

GUIDE METHODOLOGIQUE : LE DIAGNOSTIC DE STABILITE DES CARRIERES SOUTERRAINES ABANDONNEES

METHODOLOGICAL GUIDE FOR STABILITY ASSESMENT OF ABANDONNED UNDERGROUND QUARRIES

MATHON David¹, Charles KREZIAK², Reynald FLAHAUT¹, Nathalie BERENGER³, Frédéric MARTY⁴

¹ Cerema Normandie-Centre

² Cerema Ile-de-France

³ Cerema Méditerranée

⁴ Direction Interrégionale des Routes Méditerranée – SIR de Montpellier

RÉSUMÉ – Un nouveau guide méthodologique est paru aux éditions IFSTTAR sur le diagnostic des carrières souterraines abandonnées en septembre 2014. Après une partie introductive recensant les typologies de cavités concernées par le guide, celui-ci s'attache à décrire précisément tous les stades d'évolution d'une carrière souterraine (et de ses parties « porteuses ») dans l'optique de pouvoir établir un diagnostic de sa stabilité. Une démarche globale de diagnostic est suggérée de même que l'utilisation de certains outils (méthodes empiriques, analytiques ou numériques).

ABSTRACT – in September 2014, a new methodological guide was published by IFSTTAR about stability assesment of abandoned underground quarries. An introductory part describes all the types of cavities concerned by the guide. Then, it gives precise descriptions of all stages of degradation of an underground quarry (and particularly its bearing parts) in order to set the diagnosis. A global assesment approach is suggested as well as the use of technical tools (empirical, analytical or numerical processes).

1. Introduction et contexte

L'effondrement généralisé d'Issy-les-Moulineaux en 1961 (21 morts) ou plus récemment la disparition de deux personnes dans des fontis du massif de l'Hautil (Val d'Oise) en 1991 et de Neuville-sur-Authou (Eure) en 2001 permettent de prendre conscience de la dimension dramatique que revêtent parfois les instabilités des secteurs sous-cavés.

La perte en vies humaines est heureusement faible en comparaison aux nombreux phénomènes d'effondrement se produisant chaque année et qui provoquent d'importants dommages aux constructions et aux infrastructures.

Parmi les régions les plus exposées, on retrouve les bassins sédimentaires peuplés (bassin parisien et aquitain) et plus généralement toutes les zones ayant connu une activité extractive de matériaux de construction (Bourgogne, Provence, Jura...).

Les enjeux économiques associés à la présence de ces carrières souterraines sont considérables, l'instabilité potentielle des secteurs sous-cavés pénalise gravement le développement, la réhabilitation et la gestion des anciennes zones d'extraction.

La suppression totale du problème par comblement des cavités n'étant pas supportable financièrement par la collectivité, seule une gestion adaptée des zones sous-cavées, basée sur une évaluation précise des aléas, l'analyse des contraintes pour l'occupation du sol en surface et sur une programmation des travaux de confortement, est envisageable.

C'est dans cette perspective que l'écriture du guide méthodologique « diagnostic des carrières souterraines abandonnées » a été envisagée par le ministère chargé de la prévention des risques et confiée à l'IFSTTAR et au Cerema.

L'objectif était de transcrire dans un document une synthèse des méthodes de travail des Laboratoires Régionaux des Ponts et Chaussées, du LCPC et de l'Inspection Générale des Carrières d'Ile-de-France pour définir le degré de stabilité d'une carrière et son évolution probable à plus ou moins long terme.

Le document s'adresse principalement aux bureaux d'études et aux maîtres d'œuvre prescripteurs. Il intéressera également les maîtres d'ouvrages qui souhaitent approfondir leur connaissance dans le domaine des cavités souterraines.

2. Description des carrières souterraines

Les matériaux considérés sont les matières minérales non concessibles, suivant la terminologie juridique française. Les excavations souterraines pour l'extraction de minerai (même si les problématiques ont de larges plages communes) sont donc exclues du guide.

Les matériaux exploités en carrières souterraines sont en général classés dans les roches industrielles ou substances utiles, telles que les calcaires, la craie, le tuffeau, le gypse, le sable, le falun, le marbre, l'ardoise, etc.

2.1 Quelques éléments typologiques

Les termes employés dans le guide font l'objet d'un lexique détaillé placé en annexe. On notera toutefois l'usage fréquent de certains termes illustrés en figure 1.

