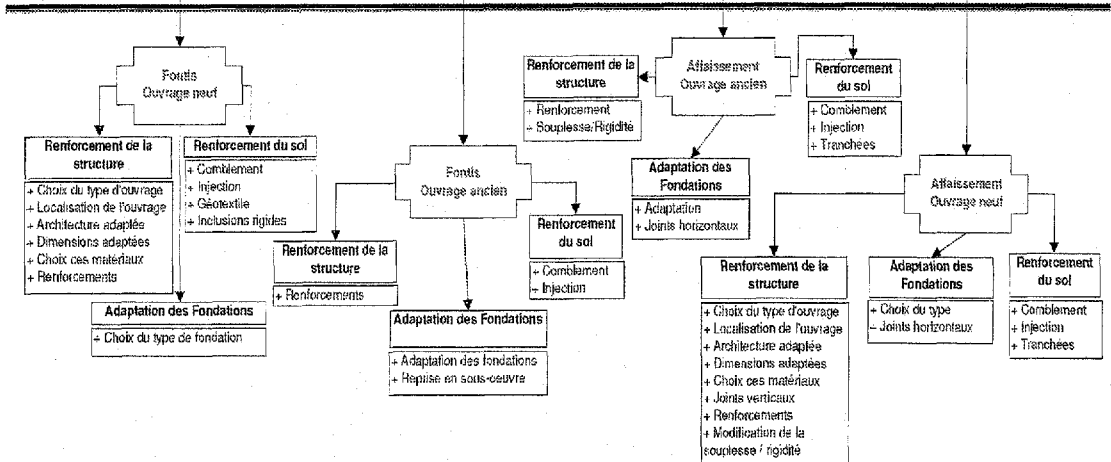
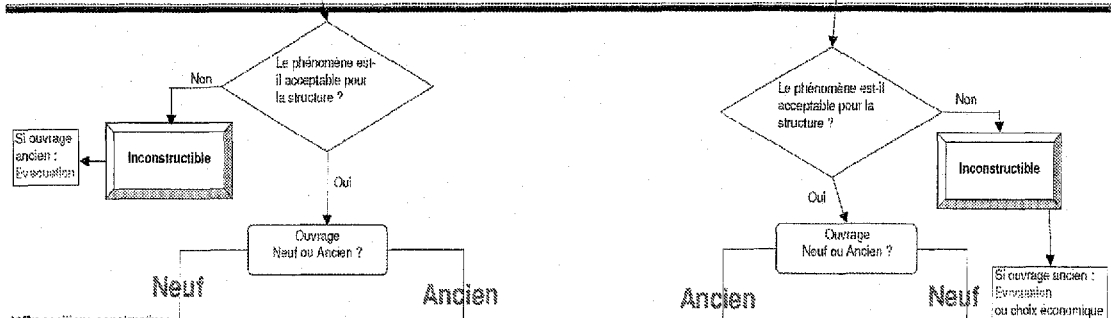
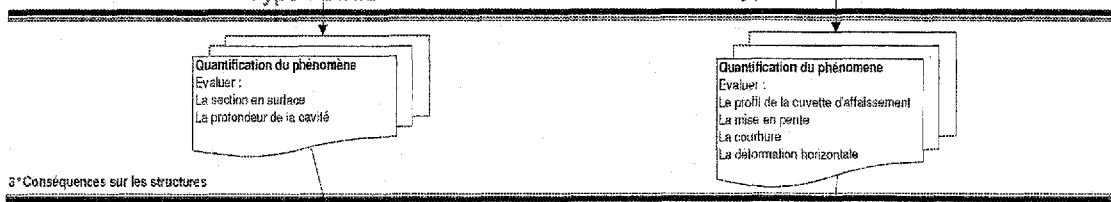
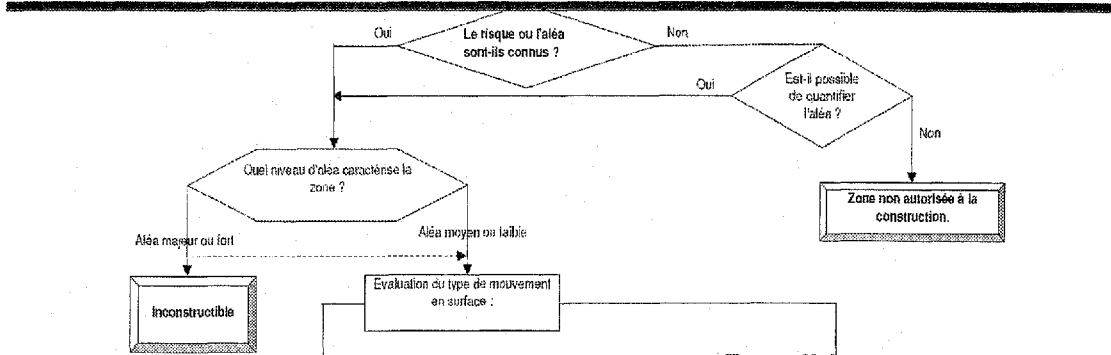


Figure 12. Arbre de décision.

