



**HAL**  
open science

## Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées. Guide méthodologique

N Berenger, R Flahaut, D Mathon, C Kreziak, F Marty

### ► To cite this version:

N Berenger, R Flahaut, D Mathon, C Kreziak, F Marty. Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées. Guide méthodologique. INSTITUT FRANCAIS DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DES TRANSPORTS, DE L'AMENAGEMENT ET DES RESEAUX - IFSTTAR, 105p, bibliogr., lexique, fig, photos, 2014, GUIDE TECHNIQUE, 978-2-7208-2617-7. hal-01213555

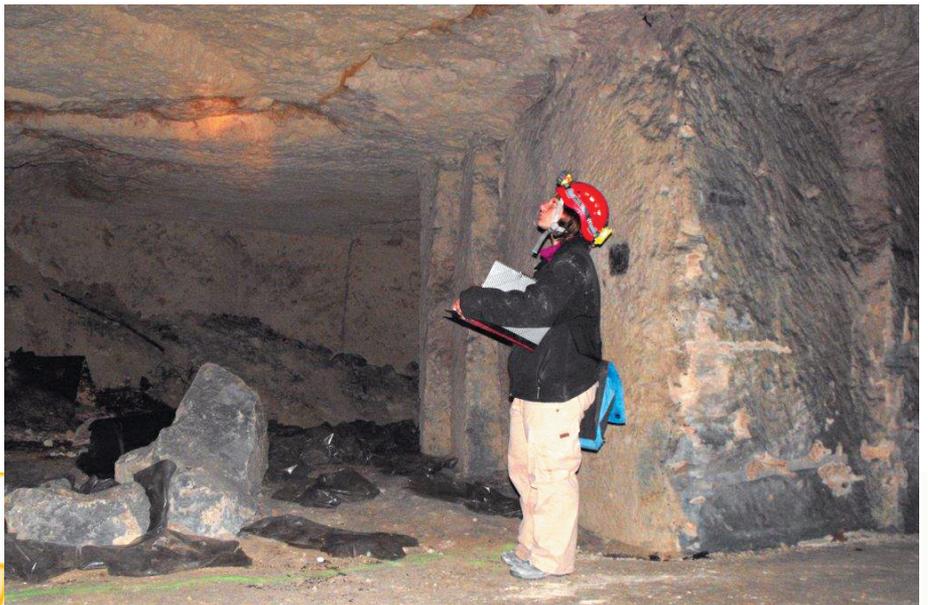
**HAL Id: hal-01213555**

**<https://hal.science/hal-01213555>**

Submitted on 8 Oct 2015

**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.



Guide technique

**Le diagnostic de stabilité  
des carrières souterraines  
abandonnées**

Guide méthodologique

Conformément à la note du 04/07/2014 de la direction générale de l'Ifsttar précisant la politique de diffusion des ouvrages parus dans les collections éditées par l'Institut, la reproduction de cet ouvrage est autorisée selon les termes de la licence CC BY-NC-ND. Cette licence autorise la redistribution non commerciale de copies identiques à l'original. Dans ce cadre, cet ouvrage peut être copié, distribué et communiqué par tous moyens et sous tous formats.



Attribution — Vous devez créditer l'Oeuvre et intégrer un lien vers la licence. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens possibles mais vous ne pouvez pas suggérer que l'Ifsttar vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son Oeuvre.



Pas d'Utilisation Commerciale — Vous n'êtes pas autorisé à faire un usage commercial de cette Oeuvre, tout ou partie du matériel la composant.



Pas de modifications — Dans le cas où vous effectuez une adaptation, que vous transformez, ou créez à partir du matériel composant l'Oeuvre originale (par exemple, une traduction, etc.), vous n'êtes pas autorisé à distribuer ou mettre à disposition l'Oeuvre modifiée.

## Le patrimoine scientifique de l'Ifsttar

Le libre accès à l'information scientifique est aujourd'hui devenu essentiel pour favoriser la circulation du savoir et pour contribuer à l'innovation et au développement socio-économique. Pour que les résultats des recherches soient plus largement diffusés, lus et utilisés pour de nouveaux travaux, l'Ifsttar a entrepris la numérisation et la mise en ligne de son fonds documentaire. Ainsi, en complément des ouvrages disponibles à la vente, certaines références des collections de l'INRETS et du LCPC sont dès à présent mises à disposition en téléchargement gratuit selon les termes de la licence Creative Commons CC BY-NC-ND.

Le service Politique éditoriale scientifique et technique de l'Ifsttar diffuse différentes collections qui sont le reflet des recherches menées par l'institut :

- Les collections de l'INRETS, Actes
- Les collections de l'INRETS, Outils et Méthodes
- Les collections de l'INRETS, Recherches
- Les collections de l'INRETS, Synthèses
- Les collections du LCPC, Actes
- Les collections du LCPC, Etudes et recherches des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Rapport de recherche des laboratoires des ponts et chaussées
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Guide technique
- Les collections du LCPC, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées, Méthode d'essai



Institut Français des Sciences et Techniques des Réseaux,  
de l'Aménagement et des Transports  
14-20 Boulevard Newton, Cité Descartes, Champs sur Marne  
F-77447 Marne la Vallée Cedex 2

Contact : [diffusion-publications@ifsttar.fr](mailto:diffusion-publications@ifsttar.fr)

[www.ifsttar.fr](http://www.ifsttar.fr)





# Le diagnostic de stabilité des carrières souterraines abandonnées

Guide méthodologique

Septembre 2014



**Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux**

14-20, boulevard Newton  
Cité Descartes - Champs-sur-Marne  
77447 Marne-la-Vallée CEDEX 2

Ce guide a été réalisé avec le soutien de la DGPR, par un groupe de travail composé de :

**N. Bérenger**, Cerema, DTer Ouest ;  
**R. Flahaut** et **D. Mathon**, Cerema, DTer Normandie Centre ;  
**C. Kréziak**, Cerema, DTer Île-de-France ;  
**F. Marty**, Cerema, DTer Méditerranée .

À partir d'une version initiale rédigée par :

**P. Potherat** et **S. Dupray**, CETE Lyon ;  
**B. Cailleux** et **A. Hirschauer**, CETE Île-de-France ;  
**G. Lyon**, CETE Méditerranée ;  
**P. Alfonsi**, Ifsttar ;  
**J.-L. Maire**, IGC Versailles.

Relecture et consultation régulière de **J.-L. Durville**, CGEDD

D'autres personnes ont participé activement à l'amélioration du document :

**C. Adam**, **C. Boulay-Matignon** et **C. Tissier**, Cerema, DTer Normandie Centre ;  
**Y. Boussafir**, Ifsttar  
**L. Dubois**, Cerema, DTer Centre-Est ;  
**F. Hedou**, DGPR ;  
**D. Virely**, Cerema, DTer Sud-Ouest ;  
**E. Vanoudheusden**, **C. Mathon** et **S. Gourdiér**, BRGM ;  
**J.-M. Watelet**, **M. Al Heib**, INERIS.

Crédits photos :

CETE Île-de-France, Lyon, Normandie-Centre, Ouest, Sud-Ouest, Nord-Picardie, Méditerranée et Est  
BRGM, INERIS, SEISM, IGC Paris, IGC Versailles, Conseil général de Gironde, département et préfecture  
de Seine-Maritime, archives départementales de l'Eure, IGN.

En couverture : inspection de cavité souterraine avec relevé de désordres  
(photo Cerema, DTer Normandie Centre)

Pour commander cet ouvrage :

**Librairie Ifsttar**

Service Politique éditoriale scientifique et technique  
25, avenue François Mitterrand  
Case 24  
69675 BRON Cedex

diffusion-publications@ifsttar.fr

Au 1er janvier 2011, le LCPC (Laboratoire central des ponts et chaussées) a fusionné avec l'INRETS (Institut national de recherche sur les transports et leur sécurité) pour former un nouvel institut de recherche, l'Ifsttar (Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux).

Au 1er janvier 2014, les 8 CETE, le Cetmef, le Certu et le Sétra ont fusionné pour former le Cerema (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement).

**Prix : 36 euros HT**

Ce document est propriété de  
l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux,  
et ne peut être reproduit, même partiellement, sans l'autorisation de son Directeur général  
(ou de ses représentants autorisés)

© 2014 - LCPC

ISBN 978-2-7208-2617-7

# Sommaire

## Chapitre 1. Les carrières souterraines : origine et description

<b>1. Introduction</b> .....	5
1.1 Éléments de contexte .....	5
1.2 Problématique .....	9
1.3 Objectifs du guide .....	9
<b>2. Les carrières souterraines</b> .....	11
2.1 Les matériaux exploités et leur usage .....	11
2.2 Les différents types d'accès .....	11
2.3 Les différentes méthodes d'exploitation .....	12
<b>3. Les autres types de cavités</b> .....	21
3.1 Les habitations troglodytiques .....	21
3.2 Les souterrains et refuges .....	21
3.3 Les sapes de guerre .....	22

## Chapitre 2. La typologie des désordres et les mécanismes associés

<b>1. Facteurs influençant la stabilité d'une carrière souterraine</b> .....	23
1.1 Facteurs intrinsèques .....	23
1.2 Facteurs externes .....	25
<b>2. Description des désordres</b> .....	29
2.1 Désordres au niveau des accès .....	29
2.2 Désordres en carrière .....	31
2.3 Désordres en surface .....	40