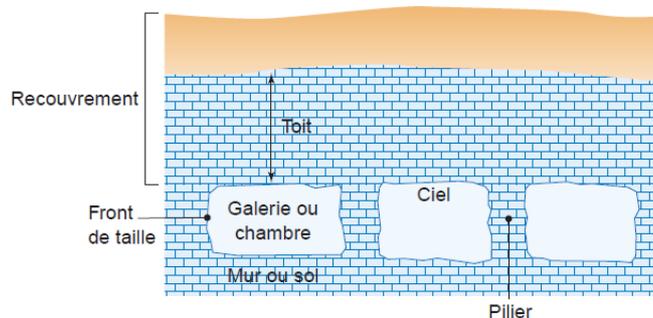


Figure 1 : Schéma des termes fréquemment utilisés en carrière

2.1. La description des différents types d'accès

Les carrières souterraines peuvent être caractérisées par leur accès. Ainsi ceux-ci peuvent se faire, selon la morphologie du site par puits, entrées en cavage ou descenderies avec ou sans boyau d'accès, voire par escaliers (fig. 2).

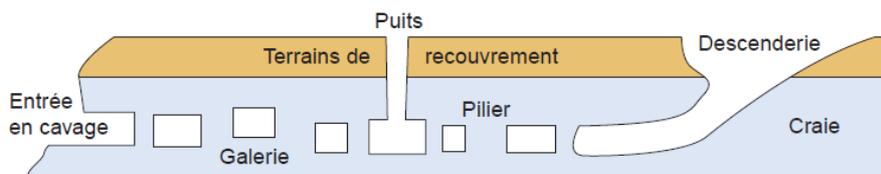


Figure 2 : Schéma synthétique des différents types d'accès

2.2 La description des différentes méthodes d'exploitation

La méthode d'exploitation d'une carrière souterraine correspond à l'ensemble des techniques utilisées pour dimensionner et extraire les matériaux de celle-ci. Ces techniques sont dépendantes de la topographie locale, de la géologie du site, de la nature, de l'épaisseur et des caractéristiques mécaniques du matériau extrait ainsi que du développement du savoir-faire et des moyens des carriers. Elles ont donc varié suivant les époques et les régions.

Un exemple est décrit ci-après : l'exploitation par chambres et piliers ou piliers tournés : C'est la méthode la plus répandue et la plus ancienne. Elle concerne principalement les matériaux calcaires et le gypse. La technique consiste à laisser des piliers de soutènement (en « tournant » autour - d'où le terme piliers tournés), dont la forme et l'alignement sont d'autant plus géométriques que les exploitations sont récentes (fig. 3).

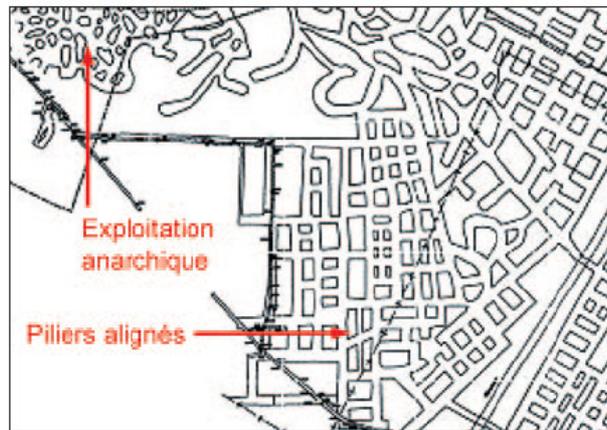


Figure 3 : Plan montrant un changement du mode d'exploitation

D'autres techniques d'exploitations ont été utilisées selon les contextes comme :

- La méthode par hagues et bourrages
- la méthode par galeries filantes ;
- la méthode par affaissement dirigé ;
- l'exploitation par galerie radiale et chambres (il s'agit principalement des excavations appelées « marnières » et destinées à l'amendement agricole) ;
- l'exploitation en forme de bouteille (particulièrement répandue dans les régions Nord et Est de la France)
- l'exploitation en rameaux, etc.

3. La description des désordres et des mécanismes associés

Ce chapitre constitue la partie la plus originale du guide dans le sens où toutes les typologies de désordres font l'objet d'une description détaillée faisant intervenir des notions de lithologie, de mécanique et introduisant l'existence de facteurs externes susceptibles de favoriser l'apparition de désordres.

Pour faciliter la lecture de l'article, nous sélectionnerons ici des désordres caractéristiques relevés en carrière qui concernent les piliers et renverrons le lecteur intéressé vers l'ouvrage intégral. De même, les facteurs externes susceptibles d'aggraver les désordres (eau, végétation, surcharges, etc.) ne sont pas évoqués dans l'article.