4.1 Évaluer le contexte géo-anthropique

La connaissance de l'histoire d'un site, aussi bien en surface qu'en sous-sol, est essentielle à la bonne prise en compte des problèmes potentiels qui pourront être rencontrés à terme. Cette connaissance peut être acquise par la consultation de dossiers administratifs et/ou techniques, auprès des administrations compétentes (Communes, DRIRE, etc.) ou des industriels concernés.

Elle peut également s'appuyer, lorsqu'ils existent, sur les plans de préventions des risques qui définissent les niveaux d'aléas (majeur, fort, moyen ou faible).

Lorsque le niveau d'aléa a été défini, il convient, si celui-ci est acceptable (faible ou moyen) d'évaluer le risque en quantifiant les phénomènes susceptibles d'intéresser la surface.

Cette quantification passe par la détermination du type d'aléa de mouvement (Fontis ou Affaissement) et l'évaluation des paramètres physiques associés.

4.2 Évaluer l'aléa :

4.2.1 Pour un affaissement

De nombreuses méthodes, permettant d'estimer l'affaissement maximal et la mise en pente existent. Elles ne seront pas développées dans cet article. On retiendra toutefois que dans la plupart des cas, le paramètre d'entrée des formulations est l'affaissement maximal au centre de la cuvette A_m . Pour évaluer la valeur de A_m , pour une zone d'aléa homogène, certaines données telles que la largeur de la zone L , la profondeur H , le taux de défrètement τ (pour des exploitations partielles par chambres et piliers abandonnés).

4.2.2 Pour un fontis

Il existe plusieurs catégories de méthodes permettant d'estimer la probabilité d'occurrence d'un aléa fontis, ainsi que des règles permettant de définir les dimensions de fontis en surface. On citera à titre indicatif les différentes méthodes :

- les méthodes empiriques ;
- les méthodes analytiques ;
- les méthodes numériques ;
- les méthodes mixtes, s'inspirant des 3 précédentes.

Comme pour le cas des affaissements, le propos de cet article n'est pas de développer ces méthodes. Le travail récent de M. Abbass fournit une synthèse de l'ensemble de méthodes citées ci-dessus (Abbass, 2004). On gardera toutefois à l'esprit que toutes ces méthodes doivent s'appuyer sur des données de terrain.

4.3 Les conséquences possibles pour les structures :

4.3.1 Pour un affaissement

Lorsque les différents paramètres susceptibles d'affecter les structures de surface ont été estimés, il convient de comparer les valeurs maximales attendues aux valeurs de seuils retenues grâce à l'expertise de nombreux auteurs (Deck, 2003):

1. l'ordre de grandeur des variations de longueur du sol ne doit pas dépasser 2,5 mm/m correspondant à des dommages négligeables ou très légers ;
2. une mise en pente de 1% constitue une gêne pour une habitation. De fait, les constructions élevées doivent être maintenues à une pente inférieure à cette valeur seuil ;
3. un rayon de courbure (position en cuvette et en dôme) de 15 km constitue la valeur minimale en deçà de laquelle les conséquences sur les structures peuvent devenir sensibles.

4.3.2 Pour un fontis

Bien qu'il n'existe aucun document officiel traitant des valeurs de seuils admissibles par les bâtiments, le SDICS⁶ de la région Nord-Pas-de-Calais a édicté, dans le cadre du Plan d'exposition aux risques, quelques règles s'appuyant sur plus de dix années d'expérience dans le domaine des fontis. Ces règles sont les suivantes :

1. la structure doit être capable de résister à un fontis de 2,5 m de rayon en pleine poutre ou dalle;
2. la structure doit être capable de résister à un fontis de 3 m de rayon en porte à faux.

L'expérience a montré que les structures dimensionnées selon ces règles n'ont pas (ou peu) souffert d'occurrences de fontis dans la région Nord-Pas-de-Calais.

Les différentes méthodes susceptibles d'améliorer les structures ou de lutter efficacement contre les perturbations atteignant la surface font l'objet du chapitre suivant.