## Chapitre 3. Le diagnostic de stabilité

<b>1. Qu'est-ce qu'un diagnostic ?</b> .....	43
<b>2. Définition des niveaux de diagnostic</b> .....	43
<b>3. Principes de réalisation d'un diagnostic</b> .....	46
3.1 Définition du périmètre d'étude .....	46
3.2 Acquisition des données nécessaires .....	46
3.3 Mise en évidence des mécanismes d'évolution des différentes parties de la carrière .....	47
3.4 Formulation du diagnostic (qualification et zonage d'aléa) .....	47
<b>4. Les résultats attendus pour chaque niveau</b> .....	47
4.1 Diagnostic d'urgence .....	47
4.2 Diagnostic de niveau 1 .....	47
4.3 Diagnostic de niveau 2 .....	48
4.4 Diagnostic de niveau 3 .....	48
<b>5. Suites du diagnostic</b> .....	49
5.1 Mesures de sécurité consécutives à un diagnostic .....	49
5.2 Surveillance .....	49
5.3 Travaux de confortement .....	50

## Chapitre 4. Éléments nécessaires au diagnostic

<b>1. Exploitation des données existantes</b> .....	53
1.1 Données géologiques et hydrogéologiques .....	53
1.2 Données historiques .....	54
1.3 Données issues des supports cartographiques .....	56
1.4 Données issues de la photo-interprétation .....	57
1.5 Données géomécaniques .....	58
1.6 Données sur l'environnement de la carrière .....	58
<b>2. Reconnaissances et investigations de terrain</b> .....	58
2.1 Environnement de surface de la carrière .....	58
2.2 Géologie et hydrogéologie du site .....	58
2.3 Géométrie de l'exploitation .....	59
2.4 Relevé des désordres .....	61
2.5 Données géomécaniques .....	63
<b>3. Données acquises sur le long terme (suivi de l'évolution)</b> .....	66
3.1 Visites régulières .....	66
3.2 Instrumentation .....	67
<b>4. Éléments requis et moyens à mettre en œuvre par niveau de diagnostic</b> .....	70

## Chapitre 5. Évaluation de la stabilité

<b>1. Description des outils disponibles</b> .....	71
1.1 La cartographie géotechnique (cas d'une carrière accessible) .....	71
1.2 Les règles empiriques régionales .....	72
1.3 Les méthodes analytiques .....	78
1.4 Les modèles numériques .....	83
1.5 L'interprétation du suivi d'un site .....	86
<b>2. Exemples d'application</b> .....	87
2.1 Exemple de diagnostic d'urgence : intervention à la suite d'un effondrement à Mayet (Sarthe) - <i>Source : CETE de l'Ouest</i> .....	87
2.2 Exemple de diagnostic de niveau 1 : zonage de l'aléa cavité dans le cadre d'un plan de prévention des risques mouvement de terrain multi-aléa - <i>Source : CETE de l'Ouest</i> .....	89
2.3 Exemple de diagnostic de niveau 2 : étude de stabilité et préconisation de confortement - <i>Source : CETE Île-de-France</i> .....	91

<b>Annexe</b> .....	95
---------------------	----

<b>Références bibliographiques</b> .....	101
------------------------------------------	-----

<b>Lexique</b> .....	103
----------------------	-----

## Chapitre 1

# Les carrières souterraines : origine et description

## 1. Introduction

L'exploitation de matériaux en souterrain remonte à la Préhistoire. Cette activité s'est considérablement accrue dès le Moyen-Âge pour culminer aux 18<sup>e</sup> et 19<sup>e</sup> siècles. L'extension des villes, la construction des châteaux et des cathédrales, ont nécessité l'ouverture de nombreuses carrières souterraines.

Une autre finalité de l'activité extractive en sous-sol a concerné le besoin d'améliorer la production agricole des sols acides par épandage de matières fertilisantes telles que la craie marneuse.

Ces exploitations étaient généralement situées à proximité du cœur historique de l'agglomération (pour les matériaux de construction) ou des exploitations agricoles (pour les matériaux d'amendement). Compte tenu du développement urbain, des quartiers nouveaux se sont développés au droit de ces carrières souterraines aujourd'hui abandonnées et qui connaissent, compte tenu de leur âge et de leurs caractéristiques d'exploitation, de nombreux problèmes de stabilité.

### 1.1 Éléments de contexte

#### 1.1.1 Éléments historiques

Les besoins en roches industrielles, que ce soit pour les matériaux de construction ou pour d'autres usages (amendement des sols, poterie, industrie du papier, etc.), ont nécessité l'ouverture de nombreuses carrières, aussi bien à ciel ouvert qu'en sous-sol.

L'ouverture d'une carrière souterraine répondait alors à deux impératifs :

- il permettait au carrier de ne pas manipuler les matériaux de recouvrement (non exploitables) et préservait l'usage du terrain en surface ;
- il permettait, dans certains cas, d'extraire les matériaux à proximité de leurs lieux d'emploi pour en réduire les coûts de transport.

Les premières exploitations souterraines ont pu naître au Néolithique, il y a quelques 6000 à 8000 ans par l'extraction de rognons de silex utilisés comme outils domestiques, ainsi qu'en attestent les nombreux puits découverts à Jablines (Seine-et-Marne) ou dans le Hainaut belge. L'ancienne carrière de silex située sur le tracé de la RN 118, entre le Pont de Sèvres et le Petit Clamart (fig. 1) en est également l'illustration.

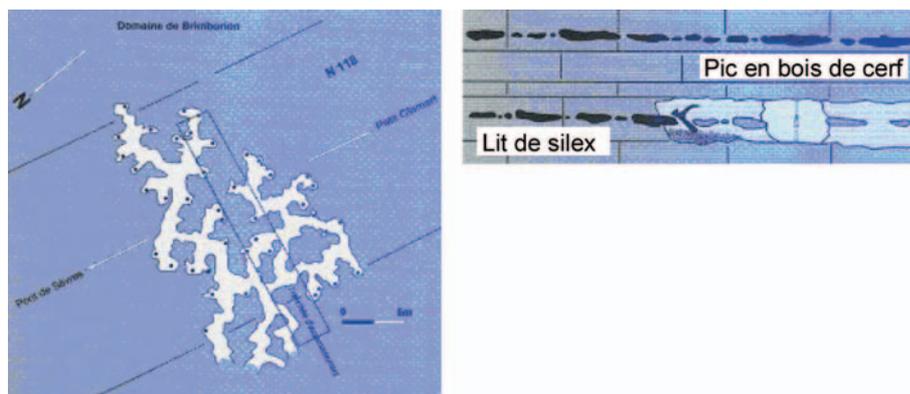


Figure 1

Plan d'une carrière d'âge néolithique destinée à exploiter le silex de la craie

Source : CETE Île-de-France

## Chapitre 1

Si la capacité des romains à extraire des matériaux en sous-sol ne fait pas de doute, il n'en demeure pas moins que l'activité liée aux carrières souterraines est restée confidentielle au cours du premier millénaire, et simplement réservée à la construction des édifices religieux du 6<sup>e</sup> siècle au Moyen-Âge.

À partir du Moyen-Âge, le développement de villes fortifiées, la multiplication des châteaux-forts, des abbayes et monastères, des églises et des cathédrales, ont demandé des pierres de construction de bonne qualité nécessitant la création de nouvelles carrières (fig. 2).

L'activité extractive (quel que soit son usage) est restée importante au moins jusqu'à la fin du 19<sup>e</sup> siècle avec le développement des villes. À la suite d'incidents répétés, elle a fait l'objet d'édits royaux et de décrets impériaux permettant de fixer les premières règles de dimensionnement des vides pour en assurer la stabilité en cours d'exploitation. Par la suite, le recensement des carrières a été entrepris, notamment par le levé du cadastre dit « napoléonien ».



Figure 2

Vue d'une zone d'extraction d'une carrière souterraine (carrière de Bourré - Loir-et-Cher)  
(les coins, le maillet et la charrue permettant l'extraction sont replacés à des fins pédagogiques)

L'arrêt de l'extraction souterraine massive remonte au début du 20<sup>e</sup> siècle. Par la suite, les carrières souterraines ont pu être réutilisées par l'industrie agroalimentaire (champignonnières) ou pour les capacités de stockage qu'elles représentaient. Toutefois, nombreuses sont celles qui sont tombées dans l'oubli et n'ont plus fait l'objet d'une quelconque surveillance.

### 1.1.2 Éléments géographiques

La distribution géographique des carrières souterraines est calquée sur la répartition spatiale des affleurements des roches exploitées.

En France, la quasi-totalité du territoire (hormis les régions où affleurent des roches ignées et métamorphiques : Bretagne, Massif Central et Vosges) a connu une activité extractive souterraine plus ou moins intense. Les matériaux industriels extraits étant essentiellement des roches sédimentaires, les zones d'exploitation coïncident majoritairement avec les bassins sédimentaires (le Bassin parisien et le Bassin aquitain).

Au centre de ces deux bassins ont été exploitées les formations les plus récentes (exemple : calcaires grossiers lutétiens, gypses ludiens, argiles sparnaciennes de Paris, calcaires aquitaniens, stampiens de Saint-Émilion).

En périphérie ont été exploités, pour le Bassin parisien, la craie de Normandie et du Nord de la France (voire de Meudon, en position plus centrale), le tuffeau du Saumurois et de Touraine puis les calcaires jurassiques du Calvados (Caen), du Berry, de Bourgogne (calcaires kimméridgiens à séquaniens de Courson-les-Carières, dans l'Yonne) et du Jura (calcaires bathoniens). Pour le Bassin aquitain, les calcaires jurassiques des Charentes ont été largement exploités, de même que le calcaire oligocène de l'Entre-deux-mers en Gironde.