En ce qui concerne les piliers, on distinguera les piliers « homogènes » de ceux affectées par une discontinuité lithologique ou tectonique.

3.1. les piliers « homogènes »

En l'absence de grande discontinuité, les piliers constitués de matériaux plutôt homogènes et chargés de façon sub-verticale, peuvent présenter classiquement les désordres suivants :

- fissuration ou fracturation mécanique sub-verticale (fig. 4a) ;
- écaillages plus ou moins importants (fig. 4b et 4c) ;
- effacement des piliers par rupture en « diablo » (fig. 5).

Ces désordres traduisent le niveau d'endommagement croissant d'un pilier soumis à une charge excédant la résistance à la compression du matériau le constituant.



Figure 4a : Fissure mécanique dans un pilier d'une carrière de calcaire grossier



Figure 4b : Petit écaillage d'un pilier



Figure 4c : Écaillage important d'un pilier d'une carrière de calcaire grossier



Figure 5 : Pilier en diablo dans une carrière de gypse

3.2. les piliers « hétérogènes »

Dans certains cas, des variations ponctuelles de la lithologie des piliers peuvent occasionner des désordres particuliers n'affectant qu'une partie du pilier. Ainsi, lorsque deux niveaux de raideurs distinctes se superposent, on assiste à des phénomènes de traction-cisaillement au sein du pilier et les terrains les plus tendres fluent sous l'effet de la charge.

A l'échelle du pilier, cette superposition peut entraîner une dégradation différenciée selon les niveaux de résistance et/ou déformabilité de la roche, particulièrement mise en évidence sur la figure 6.



*Niveau A : banc de gypse massif.
Niveau B : niveau tendre stratifié fortement fracturé
sous l'effet de la traction.*

Figure 6 : Ruine d'un niveau d'un pilier de gypse

Les discontinuités dans les piliers peuvent également provenir de phénomènes tectoniques, notamment dans les matériaux tendres.

4. Le diagnostic de stabilité

4.1 Définition

Schématiquement, le diagnostic de stabilité d'une carrière souterraine consiste à :

- évaluer son état de stabilité ;
- prévoir son évolution à plus ou moins long terme ;
- estimer l'aléa mouvement de terrain résultant de cette évolution en carrière et en surface.

Le diagnostic peut-être accompagné :

- de recommandations de mesures de sécurité et/ou de travaux de confortement et /ou de surveillance ;
- de la fourniture des éléments nécessaires au pré-dimensionnement ou au dimensionnement des mesures préconisées (selon le niveau de diagnostic).

Le dimensionnement des travaux de confortement et la surveillance des carrières ne sont pas inclus dans le diagnostic. Ils feront l'objet, le cas échéant, d'une mission spécifique (qui peut être définie selon la norme NF P 94-500).

4.2 Différents niveaux de diagnostic

4 types de diagnostic sont définis dans le guide en fonction des objectifs recherchés, des moyens à mettre en œuvre et du temps requis pour les mener à bien. Le tableau de la figure 7 les décrit succinctement.

Niveau	Objectif du diagnostic	Éléments nécessaires au diagnostic	Outils du diagnostic	Temps requis
Diagnostic d'urgence	Donner un avis d'expert sur les conséquences de l'évolution d'une carrière	Visite du site (appréciation de l'influence de l'environnement de la carrière et de son état de dégradation)	Expérience du géotechnicien (synthèse des données existantes)	De quelques heures (situation d'urgence) jusqu'à 2-3 jours
N1	Qualifier la stabilité de la carrière	Visite du site + cartographie (géométrie des vides et désordres) + caractérisation de l'environnement géologique	Cartographie géotechnique + modèles empiriques	Quelques jours à une semaine
N2	Quantifier de façon approchée la stabilité de la carrière	Niveau 1 + élaboration d'un modèle géomécanique	Mise à jour de la cartographie géotechnique + modèles analytiques	Plusieurs semaines à quelques mois
N3	Quantifier précisément le comportement mécanique de la carrière et/ou son évolution	Niveau 2 + instrumentation et /ou logiciel de calcul	Interprétation du suivi et/ou modélisation numérique	Plusieurs mois à quelques années

Figure 7 : définition des différents types de diagnostics

Dans le cas d'une situation d'urgence et/ou si des vies sont menacées, un diagnostic d'urgence permet de réagir rapidement. Ce diagnostic, ou avis d'expert, s'appuie sur un examen visuel et l'expérience du géotechnicien face à des situations similaires. Il se traduit classiquement par la proposition de mesures de mise en sécurité. Si le maître d'ouvrage ne les considère pas acceptables (usage, économie, enjeu humain), la démarche de diagnostic pourra être poursuivie (niveau 1 voire niveau 2).