5. Les dispositions constructives adaptées

Les méthodes de traitement et les solutions mises en œuvre pour éviter ou minimiser les dégâts aux structures, peuvent être divisées en quatre catégories :

- les méthodes de traitement des vides souterrains (comblement total, remblayage partiel, etc., Tritsch, 1995) ;
- les méthodes de traitement de la structure (consolidation de la structure et amélioration de sa résistance, Al Heib, 2001) ;
- les méthodes applicables aux fondations de l'ouvrage (augmentation de la surface, réalisation des fondations profonds, Al Heib, 2001) ;
- les méthodes de renforcement du sol (géotextile : Villard et al., 2002 ; Cooper et Saunders, 2002) ;

Nous traitons, dans cet article, que des trois dernières solutions, ce qui sous-entend que la solution de traitement du vide n'a pu être retenue.

En général, le choix entre l'une ou l'autre de ces différentes méthodes de protection est fonction :

⁶ SDICS : Service Départemental d'Inspection des Carrières Souterraines

- des conditions d'accessibilité et/ou de stabilité du site (profondeur, propriétés géomécaniques du recouvrement ...);
- de l'évolution de l'instabilité (avant ou après son apparition en surface);
- de la nature des structures en surface;
- du niveau de protection adapté à la destination du site (sécurité des personnes, protection du bâti existant, projet d'aménagement urbain ...);
- du coût de l'opération (réparation) et du type de dommage (architectural, fonctionnel ou structural : Al Heib, 2001).

Le Tableau 2 présente l'ensemble des solutions techniques applicables à ce jour. Il permet d'effectuer un choix en fonction du type de perturbation, mais également en fonction du type d'ouvrage à traiter. En général, plusieurs solutions techniques sont possibles pour améliorer la résistance d'un ouvrage. Le choix définitif de la mise en œuvre d'une ou de plusieurs solutions devra être réalisé par un organisme compétent, dans le respect des règles de bon sens technique et économique. Pour faciliter le choix, un indice d'efficacité (+) a été attribué à chaque solution. Cet indice n'est pas cumulatif.

Dispositions constructives		Affaissement		Fontis		
		Neuf	Ancien	Neuf	Ancien	
Structure	- Type d'ouvrage	X		X		+++++
	- Localisation	X		X		+++++
	- Architecture d'ensemble	X		X		+++
	- Dimensions de l'ouvrage	X		X		+++
	- Matériaux employés	X		X		+++
	- Joints verticaux	X				+++
	- Renforcement de l'ouvrage	X	X	X	X	+++
	- Modification de la souplesse/ rigidité	X	X			+ / ++++
Fondatio	- Type de fondation	X		X		+++
	- Adaptation		X		X	+
	- Joints horizontaux	X	X			++
	- Reprise en sous œuvre sous chaînage				X	++
Sol	- Comblement	X	X	X	X	+++++
	- Renforcement par injection	X	X	X	X	++
	- Renforcement par géotextile			X		+++
	- Renforcement par inclusions rigides			X		?
	- Tranchées périphériques	X	X			+++++

Tableau 2. Synthèse des dispositions constructives applicables à la structure, à la fondation ou au sol.

On présente ci-après quelques exemples illustrés de solutions techniques des trois types (structure, fondation et sol) plus particulièrement adaptés à la problématique des fontis.

5.1 Exemples

5.1.1 Renforcement d'une ancienne maison avec des câbles

Le renforcement par des câbles est une solution provisoire soit pour un mouvement contrôlé (affaissement dû à une exploitation) ou le temps de réaliser un renforcement définitif. Les câbles permettent de solidariser les éléments de la structure et d'éviter sa ruine. Cette technique semble adaptée aux structures de petites dimensions. L'objectif peut être atteint par la pose de câbles au niveau des façades visant à rendre les différentes parties de la structure comme un seul élément plus résistant. Ces éléments peuvent être déplacés ou réutilisés en fonction des besoins.