Enfin, on notera l'existence d'autres zones d'exploitation en dehors des bassins sédimentaires précités :

- la région Provence-Alpes-Côte d'Azur a longtemps été le siège d'exploitations souterraines de gypse (trias provençal, oligocène) et de calcaires pour la pierre à ciment (Nord de Marseille) ; en Isère, certaines exploitations souterraines de pierre à ciment et de chaux sont encore en activité ;
- les Pyrénées comptent des carrières souterraines de marbre (Saint-Béat) ;
- les contreforts du Massif armoricain font l'objet d'exploitations souterraines des schistes ardoisiers ;
- etc.

L'examen de la carte des aléas liés aux cavités souterraines en France métropolitaine (fig. 3) illustre à grands traits cette distribution géographique.

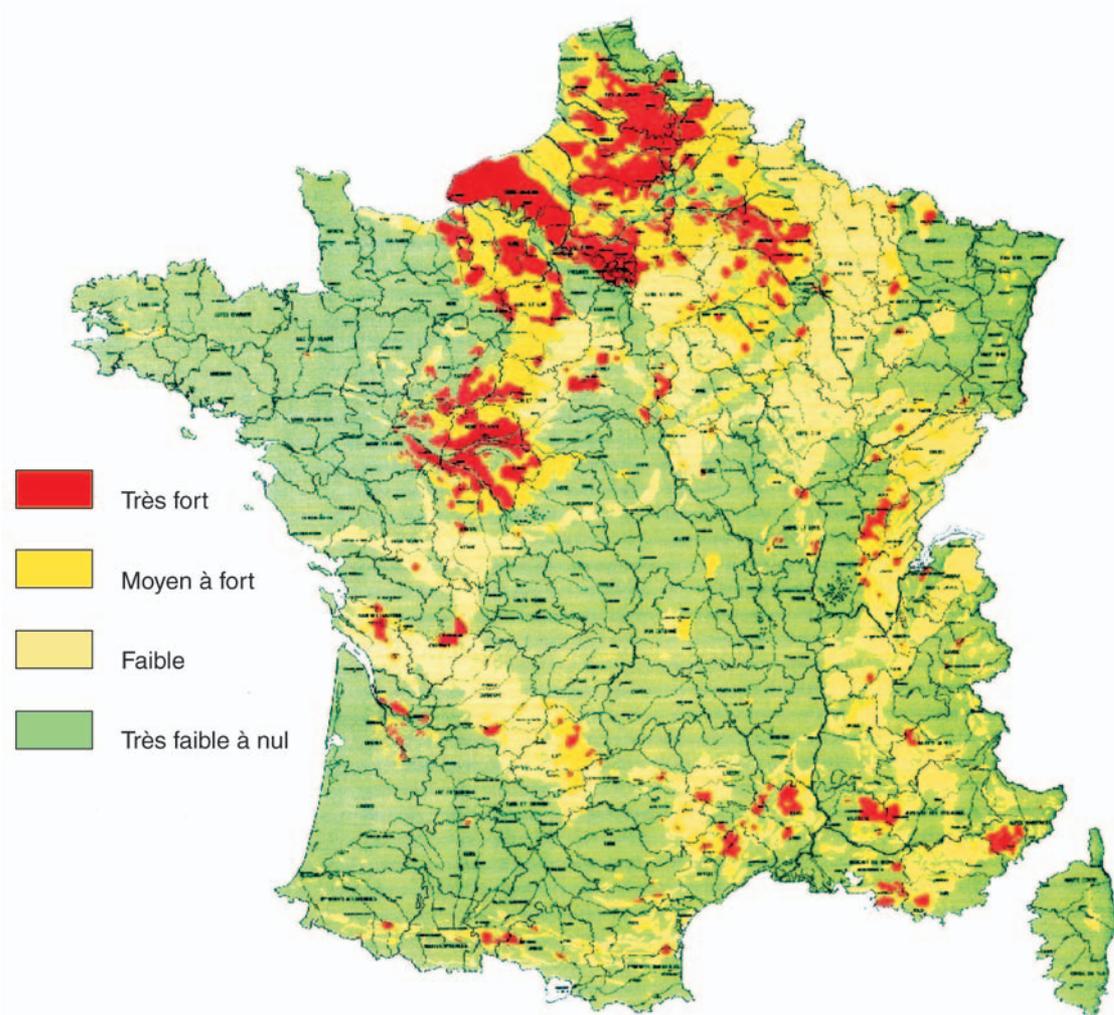


Figure 3  
Carte de l'aléa lié aux cavités souterraines en France métropolitaine  
BRGM, 1994

Le potentiel d'exploitation des roches industrielles du territoire national peut être appréhendé par l'analyse de la succession lithologique plus ou moins détaillée de chaque région. Ainsi l'analyse de l'échelle stratigraphique des niveaux éocènes et oligocènes du bassin parisien (fig. 4) permet de mettre en évidence les formations ayant fait l'objet d'une extraction souterraine.

Formations géologiques	Etages	Epaisseur	Exploitations		
Sable de Lozère	BURDIGALIEN	2 à 5 m	✓		
Calcaire et Meulière de Beauce	CHATTIEN	5 à 15 m	✓		
Sables et grès de Fontainebleau	STAMPIEN	30 à 65 m	✓	✓	
Marnes à Huîtres	Stampien				
Calcaire de Brie	STAMPIEN	15 à 20 m	✓		
Argiles vertes	Sannoisien				
Marnes supragypseuses	BARTONIEN	20 à 40 m	✓	✓	
1ère masse de gypse			sup.	✓	✓
Marnes à silex			Ludien	✓	✓
2ème masse de gypse				✓	✓
Marnes à Lucines				✓	✓
3ème masse de gypse		3 à 7 m	✓	✓	
Sables de Monceau	BARTONIEN		✓	✓	
Calcaire de St Ouen	may.		✓	✓	
Sables de Beauchamp	BARTONIEN	10 à 25 m	✓	✓	
Marnes et caillasses	LUTETIEN	25 à 30 m	✓		
Calcaire grossier				✓	✓
Sables de Cuize	YPRESIEN	0 à 30 m	✓		
Argiles plastiques	YPRESIEN	10 à 30 m	✓	✓	
Calcaire marneux	MONTIEN	5 à 15 m	✓	✓	
Craie	CAMPANIEN		✓	✓	

Figure 4  
Échelle stratigraphique du Bassin de Paris

Les niveaux exploités sont indiqués par le symbole ✓ en position normale ou inverse selon que l'exploitation est à ciel ouvert ou en souterrain, les symboles de petite taille représentent des exploitations peu courantes dans le niveau concerné.

### 1.1.3 Éléments de typologie

Afin de faciliter la lecture du guide, certains termes descriptifs relatifs aux carrières souterraines (mentionnés en *italique* dans le corps du texte) sont définis dans un lexique placé en annexe 1 de ce guide. Les plus courants sont illustrés dans le schéma suivant (fig. 5).

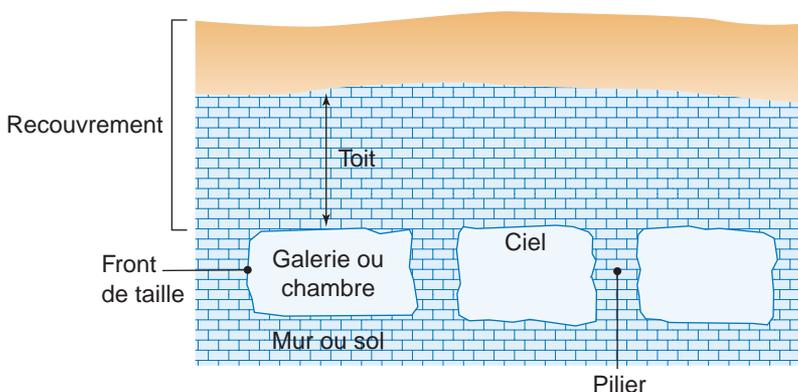


Figure 5  
Schéma des termes fréquemment utilisés en carrière

### 1.2 Problématique

L'*effondrement généralisé* d'Issy-les-Moulineaux en 1961 (21 morts, 36 blessés) ou plus récemment la disparition de deux personnes dans des *fontis* du massif de l'Hautail (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, citons :

- la région Île-de-France où la superficie sous-minée est évaluée à 4700 ha ;
- la Normandie où plus de cent carrières souterraines sont connues dans le seul département du Calvados et où l'on estime à environ 100 000 le nombre de marnières dans les départements de l'Eure et de la Seine-Maritime ;
- le plateau picard et la région Nord - Pas-de-Calais ;
- le Saumurois et la Touraine où le tuffeau a été exploité activement en souterrain pour la construction des villes et des châteaux du Val-de-Loire et pour la réalisation d'habitations troglodytiques dont les origines ont pu être établies dès le 12<sup>e</sup> siècle ;
- la Gironde, où 112 communes de l'Entre-deux-mers sont concernées par la présence de 2 000 ha d'exploitations souterraines ;
- d'autres régions ont connu par le passé une activité extractive de matériaux de construction (calcaires, gypse, sables) plus ou moins importante. C'est le cas en Bourgogne et en Provence pour les exploitations de gypse, en Champagne, en Charente et Charente-Maritime, dans le Jura, l'Orléanais et les environs de Marseille pour les carrières de calcaire.

En Europe, des pays comme la Grande-Bretagne, la Belgique, l'Allemagne, les Pays-Bas, l'Italie, voire l'Espagne, sont fortement concernés par ce phénomène.