Sur une zone à enjeux ou suite à un diagnostic d'urgence, un diagnostic de niveau 1 peut être engagé. Il consiste en un examen approfondi de la carrière et de son environnement. L'utilisation de règles empiriques peut permettre de conforter le géologue / géotechnicien dans son avis.

Un diagnostic de niveau 2 pourra être engagé dans plusieurs cas :

- la carrière impacte des enjeux forts et un diagnostic qualitatif n'est pas suffisant ;
- le coût des travaux est élevé et il est nécessaire de rationaliser l'utilisation des crédits de travaux disponibles.

Le diagnostic de niveau 2 consiste essentiellement en une étude géomécanique qui complète les investigations d'un diagnostic de niveau 1, il peut également comprendre une instrumentation légère pour évaluer la cinétique globale des phénomènes constatés. L'élaboration d'un diagnostic de niveau 2 est quasiment impossible à réaliser pour une carrière inaccessible.

Si les enjeux sont très forts ou le site stratégique, un diagnostic de niveau 3 peut être entrepris. Il comprendra les éléments permettant de confirmer le diagnostic de niveau 2 tels que :

- une instrumentation menée sur une période suffisante ;
- des outils numériques appropriés ;
- toute autre méthode de reconnaissance adaptée (géophysique par exemple).

Une logique d'enchaînement des niveaux de diagnostic est proposée sur le logigramme ci-dessous (fig. 8) :

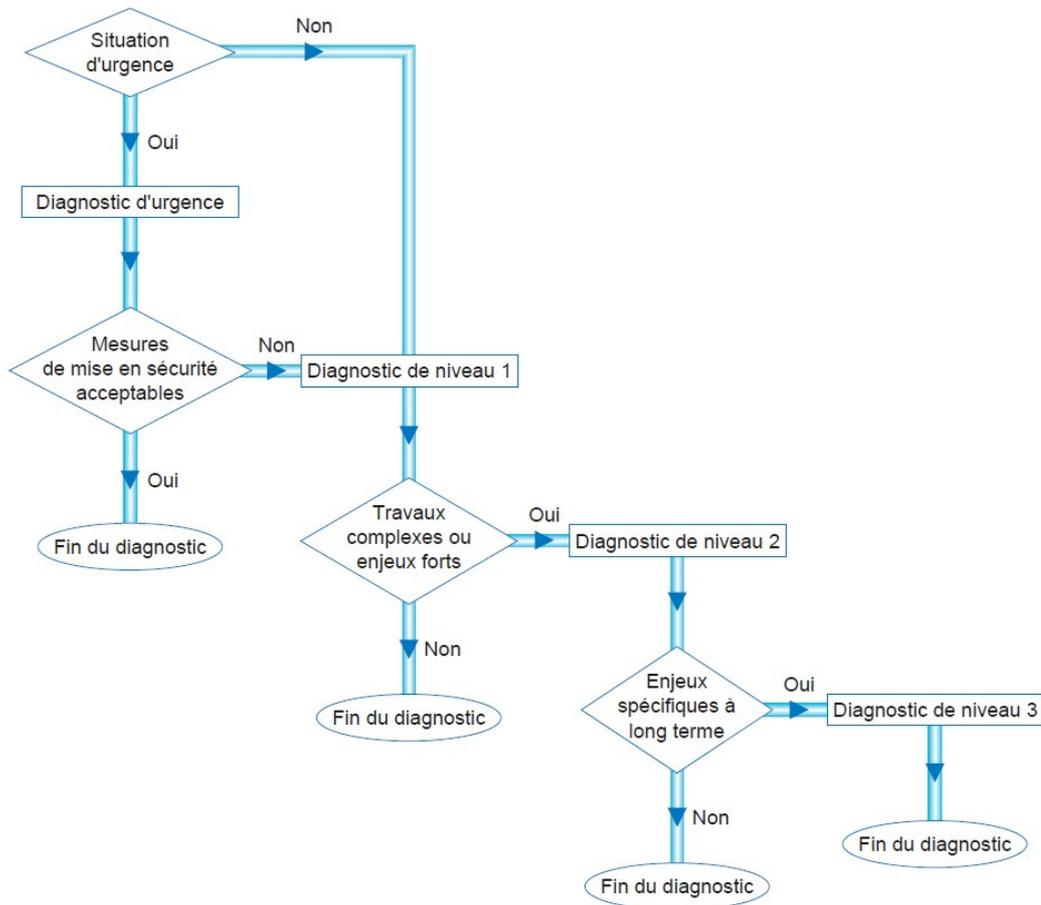


Figure 8 : : Logigramme d'organisation des différents niveaux de diagnostic

4.3 Déroutement classique d'un diagnostic de stabilité d'une carrière

La réalisation d'un diagnostic peut consister à réaliser successivement les étapes suivantes :