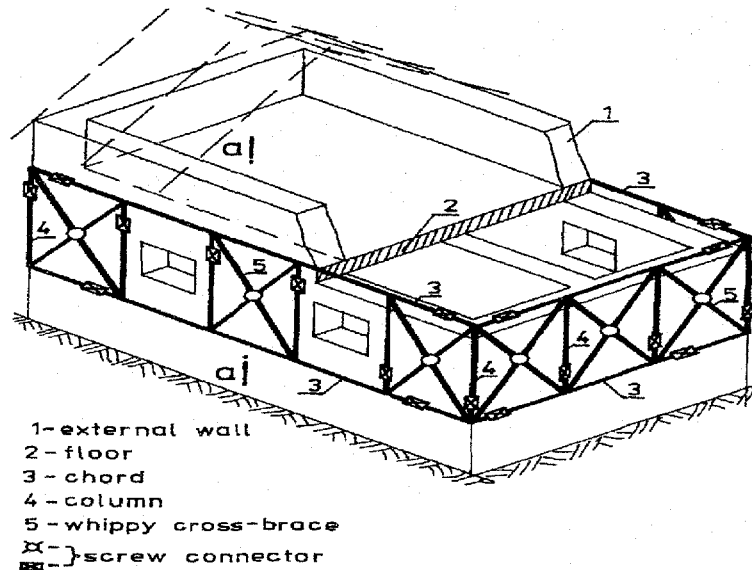


Figure 13. Exemple de renforcement d'ouvrage (structure).

5.1.2 Reprise en sous-œuvre sous-chaînage

Pour des fontis d'une intensité modérée ou faible, la solution d'une reprise en sous-œuvre est techniquement possible. Dans le cas où les fondations seraient considérées comme insuffisantes vis-à-vis du phénomène de fontis et notamment du transfert d'efforts vers les fondations susceptibles de rester en place, on pourra réaliser des puits traversant le fontis avec ceinturage pour assurer la stabilité (Figure 14).

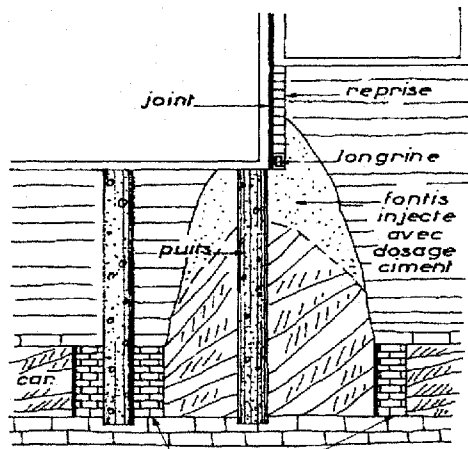


Figure 14. Exemple de reprise en sous-œuvre dans une zone de fontis (Fondation).

5.1.3 Renforcement du sol par géotextile

Kempton (1992) a démontré l'efficacité de cette solution pour le remblai d'une route construite sur une zone de fontis. 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 15) et à éviter toute déformation inadmissible susceptible de mettre en péril la stabilité du talus et/ou des ouvrages en zone de fontis (routes, bâtiments, ...).

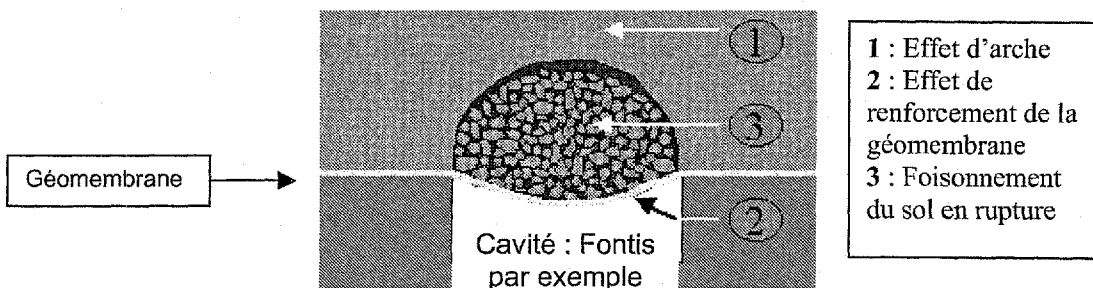


Figure 15. Exemple de renforcement du sous-sol par une géomembrane (Villard et al. 2002).

6. Conclusion

Le guide, dont est extrait cet article, apporte certaines réponses au problème du dimensionnement (ou de la réhabilitation) des ouvrages ou du bâti dans des zones potentiellement affaissables ou effondrables (fontis).

Pour les ouvrages neufs, il établit une méthodologie d'aide à la décision permettant :

- d'évaluer les risques d'affaissement ou d'effondrement en fonction des contextes géologique et d'exploitation ;
- de déterminer si les risques de sollicitations entrent dans la gamme d'amplitude de perturbations techniquement admissibles par le bâti amélioré, en fixant des valeurs de seuils ;
- de définir les dispositions constructives à prendre pour que les perturbations atteignant la surface n'affectent pas dramatiquement le bâti futur.

Pour les ouvrages anciens, il propose des modes de confortement ou de réhabilitation.