Les enjeux économiques associés à la présence de ces carrières souterraines sont considérables car alliés aux coûts très élevés des dommages immobiliers enregistrés, l'instabilité potentielle des secteurs sous-cavés pénalise gravement le développement, la réhabilitation et la gestion des anciennes zones d'extraction.

À ces considérations s'ajoute la forte croissance des besoins en expertise visant, soit à circonscrire l'aléa, soit à chiffrer les préjudices subis.

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, sur les contraintes pour l'occupation du sol en surface et sur une programmation des travaux de confortement, est envisageable.

Préalablement, une localisation suffisamment précise des cavités et un diagnostic de stabilité pertinent, fondé sur une bonne connaissance des mécanismes régissant le comportement au vieillissement et à la rupture du site en question, sont indispensables.

### 1.3 Objectifs du guide

Devant la multiplication des accidents liés à l'effondrement de cavité et le changement de perception de la population vis-à-vis de ces événements (l'opinion publique admet de moins en moins la fatalité dans de telles circonstances), certaines villes et départements se sont dotés d'un service dédié aux carrières, et les pouvoirs publics des pays concernés ont engagé des programmes de recherche destinés à identifier les zones exposées à un aléa d'effondrement et à répertorier les moyens d'étude et de traitement de celles-ci.

Parmi ces programmes, une opération de recherche pilotée par le LCPC de 1998 à 2002 traitait entre autres sujets, de la stabilité des carrières souterraines. Les résultats de cette opération ont été exploités dans ce guide. En 2009, le ministère chargé de la prévention des risques a souhaité que ces travaux soient repris sous la forme d'un guide destiné aux techniciens chargés d'évaluer la stabilité des carrières souterraines abandonnées.

## Chapitre 1

Ainsi, le présent document est destiné à proposer une démarche pertinente de diagnostic de stabilité, c'est à dire à une évaluation de la stabilité actuelle d'un site, de son évolution future, et le cas échéant, la définition des mesures de sécurité à prendre.

Le guide décrit successivement :

- les différents types de carrières rencontrés sur le territoire métropolitain ;
- la typologie des désordres observés et leurs mécanismes d'évolution ;
- la démarche globale de diagnostic ;
- les éléments nécessaires au diagnostic ;
- les techniques d'évaluation de la stabilité d'une carrière souterraine.

Il 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. Les carrières souterraines

### 2.1 Les matériaux exploités et leur usage

Les matériaux exploités en carrière 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 de ce guide.

Les matériaux 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'argile, la molasse, l'ardoise, etc.

Les matériaux principalement exploités sont les suivants :

- des massifs calcaires ou de tuffeau, on extrait des moellons pour la pierre à bâtir, des marches d'escaliers, des pierres d'appareils, de cheminées, etc. Certains calcaires sont également utilisés en dallages, en voirie et pour les monuments funéraires. D'autres gisements ont été exploités comme pierre à ciment pour la production du clinker. Enfin, les habitations troglodytiques du Val-de-Loire ont été la plupart du temps creusées dans le tuffeau à des fins d'habitation par les familles qui trouvaient là des logements sûrs, isothermes, peu coûteux à entretenir et extensibles ;
- la craie a été exploitée en région parisienne pour le « blanc de Meudon » qui entraine dans la composition des peintures et papiers, ainsi que des détergents. Les « rouge-barres », typiques de l'habitat du département du Nord, sont des alternances de lits de briques et de craie (utilisée ici comme pierre à bâtir). La craie était également utilisée comme matière première pour la fabrication de la chaux entrant dans la constitution des mortiers ou pour le raffinage du sucre. Elle a été également utilisée en agriculture pour l'amendement et l'allègement des sols argileux ;
- les marbres sont exploités comme pierres à bâtir et pierres ornementales ;
- les faluns, pierres coquillières, ont été extraits pour la pierre à bâtir ainsi que pour la construction de sarcophages au Moyen-Âge ;
- le gypse est essentiellement exploité pour le plâtre et la fabrication du ciment (il entre dans la fabrication du clinker à hauteur de 3 à 4 %). D'autres applications concernent l'amendement des terres, l'ornementation (albâtre) et les additifs pour peinture, papier et verres ;
- les schistes ardoisiers sont utilisés comme pierre de couverture (ardoise) ou comme pierre à bâtir. On en extrait également des paillettes ou poudres qui servent dans les produits de couverture préfabriqués ;
- les sables siliceux constituent la matière première pour la fabrication du verre et des moules de fonderie. Ils servent également comme abrasifs de sablage et dans le papier de verre ;
- les argiles servent de produits de base pour l'industrie de la terre cuite, que ce soit pour le bâtiment (briques, boisseaux, hourdis, tuiles, conduits et carrelages) ou pour la poterie ;
- la molasse miocène de Châteauneuf-en-Isère et la meulière du bassin de Paris ont servi de pierre à bâtir.

Du fait de diverses contraintes (sécurité, environnement, etc.), bon nombre de carrières souterraines ont été abandonnées. Cependant il en subsiste quelques-unes encore en exploitation en Poitou-Charentes et Val-de-Loire, carrières de calcaire grossier ou de gypse en région parisienne, carrière de calcaire de pierre de Caen, etc.

### 2.2 Les différents types d'accès

Les accès, selon la morphologie du site (zones de plateaux ou de coteau), se font par puits, entrées en cavage ou descenderies avec ou sans boyau d'accès, voire par escaliers (fig. 6).

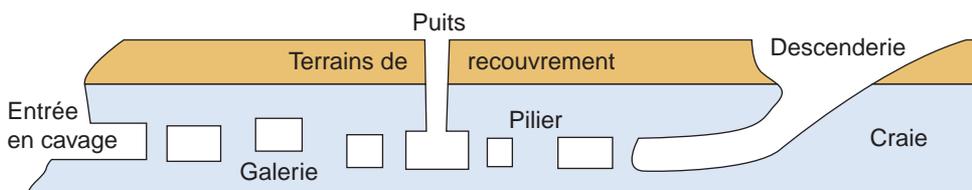


Figure 6  
Schéma synthétique des différents types d'accès des carrières souterraines

## Chapitre 1

Les puits ou descenderies (fig. 7 et 8) sont typiques des zones de plateaux alors que les entrées en cava-  
ges (fig. 9 et 10) se rencontrent dans les versants des vallées. L'accès à la carrière se fait alors soit à  
partir d'un front de taille à ciel ouvert, soit directement dans la couche au moyen d'une galerie généra-  
lement horizontale ou parfois descendante.



Figure 7  
Accès par puits dans les ardoisières de  
Maël Carhaix (Côtes-d'Armor)



Figure 8  
Accès par descenderie dans la carrière  
de gypse de Roquevaire (Bouches-du-Rhône)



Figure 9  
Entrée en cavage dans le calcaire  
grossier de la région parisienne  
de Mériel (Val-d'Oise)

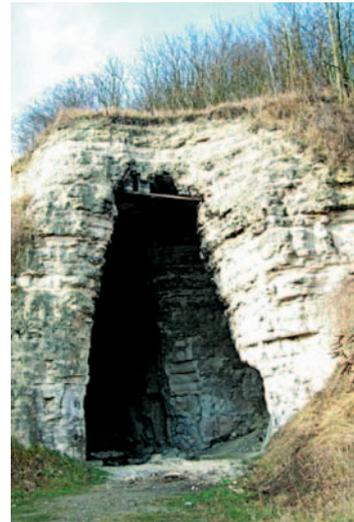


Figure 10  
Entrée en cavage dans le gypse ludien  
de Gagny (Seine-Saint-Denis)

### 2.3 Les différentes méthodes d'exploitation

Le terme « méthode (ou typologie) 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 caracté-  
ristiques 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.

Le carrier recherchant le meilleur rendement possible, dans des conditions de sécurité acceptables pendant la seule période d'extraction, l'exploitation du niveau recherché était souvent menée jusqu'à une valeur limite du *taux de défrètement*. Le taux de défrètement est donc dépendant de la résistance à la compression du matériau et de la profondeur de la carrière. Il atteint fréquemment 80 à 90 % dans les calcaires et peut être inférieur à 50 % dans le gypse.

La dimension des vides pour une emprise donnée est donc conditionnée par le mode d'exploitation du matériau.

La profondeur des carrières est généralement comprise entre 5 et 50 mètres mais peut être inférieure à 5 mètres, comme en Gironde, à Saint-Émilion ou dans la Drôme, à Châteauneuf-sur-Isère, etc. Elle peut atteindre 60 à 70 mètres dans certaines exploitations de craie ou de gypse (Ludien du Bassin de Paris et Trias provençal), exceptionnellement plus de cent mètres dans certaines exploitations situées à flanc de montagne (Jura, Pyrénées, Alpes), voire 200 à 300 mètres dans les ardoisières d'Anjou, de Bretagne ou du bassin de Fumay (Ardennes).

Les techniques de creusement ont évolué au fil du temps. L'extraction manuelle des pierres de taille, réalisée au pic ou à la lance, a été abandonnée du fait de l'introduction d'engins de découpe au fil, sciage ou par des haveuses. Les matériaux moins nobles, pierres à chaux ou gypse, ont été extraits dès le 19<sup>e</sup> siècle à l'explosif, d'abord à la poudre noire, puis à la dynamite et à l'explosif nitraté vers la seconde moitié du 20<sup>e</sup> siècle.

La géométrie des exploitations, d'abord désordonnée, n'est devenue régulière qu'à partir de la fin du 19<sup>e</sup> siècle. La typologie des carrières souterraines repose ainsi sur la diversité des méthodes d'exploitation utilisées, dont les plus répandues sont décrites ci-après.