4.3.1 La définition d'un périmètre d'étude

Le périmètre d'étude doit être fixé en relation avec l'objectif (les enjeux et le niveau) du diagnostic, les aléas supposés ainsi que l'environnement influençant ces derniers.

4.3.2 L'acquisition des données nécessaires

Selon le niveau de diagnostic visé et l'accessibilité de la carrière souterraine, une démarche logique d'acquisition de données est proposée dans le guide afin de collecter l'ensemble des données nécessaires.

4.3.3 Mise en évidence des mécanismes d'évolution des différentes parties de la carrière

L'interprétation des données collectées amène à définir les mécanismes d'évolution de la carrière et les zones concernées par d'éventuelles instabilités. Les mécanismes identifiés peuvent, dans certains cas, se cumuler (par exemple : une zone présentant des piliers fortement dégradés, et touchée également par une instabilité de la voûte).

4.3.4 Formulation du diagnostic

Pour chaque zone préalablement identifiée et chaque type d'évolution envisagé, un diagnostic de l'état actuel est formulé et un schéma d'évolution prévisible selon une

échelle de temps (court, moyen ou long terme) est décrit. Pour une carrière de vaste étendue, cela peut prendre la forme d'une cartographie d'aléa de surface.

5. Les éléments nécessaires au diagnostic

L'établissement d'un diagnostic de qualité nécessite de rassembler les données existantes et d'en acquérir de nouvelles. Le guide décrit dans le détail la nature, la provenance et le degré de précision nécessaire de ces données afin de disposer d'éléments exploitables et atteindre le niveau de diagnostic souhaité.

Ces données sont de différentes natures ; on citera notamment :

- les données existantes en bibliographie qui peuvent comprendre des informations géologiques, hydrogéologiques, historiques, cartographiques ou même géotechniques ;
- les reconnaissances et investigations de terrain comprenant notamment le relevé géométrique de la carrière et le relevé de ces désordres (fig. 9). C'est à ce stade que les descriptions des désordres (§2) prennent toute leur importance. Il convient en effet de clairement identifier les mécanismes associés à ces désordres.

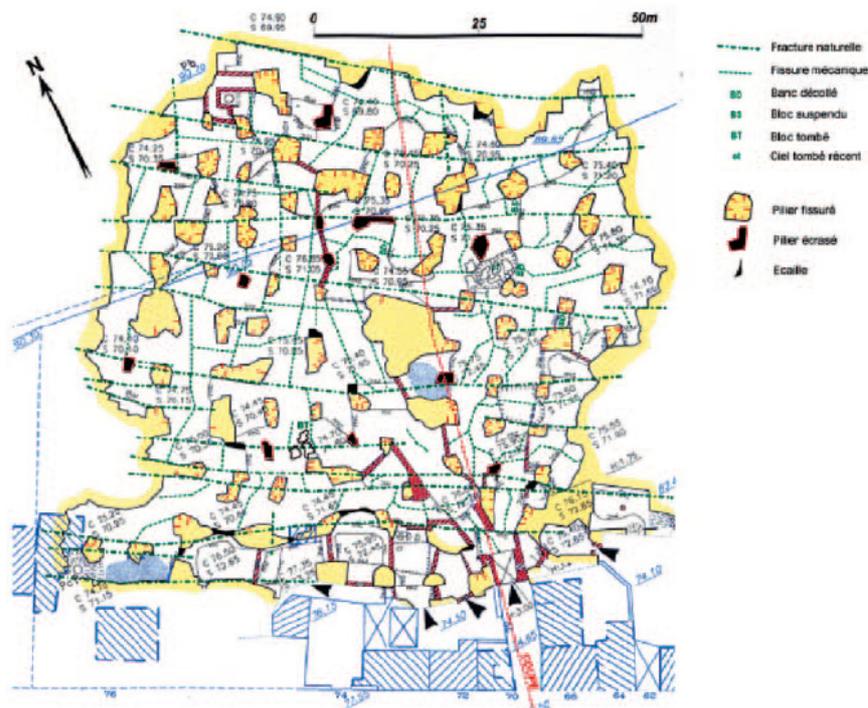


Figure 9 : relevé de désordres dans une carrière de calcaire grossier

Un tableau récapitulatif des moyens à mettre en oeuvre en fonction du niveau de diagnostic visé est proposé ci-après (fig. 10)