Dans certains cas de figure, les gammes de sollicitations attendues seront telles qu'une construction nouvelle ne serait pas économiquement viable, tant les techniques à mettre en œuvre pour résister aux efforts ou y échapper seraient coûteuses. Il faudra alors rechercher un autre site pour la réalisation du projet.

Dans ces mêmes cas de figures, certaines constructions anciennes pourront être qualifiées de potentiellement dangereuses.

Nous rappelons que les méthodologies décrites dans cet ouvrage sont le fruit d'une synthèse et d'une sélection des méthodes existant à ce jour. D'autres techniques prometteuses sont en vue (géogrilles instrumentées, inclusions rigides). Elles pourront être utilisées lorsque les méthodes de dimensionnement auront été définies.

On gardera à l'esprit la nécessité de bien prendre en compte le mécanisme d'interface entre le sol et les structures qui conditionne le déplacement relatif sol/structure.

En tout état de cause, les réponses aux questions techniques soulevées dans cet article (notamment la quantification des phénomènes et le dimensionnement des renforcements) devront être apportées par des professionnels, familiers de ce type de contexte. Ainsi, les spécialistes en bâtiments et/ou structures, dépositaires d'informations locales, acteurs fréquents de ces études, ainsi que les bureaux d'études locaux ayant une bonne connaissance de la géologie et du contexte industriel, devront être impérativement consultés pour garantir la pertinence du processus de conception de l'ouvrage.

7. Références bibliographiques

- ABBASS FAYAD A. 2004. Etude de stabilité de fontis au toit des carrières souterraines et traitements apportés aux conséquences induites en surface. *Thèse INPL*, Ecole des Mines de Nancy, 18 juin 2004
- AISSAOUI K. 1999. Amélioration de la prévision des affaissements dans les mines à l'aide des approches empiriques, numériques et analytiques, *Thèse INPL*, pp 203.

- AL HEIB M. 2001 : Effets et conséquences des mouvements du sous-sol sur le bâti. Synthèse des principales méthodes de prévention et de protection. *Référence INERIS-DRS-01-25315/RN01*.
- AL HEIB M. 2001. Prévision des conséquences des affaissements miniers dans les mines de fer de Lorraine. Etude méthodologique pour la prévision de la cuvette d'affaissement. *Rapport INERIS-DRS-01-26146/RN02*.
- AL HEIB M., JOSIEN J.P., EL SHAYEB Y. 2003. Paramètres d'affaissement pour la hiérarchisation des zones à risque dans le bassin ferrifère lorrain, *Actes du colloque "Après-mine 2003"*, Nancy, 5-7 février 2003.
- BIDIM Geosynthetics. 1998. Les géotextiles pour le renforcement des ouvrages en terre, conception, spécifications, réalisations.
- COOPER H.A. et SAUNDERS M.J. 2002. Road and bridge construction across gypsum karst in England . *Engineering Geology* 65 (2002) 217 – 223. Publié par Elsevier Science B.V. on behalf of NERC : www.elsevier.com/locate/enggeo.
- DECK O. 2002. Etude des conséquences des mouvements de la surface sur les bâtiments et les ouvrages d'infrastructure. *Thèse INPL- Ecole des Mines de Nancy*.
- GOURC J.P., GIRAUD H. 1999. Le renforcement des remblais autoroutiers et ferroviaires sur zone d'effondrement localisé - expériences en vraie grandeur CD ROM du projet RAFAEL
- KEMPTON G. T. 1992. The use of reinforcement geotextiles to support road embankments over areas subjected to mining subsidence. *Highways and transportation*, pp. 21-31.
- PIGUET J.P., WOJTKOWIAK F. 2000. Affaissements et déformations au-dessus des exploitations minières : Mécaniques et évolution dans le temps. *Mines et Carrières –Industrie Minérale*, vol. 28, juin 2000, p. 36-47.
- TRITSCH J.J. 1995. *Evaluation des méthodes et du coût de la mise en sécurité des populations menacées par les risques d'effondrement de carrières*. INERIS ; Réf : SSE-JTr/CS 24EA03/R02.
- VILLARD P., GOURC J.P., and GIRAUD H. 2000. A geosynthetic reinforcement solution to prevent the formation of localized sinkholes. *Can. Geotech. J.* 37 : 987-999.
- VILLARD P., GOURC J.P., et BLIVET J.C. 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. *Revue française de géotechnique*, Volume 99, pp. 23 – 34.
- Rapport INERIS. 2004. L'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers. Réf. INERIS DRS-04-511198/R01 du 30 juin 2004.