### 2.3.1 Exploitation par chambres et piliers ou piliers tournés

C'est la méthode la plus répandue et la plus ancienne. Elle concerne principalement les matériaux suivants : calcaire, craie, tuffeau et gypse. En général, le carrier s'appuyait sur le pré-découpage naturel du massif. 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. Les piliers sont alors réguliers, de section aussi égale que possible et peuvent être alignés ou décalés en quinconce pour assurer une meilleure stabilité du toit en présence de *fractures* (fig. 11).

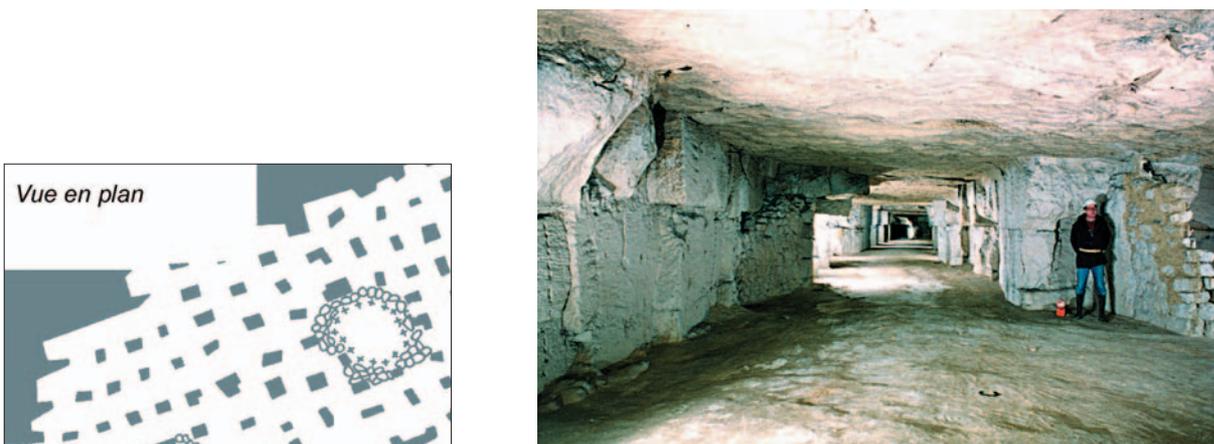


Figure 11  
Plan et photographie d'une carrière exploitée par chambres et piliers alignés dans les calcaires lutétiens de Mériel (Val-d'Oise)

## Chapitre 1

Disposés de façon anarchique, ils sont révélateurs de carrières très anciennes (fig. 12), généralement en mauvais état. Certaines d'entre elles montrent une évolution dans la disposition des piliers qui indique un changement dans le mode d'exploitation (fig. 13).

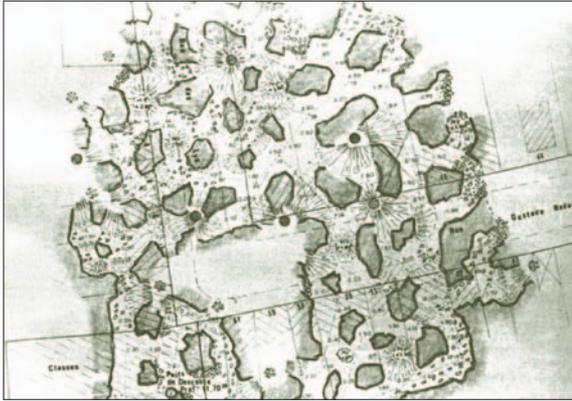


Figure 12

Plan d'une carrière exploitée par piliers disposés de façon anarchique

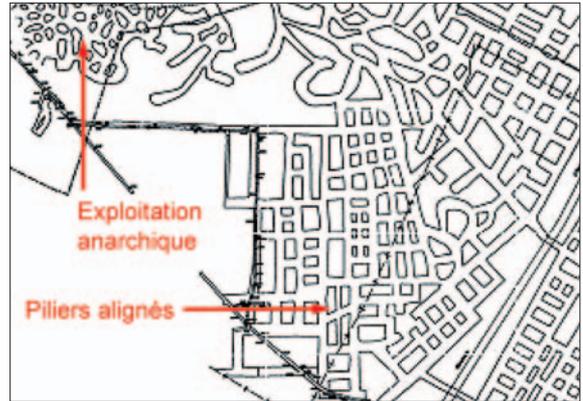


Figure 13

Plan montrant un changement du mode d'exploitation (les piliers du secteur droit sont alignés)

La forme des piliers est variable : généralement de section carrée ou rectangulaire pour les calcaires (fig. 14) et de profil trapézoïdale pour la première masse de gypse du Bassin parisien (fig. 15). Certaines carrières de craie d'Île-de-France présentent parfois des *galeries* voûtées (fig. 16) et des piliers de grandes dimensions (également appelés *étaux de masse*).

Cette méthode d'extraction présente l'inconvénient majeur d'imposer l'abandon d'une part importante de la roche pour assurer la stabilité de la carrière.

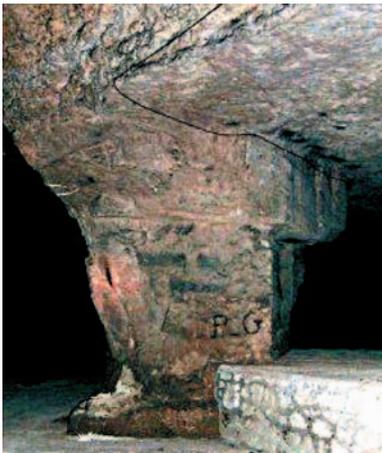


Figure 14

Exploitation par chambres et piliers de calcaires jurassiques à Bourges (Cher)



Figure 15

Galeries trapézoïdales dans les carrières de gypse ludien de la butte de l'Hautil (Val-d'Oise)

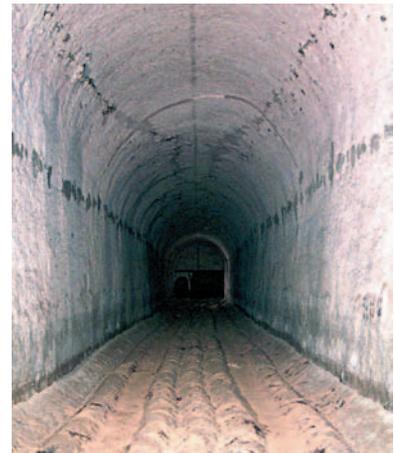


Figure 16

Étaux de masse (grands piliers allongés) dans la carrière de craie des Brillants à Meudon (Hauts-de-Seine)

Quelques variantes montrent des zones à petits piliers séparées par des piliers en rideaux ou en voile dans la région de Caen ou du Berry (fig. 17 et 18).

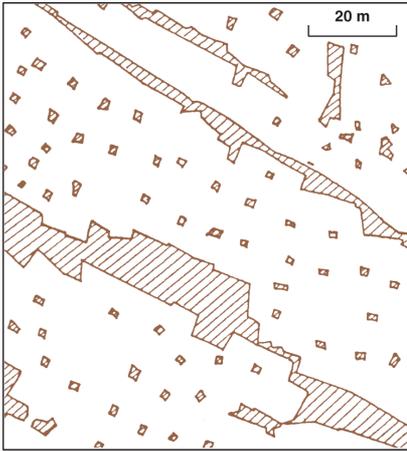


Figure 17  
Exploitation par petits piliers et « piliers rideaux »,  
région de Caen (Calvados)



Figure 18  
Pilier en voile fissuré  
Carrière du Pot à Beurre, Bourges (Cher)

### 2.3.2 Exploitation par hagues et bourrages

Devant la fréquence des effondrements en surface, la méthode d'exploitation par *piliers tournés* a été interdite à Paris en 1791 et remplacée par la méthode par *hagues* et *bourrages* pour les exploitations de hauteur inférieure à 3 mètres.

Un soutènement provisoire composé de piliers en pierres sèches (*piliers à bras*, fig. 19) destinés à « caler » le ciel de carrière, est réalisé puis conforté par la mise en place de remblais autour des piliers (*bourrage*). L'édification de murs en pierres sèches (*hagues*) qui contiennent les bourrages, complète le soutènement (fig. 20 et 21). Cette technique autorisait l'exploitation de la totalité de la *masse* en présence (essentiellement des calcaires) et limitait la flexion du *ciel* qui reposait sur le remblai.



Figure 19  
Soutènement par piliers à bras dans  
les calcaires grossiers d'Auvers sur Oise (Val-d'oise)

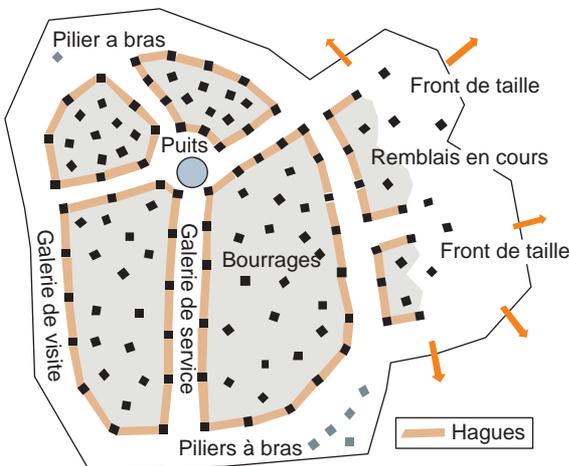


Figure 20  
Croquis illustrant la méthode d'exploitation  
en souterrain par hagues et bourrages (vue en plan)



Figure 21  
Exemple de hagues dans une carrière  
de calcaires grossiers de la région rémoise (Marne)

Des galeries de visite étaient généralement maintenues sur le pourtour de la carrière et d'autres galeries de service délimitaient en quelque sorte des « méga-piliers » sur lesquels le *toit* de la carrière est venu s'affaisser en compactant les bourrages.