Éléments	Moyens	Niveaux de diagnostic			
		DU	N1	N2	N3
Données existantes					
Données géologiques et hydrogéologiques	• Carte géologique et hydrogéologique, BSS • Bibliographie (rapports, thèses, articles...)				
Données historiques sur l'exploitation	• Archives écrites • Archives numériques • Enquêtes orales			*	*
Données issues de supports cartographiques	• Carte topographique et géomorphologique, toponymie • Cadastre • Modèle numérique de terrain				
Données issues de la télédétection	• Images aériennes				
Données géomécaniques	• Bibliographie				
Données sur l'environnement de la carrière	• Bibliographie, plans, schéma d'assainissement...				
Reconnaisances et investigations de terrain					
Environnement de la carrière	• Visite de terrain, observation • Études spécifiques (topographie, hydraulique, vibrations, réseaux...)			*	*
Géologie et hydrogéologie	• Observation • Levés géologiques • Sondages • Suivi piézométrique			*	*
Géométrie de l'exploitation	• Levé métrique - Géométrie globale • Levé décimétrique - Plan de détail				
Relevé de désordres	• Observation, photographies, description succincte • Description détaillée et localisation précise			*	*
Données géomécaniques	• Essais de laboratoire • Essais <i>in situ</i> (dont géophysique)				
Données acquises sur le long terme	• Visite régulière • Instrumentation				

■ Inadapté
 ■ Possible
 ■ Indispensable
 * Mise à jour ou complément

Figure 10 : adaptation des moyens d'étude au niveau de diagnostic recherché

6. Evaluation de la stabilité

Cette partie du guide décrit et explique le mode d'emploi des outils disponibles pour réaliser des diagnostics. Elle décrit successivement :

- des méthodes naturalistes et empiriques (cartographie géotechnique, règles régionales...) permettant d'évaluer et de cartographier les secteurs à risques ;
- des méthodes calculatoires (analytiques et numériques) permettant d'approcher quantitativement la stabilité d'un secteur ou d'un élément porteur de la carrière.

Quelques méthodes non décrites par ailleurs en bibliographie sont détaillées ici :

6.1 La cartographie géotechnique

La cartographie géotechnique permet de représenter et de localiser les désordres et les différents mécanismes d'évolution affectant la carrière.

L'élaboration de cette cartographie nécessite de relever précisément :

- les caractéristiques géométriques de la carrière ;
- les désordres en carrière et en surface ;
- les conditions environnementales ;

et de les reporter sur un plan dont l'échelle est adaptée au niveau de diagnostic recherché (fig.11).

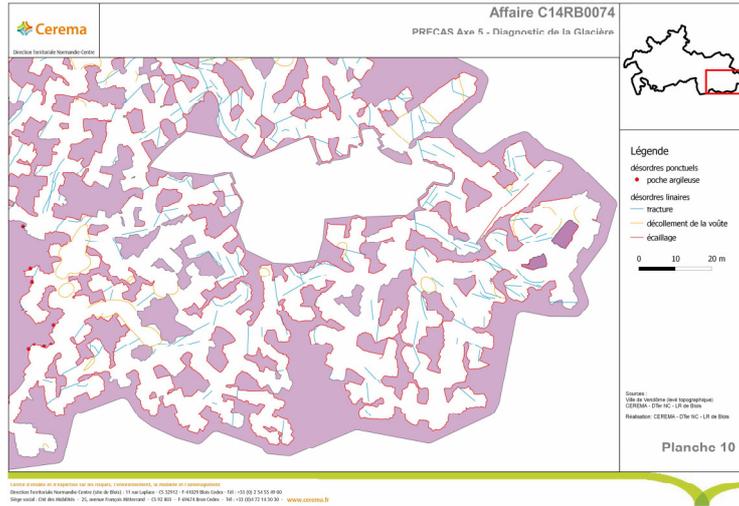


Figure 11 : extrait d'une cartographie géotechnique

Sur la base de cette première carte, des zones ayant les mêmes caractéristiques (typologie de désordre et géométrie) sont individualisées. Sur chacune des zones identifiées, les informations collectées précédemment sont croisées avec le modèle géologique et hydrogéologique, ce qui conduira à établir un scénario de dégradation plausible de la carrière et son incidence potentielle en surface.

Ces informations peuvent être traduites sous la forme d'une cartographie de zonage (fig. 12) qui alimente l'avis qualitatif sur son niveau général de dégradation.

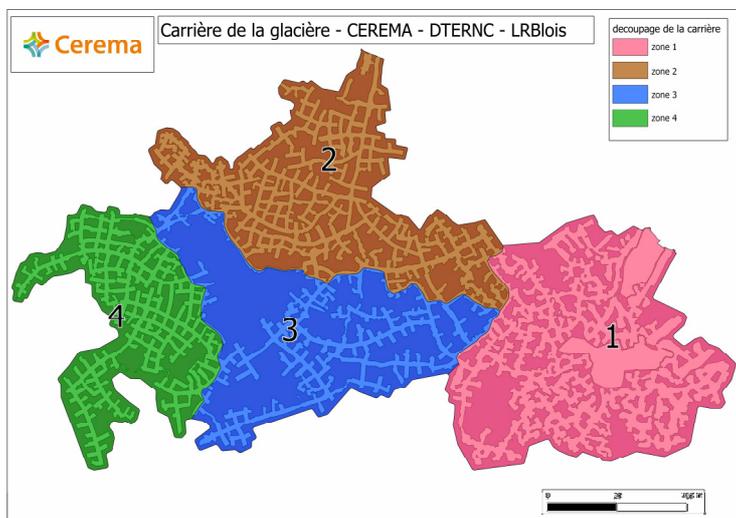


Figure 12 : cartographie de zonage d'une carrière souterraine

6.2 Les règles empiriques régionales

Les règles empiriques régionales permettent de fixer un certain nombre de configurations et de pouvoir donner des réponses rapides à des questions impliquant des enjeux importants. Le guide reprend plusieurs règles connues des géotechniciens (Vachat, Thoraval...) et en expose de nouvelles.

6.2.1 L'instabilité liée à la proximité de la vallée

Le retour d'expérience régional (régions Centre et Pays de Loire) permet d'indiquer que, sur un développement souterrain* équivalent à la hauteur du coteau, l'influence du phénomène de décompression est, dans la majorité des cas, prépondérante dans l'évaluation de la stabilité d'une carrière souterraine de tuffeau calcaire.

** le « développement souterrain » correspond ici à une distance horizontale de pénétration de la carrière dans le massif à partir de l'entrée en cavage*

6.2.2 Caractérisation de la géométrie des fontis dans un bassin de risque en Seine-et-Marne

Dans ce bassin de risques, les exploitations d'environ 4 mètres de haut, situées à près de 50 mètres de profondeur, génèrent des effondrements d'un diamètre moyen de 8 mètres. Dans 90 % des cas les effondrements ont un diamètre inférieur à 20 mètres.

En s'appuyant sur ces constatations, il a été retenu, avec un coefficient de sécurité jugé satisfaisant, une zone tampon de 20 mètres autour des zones sous-cavées dans laquelle les terrains pourraient être emportés par la venue au jour d'un fontis se produisant en limite d'exploitation.

6.2.3 Extension des terrains susceptibles d'être déstabilisés par l'effondrement de marnières

Les données actuellement exploitées par le Cerema de Rouen montrent que, pour les départements de l'Eure et de la Seine-Maritime, 90 % des marnières ont une extension inférieure ou égale à 50 mètres (distance entre les bords extrêmes).

La zone d'influence d'une marnière est estimée à 15 à 20 mètres, c'est à dire que des désordres peuvent apparaître 15 à 20 mètres au-delà des limites de la marnière, compte tenu du cône d'effondrement susceptible de se créer notamment dans les argiles et surtout dans les limons.

Ces éléments font partie des critères repris par les services de l'État pour déterminer des zones inconstructibles à proximité des indices de cavités souterraines.

6.3 Les méthodes analytiques

Le guide reprend la description de la méthode de l'aire tributaire (par ailleurs largement documentée), développe une approche sur modèle locaux de toit issue de la résistance des matériaux (poutre, dalle...) et enfin présente une approche originale permettant d'évaluer l'auto-comblement d'un fontis (Delfaut). Cette approche est détaillée ci-dessous :

Lors de l'effondrement des terrains de couverture à l'intérieur de la cloche de fontis, le foisonnement des matériaux peut conduire à l'auto-comblement de l'effondrement : le volume foisonné est supérieur au volume du vide accessible.