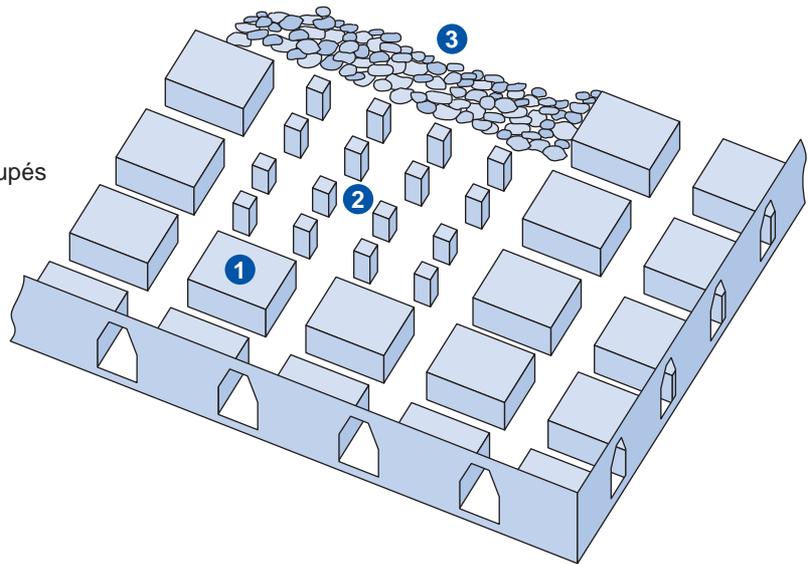
Dans certaines régions, le soutènement par *hagues* et *bourrages* est également constaté dans des carrières par chambres et piliers (Centre de la France, etc.).

En principe, les désordres potentiels en surface au droit de ce type de carrière sont limités.

### 2.3.3 Exploitation par affaissement dirigé

L'affaissement dirigé est une méthode en trois étapes qui consiste à exploiter un gisement par la méthode des chambres et piliers (piliers primaires). En fin d'exploitation, les piliers sont recoupés pour ne laisser que des piliers résiduels (piliers secondaires). Ceux-ci sont au final détruits à l'explosif (fig. 22).

Figure 22  
Schéma d'exploitation de gypse par affaissement dirigé.  
Les gros piliers (1) sont ensuite découpés en petits piliers (2) qui sont ensuite foudroyés (3)



Il est pratiqué à partir d'une longue galerie d'accès, en reculant depuis le fond jusqu'à l'entrée par *foudroyage* progressif des piliers ce qui a pour intérêt de prévenir tout désordre de surface inopiné après l'exploitation et d'augmenter le volume exploité.

Un tassement différé du matériau, de l'ordre de 10 % de sa hauteur, est souvent observé et s'accompagne fréquemment d'un fléchissement de la dalle de *toit*.

Plus fréquemment utilisée dans les mines, cette méthode est également rencontrée dans les grandes exploitations souterraines de gypse de la région parisienne. Bien qu'utilisée pour les zones sans enjeux significatifs, les tassements occasionnés en surface et les modifications sur les aquifères superficiels ont conduit à l'abandon de cette technique.

### 2.3.4 Exploitation par galeries radiales et chambres

Ce type d'exploitation est fréquent dans les marnières. La marnière est une exploitation souterraine de craie destinée à l'amendement des terres agricoles. Le terme local « marne » désigne la craie tendre utilisée à cet usage.

Bien que l'existence de ces extractions souterraines soit attestée dès le Moyen-Âge, leur exploitation se développe particulièrement au 19e siècle, pour atteindre son apogée entre 1850 et 1920 avant de disparaître après la seconde guerre mondiale.

Sur les plateaux, l'exploitation se faisait à partir d'un puits de 1 à 2 mètres de diamètre qui devait atteindre les premiers horizons de craie saine. À la base du puits, les carriers réalisaient des *galeries* rayonnantes donnant accès aux *chambres* d'exploitation (fig. 23).

Compte tenu de la forte épaisseur du *recouvrement* limoneux et argileux (argiles de décalcification), de l'extraction possible sur plusieurs niveaux et de la profondeur de la nappe phréatique, certaines marnières pouvaient atteindre une profondeur supérieure à 35 mètres (fig. 24 et 25).

Ces carrières ne faisant l'objet d'aucun dimensionnement (elles étaient bien souvent percées par les exploitants agricoles) elles présentent de nombreuses instabilités.



Figure 23  
Chambre d'exploitation  
d'une marnière

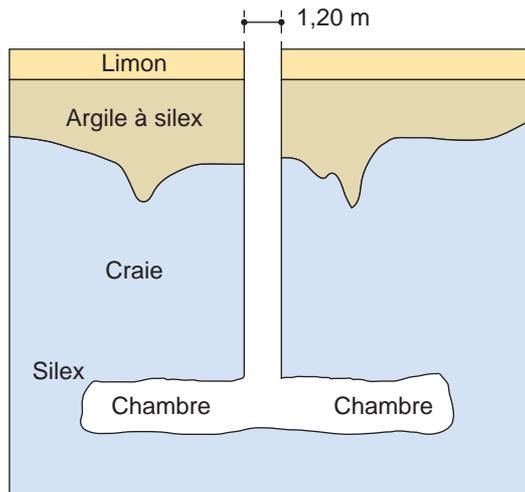


Figure 24  
Coupe théorique d'une marnière

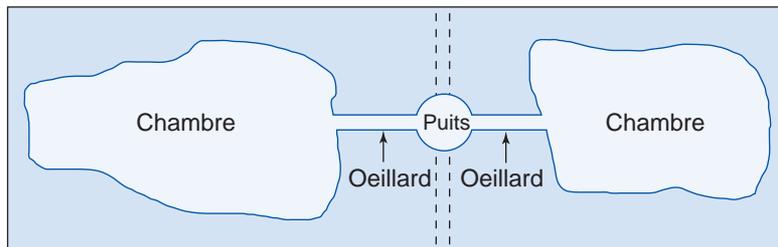


Figure 25  
Vue en plan d'une marnière  
à deux chambres

### 2.3.5 Exploitation en forme de bouteille

Ce type d'exploitation est caractéristique du département du Nord, où la craie grise du Turonien supérieur et la craie blanche du Sénonien ont été exploitées pour la pierre de taille et l'amendement des champs. Une technique similaire (tranchées et chambres) a également été observée dans les exploitations de faluns de l'Anjou (fig. 26).

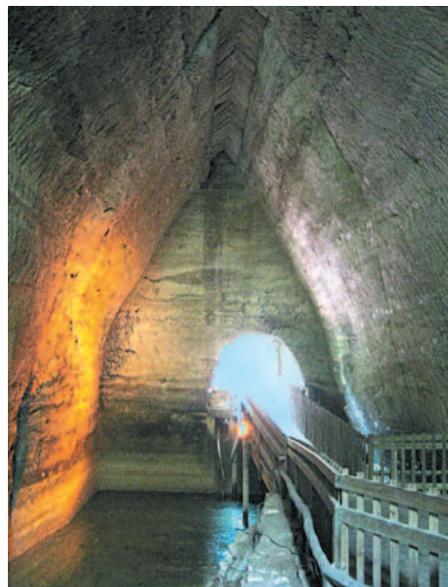


Figure 26  
Photographie d'une exploitation en bouteille  
des faluns d'Anjou

## Chapitre 1

La méthode d'exploitation consiste à ouvrir des puits adjacents, d'environ 1 mètre de diamètre, disposés en lignes plus ou moins régulières et élargis vers le bas pour prendre la forme d'une bouteille de 12 à 20 mètres de haut et de 7 à 10 mètres de diamètre à la base (fig. 27). La hauteur de ces bouteilles ou catiches dépend de l'épaisseur de la couche exploitée et du niveau de la nappe phréatique.

Chaque bouteille est reliée à ses voisines par de courtes galeries (fig. 28). Le creusement d'un puits étant terminé, le carrier disposait au-dessus une voûte en pierres taillées puis du remblai (fig. 29). Il ne subsistait ainsi aucune trace en surface. La ruine de ce type de carrière provoque des désordres de surface importants du fait de la hauteur du vide après exploitation.

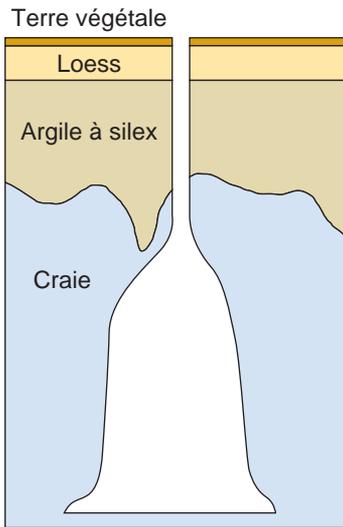


Figure 27  
Section d'une catiche  
(noter la forme en bouteille)



Figure 28  
Plan d'une exploitation mixte  
de type catiche (en bas) et par  
piliers tournés disposés de  
façon anarchique (en haut)



Figure 29  
Vue du bouchon d'une crayère (Champagne)

### 2.3.6 Exploitation par chambres

Les exploitations d'ardoise se singularisent par des salles volumineuses de 20 à 30 mètres de section horizontale pour 50 à 80 mètres de haut (fig. 30 et 31), reliées entre elles par des galeries de liaison. Ces méthodes particulières sont liées à la grande résistance mécanique de l'ardoise et à la structure du gisement dont la profondeur peut atteindre plusieurs centaines de mètres.