Connaissant les coefficients de foisonnement des terrains du recouvrement (tableau de la figure 13), l'angle de talus des terrains éboulés et la géométrie des vides, il est théoriquement possible de calculer la hauteur de montée d'une cloche de fontis (S) et donc de déterminer la probabilité que le désordre atteigne la surface.

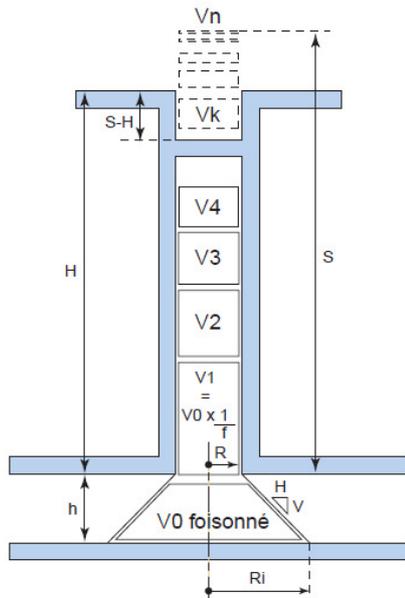


Tableau 4

Nature de terrain	Coefficient de foisonnement (f)	
	Matériau sec	Matériau humide ou saturé
Graves et sables alluvionnaires	1,25 à 1,30	1,15 à 1,20
Sables fins	1,25 à 1,30	1,20 à 1,30
Marnes et argiles cohérentes	1,35 à 1,40	1,25 à 1,35
Calcaire et craie	1,30 à 1,40	1,30 à 1,35
Roche	1,40 à 1,65	1,40 à 1,65

Tableau indicatif de valeurs de coefficient de foisonnement. (A. Delfaut, 2007)

Figure 13 : schéma explicatif de la méthode analytique proposée

La formule donnant S (montée de fontis) est la suivante :

$$S = V_0 / \pi R^2 (f - 1)$$

Avec :

- R diamètre de la cheminée de fontis (m) ;
- V_0 volume initial des vides (m³) ;
- f coefficient de foisonnement du matériau
- S hauteur de montée de fontis (m).

Cette approche analytique simple paraît séduisante, toutefois il convient d'être très prudent pour son application. En effet, les incertitudes liées aux coefficients de foisonnement et aux angles de talus des matériaux sont telles (fourchette de valeurs en fonction de la présence ou non d'eau) que les résultats peuvent être divergents selon les valeurs retenues.

7. Conclusions et enseignements

La rédaction du guide méthodologique « diagnostic des carrières souterraines abandonnées » s'appuie sur l'expérience de géotechniciens du Cerema et de l'IFSTTAR particulièrement confrontés à cet aléa.

Techniquement, la démarche proposée s'appuie principalement sur une description qualitative des désordres observés appuyée sur des informations topographiques dont la précision doit être adaptée au niveau de diagnostic. Ces désordres sont à mettre en relation avec des mécanismes d'évolution prévisibles afin d'aboutir au diagnostic final. L'usage d'une cartographie géotechnique des désordres est donc clairement à privilégier.

Quantitativement, des outils particuliers (méthodes empiriques, analytiques, etc.) sont présentés, ils permettent, dans certaines situations, de répondre à une question précise liée à l'aménagement de surface ou à l'urgence de l'intervention. Il est important de préciser que ces méthodes ne se substituent à aucun moment à la démarche qualitative.

Enfin, d'un point de vue méthodologique, 4 niveaux de diagnostic sont proposés selon les demandes du maître d'ouvrage et le contexte de l'intervention. Ces 4 niveaux sont liés et permettent une progressivité des investigations nécessaires à l'établissement d'un diagnostic de qualité.

8. Bibliographie

- Delfaut A. (2007). Méthode d'évaluation des hauteurs de montée d'un fontis en sol meuble. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées n°266*. pp 3-22
- LCPC. (2002). Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines. *Guide technique. Collection Environnement Risques Naturels, 130 pages.*
- INERIS - LCPC (2005). Evaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées. Séminaire de restitution et de valorisation des travaux. *Actes des journées scientifiques du LCPC. ENPC, 11 mai 2005. 303 pages*
- LCPC. (2008). Les marnières de Haute-Normandie, méthodologie d'étude et de prévention. *Guide technique. 112 pages.*