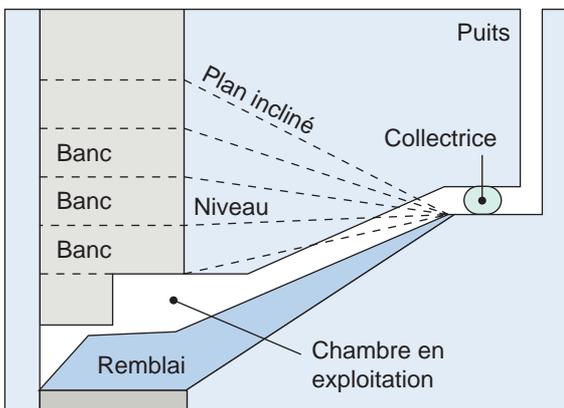


Figure 30  
Coupe verticale d'extraction des ardoisières d'Angers  
(Maine-et-Loire) (méthode remontante)

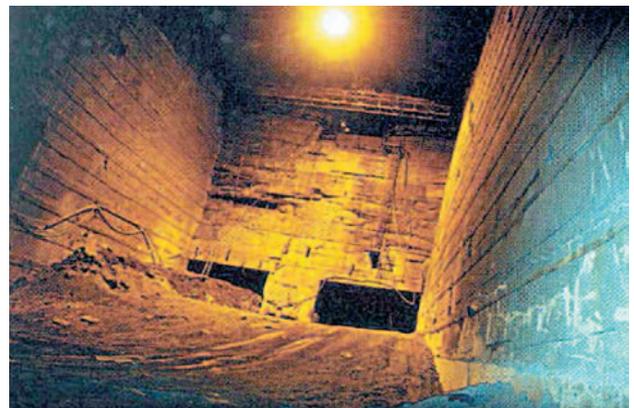


Figure 31  
Chambre d'exploitation  
Ardoisières d'Angers (Maine-et-Loire)

Selon les variantes, on trouve :

- les *chambres* descendantes où le matériau est découpé au mur après consolidation de la voûte d'origine. Cette technique, en vigueur au 19<sup>e</sup> siècle jusque vers 1880 dans les ardoisières d'Angers et de Bretagne, laisse temporairement une *chambre* vide sur plusieurs dizaines de mètres de hauteur et implique d'organiser le remblayage, *a posteriori*, souvent à partir des déchets d'une autre chambre adjacente ou supérieure ;
- les *chambres* remontantes, à partir de 1880, dans lesquelles l'abattage des schistes ardoisiers s'effectue en voûte. Elles sont remblayées avec les stériles au fur et à mesure de l'avancement. Cette technique améliore sensiblement la sécurité de même que le rendement.

À leur abandon, les *chambres* sont généralement remblayées, seules subsistent des galeries d'accès ménagées en haut des remblais (fig. 32).



Figure 32  
Galerie d'accès ménagée en haut de remblais  
Document ardoisières de Rimogne (Ardennes)

### 2.3.7 Exploitation par galeries en rameaux

Dans des matériaux peu résistants, n'autorisant que de faibles portées de toit, tels que le travertin de Brie, les sables de Fontainebleau ou de la région de Laon (Aisne) et les argiles de Provins (Seine-et-Marne), des *galeries* « filantes », à disposition anarchique ou en rameaux, laissent des piliers très longs ou massifs, sensiblement parallèles entre eux (fig. 33).

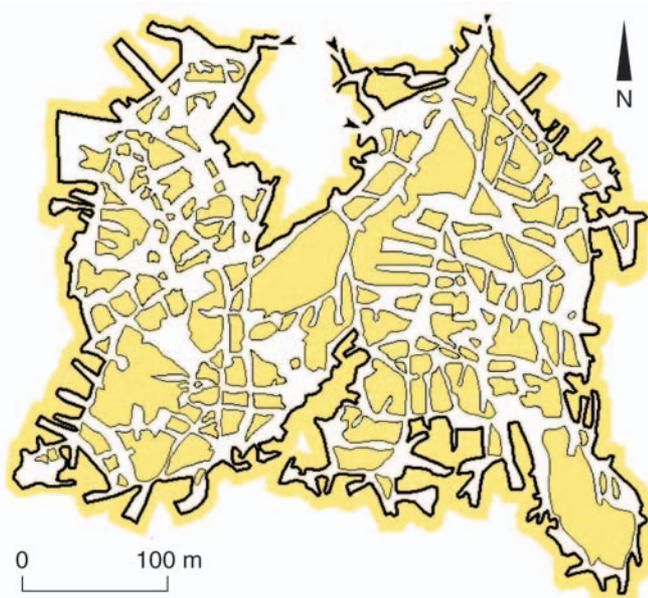


Figure 33  
Plan d'exploitation d'une carrière de sable de Fontainebleau par galeries anarchiques  
Le Puisetlet (Seine-et-Marne)

## Chapitre 1

Les argilières de Provins ont été exploitées d'abord à partir de puits de 30 à 40 mètres de profondeur (technique la plus ancienne, datée de l'époque romaine) ou de *galerie* de plain-pied (entrée en cavage) débouchant sur une simple *chambre*. Les exploitations plus récentes se sont structurées sur une *galerie* de roulage autour de laquelle les *galeries* de défilage, les « coupons de ruine », s'organisent en épis (fig. 34) étayés par des cadres de bois.

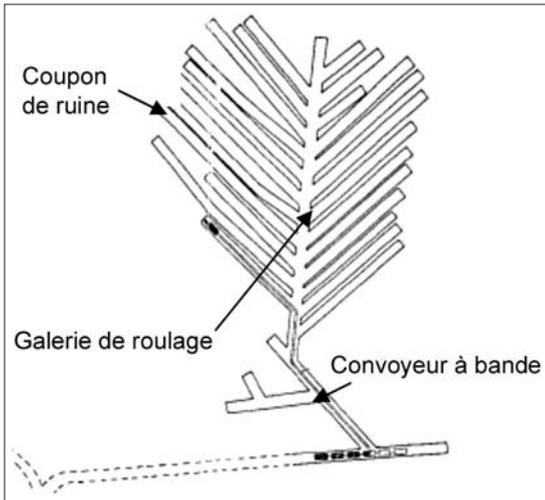


Figure 34  
Plan d'exploitation d'argiles par galeries en épis  
Provins (Seine-et-Marne)  
(« Mineur en Argile », *commune libre de Provins*, 1987)

### 2.3.8 Exploitation à plusieurs niveaux

De nombreuses carrières sont exploitées sur plusieurs niveaux (fig. 35), généralement deux, parfois plus, pour peu que la *masse* soit suffisamment épaisse et la nappe phréatique suffisamment profonde.

Les carrières de calcaire, de craie, de tuffeau, de gypse, les marnières sont concernées. Jusqu'à neuf niveaux ont été exploités dans les calcaires à astérie de Gironde, sept niveaux dans le tuffeau de Bourré (Loir-et-Cher), quatre niveaux dans les carrières de gypse de Roquevaire (Bouches-du-Rhône) ainsi que dans la craie de Meudon (Hauts-de-Seine) alors que les marnières à trois niveaux ne sont pas rares.

L'épaisseur du *banc* intercalaire varie de 0,5 mètre à 1 mètre ou 1,5 mètre en fonction des caractéristiques mécaniques du matériau.

Cette configuration augmente sensiblement les risques de dégradation du vide souterrain et de survenue de désordre de plus grande ampleur en surface.

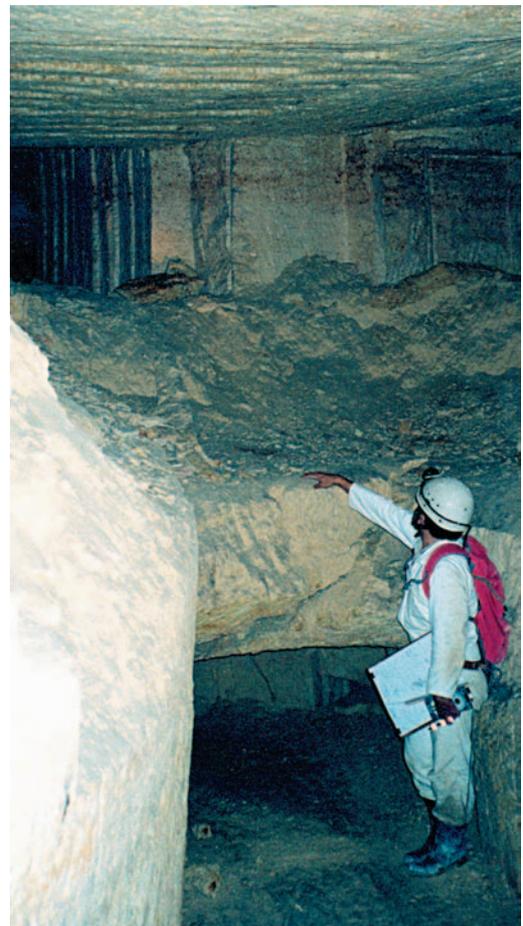


Figure 35  
Carrière à plusieurs niveaux dans les calcaires  
oligocènes de Gironde

### 3. Les autres types de cavités

Les cavités autres que les carrières creusées de la main de l'homme posent également des problèmes en génie civil car généralement situées à faible profondeur. Le guide peut également s'appliquer au diagnostic de ces cavités.

#### 3.1 Les habitations troglodytiques

Creusées dans les falaises ou en pied de coteau, dans des roches tendres (tuffeau et falun du Val de Loire ou calcaires divers), ces habitations comprennent des locaux encore réservés à l'habitation, des étables et des caves séparées par des voiles peu épais qui finissent par céder avec le temps et causent des problèmes de stabilité d'ensemble.

Des locaux plus prestigieux tels que des châteaux, des églises y ont également été creusés (fig. 36). Certains sont réaménagés (fig. 37) et accueillent du public (hôtels, etc.). Compte tenu de leur mode de creusement à flanc de coteau, la localisation des entrées ne pose généralement pas de difficulté mais l'extension des cavités reste souvent à établir.



Figure 36  
Église troglodytique en Charente



Figure 37  
Vue d'un habitat troglodytique  
aménagé en hôtel  
Rochecorbon (Indre-et-Loire)

#### 3.2 Les souterrains et refuges

Dès le Moyen-Âge, les souterrains et refuges servirent d'abris aux habitants des hameaux et villages isolés. Les descentes d'accès, cachées dans les cimetières ou dans l'église, débouchaient dans d'anciennes *chambres* de carrières souterraines aménagées pour la circonstance.

Dans les lieux moins isolés, des galeries, servant également de lieu de stockage, pouvaient déboucher sur des salles se trouvant à proximité des châteaux, aux abords des villes et même à l'intérieur de celles-ci. On peut citer par exemple, les souterrains de Limoges creusés dans le « tuf », les souterrains de Provins creusés dans la terre à foulon (argile gonflante), les souterrains-refuges du Nord de la France (fig. 38), de Touraine ou de Gironde, les silos à grain des Charentes et « Muches » de Picardie (Naours).

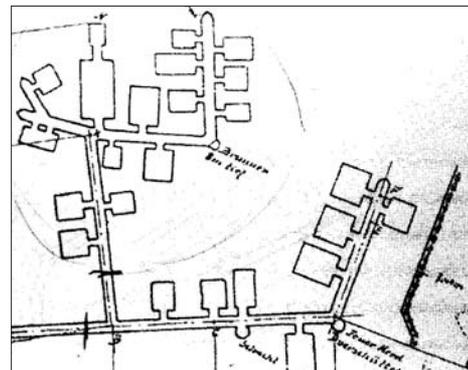
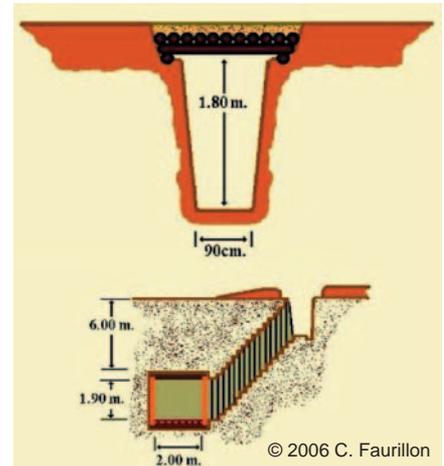


Figure 38  
Plan d'un souterrain refuge  
du Nord de la France

### 3.3 Les sapes de guerre

Principalement répandues dans le Nord-Pas-de-Calais et en Picardie, les sapes de guerre sont pour la plupart des galeries et abris creusés pendant la première guerre mondiale, de préférence dans le limon ou à l'interface limon/craie. Reliées à un réseau de tranchées, les galeries d'accès, larges d'un mètre et hautes de 2 mètres, débouchaient sur des salles de dimensions variables qui ont été obstruées sommairement après la guerre. Leur emplacement n'ayant pas été cartographié, leur présence est souvent révélée par des effondrements ou par des travaux de terrassement (fig. 39).



« The Literary Digest History of the World War » by F.W. Halsey 1920

Figure 39

Vue aérienne d'une zone de front : ligne Hindenburg face à Bullecourt

Source : <http://www.cheminsdememoire-nordpasdecals.fr/>

et schéma de tranchées

Source : <http://www.faurillon.com>

(d'après une consultation des sites de 2014)

## Chapitre 2

# Typologie des désordres et mécanismes associés

*Pendant la période d'exploitation le carrier recherchait le meilleur rendement possible, donc le taux d'exploitation maximal pour des conditions de sécurité acceptables en phase d'extraction. Compte tenu des processus de dégradation qu'elles subissent, toutes les carrières souterraines sont condamnées à la ruine à plus ou moins long terme. Ces processus, engagés dès la création du vide, résultent d'une redistribution des contraintes naturelles à laquelle s'ajoute l'influence de divers facteurs aggravants.*

*Le stade ultime des processus de dégradation se manifeste par des effondrements localisés ou généralisés, avec des répercussions en surface plus ou moins marquées.*

*L'analyse des événements survenus depuis des décennies a permis d'établir une typologie des désordres, précédant ou accompagnant la rupture. Le diagnostic est basé dans un premier temps sur l'observation des désordres en carrière et en surface. Les paragraphes qui suivent permettent de nommer les désordres, de les situer et de les hiérarchiser. Le travail qui en découle servira de base au diagnostic de stabilité.*

## 1. Facteurs influençant la stabilité d'une carrière souterraine

Les observations sont conduites de manière à analyser :

- 1) les facteurs intrinsèques : ces facteurs permettent d'analyser et de décrire la cavité ;
- 2) les facteurs externes : ces facteurs sont extérieurs à la cavité, et considérés comme aggravants pour la stabilité.

### 1.1 Facteurs intrinsèques à la cavité souterraine

Les observations faites en carrières dans le cadre de diagnostics de stabilité ont montré que la stabilité des carrières souterraines est fonction de facteurs intrinsèques tels que l'environnement lithologique et structural de celles-ci, leur typologie et les techniques employées pour leur extraction.

#### **Contrôle lithologique**

On appelle « contrôle lithologique », le fait que la stabilité d'une carrière soit liée à la *lithologie* des terrains qui entourent la carrière. Ce contrôle lithologique se manifeste aussi bien au niveau des *piliers* que du *mur* ou des terrains de *recouvrement*. Les désordres seront différents selon que l'on considère une roche de résistance moyenne, apte à la fracturation (cas des roches calcaires), des roches composées d'alternances de niveaux résistants et tendres (cas des alternances marno-calcaires), ou des roches franchement tendres comme les niveaux de gypse.

#### **Contrôle structural**

Les observations ont également montré que le système de fracturation du milieu est un des principaux facteurs gouvernant la stabilité du site. Les discontinuités constituent des plans de faiblesse guidant les ruptures éventuelles et sont des zones privilégiées de circulation d'eau. Leurs azimut et pendage ainsi que leurs degrés d'ouverture, la nature du remplissage et la rugosité des épontes, sont des caractéristiques qui permettent d'apprécier la résistance au cisaillement du massif rocheux. La prise en considération de ces paramètres dans l'estimation de la stabilité d'une carrière souterraine s'appelle le « contrôle structural ».

Ce contrôle structural se manifeste aussi bien au niveau des *piliers* que du *toit* ; en revanche, il n'affecte pas la stabilité du *mur*, sauf pour les carrières à plusieurs niveaux. Les carrières dont la stabilité est la plus dépendante du contrôle structural sont en général des exploitations de matériaux de résistance moyenne (ex : les calcaires). Pour les matériaux tendres, un contrôle structural est possible dans un environnement fortement tectonisé (carrière de gypse dans le Trias provençal).

## Chapitre 2

Outre les *joints de stratification*, d'origine sédimentaire, les discontinuités prises en compte dans le contrôle structural sont les *fractures tectoniques*, liées à l'histoire géologique du massif.

Le relevé fera mention de ces discontinuités, les classera par ordre d'importance et les localisera sur le plan de situation. Les outils d'analyse structurale (canevas de Wulff...) peuvent aider à leur représentation et à leur caractérisation.

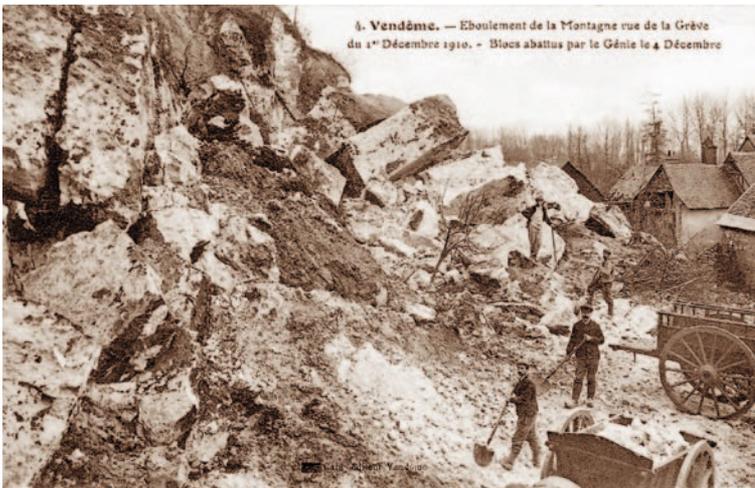
Les désordres observés en carrière souterraine peuvent avoir pour origine une seule famille de discontinuités mais aussi naître de l'action combinée de deux voire trois types de fractures et/ou d'une succession lithologique défavorable.

Outre ces facteurs intrinsèques prépondérants, on citera également des facteurs d'instabilité qui sont liés à la technique de creusement de la carrière.

### **Entrées en cavage**

En contexte de *coteau* sous-cavé, à proximité du versant, plusieurs facteurs aggravants peuvent se combiner, diminuant la stabilité des accès :

- la fracturation naturelle du massif rocheux plus dense, accentuée par la *décompression* du versant (appel au vide) ;
- la répartition particulière des contraintes naturelles, la contrainte majeure étant inclinée dans le sens de la pente, à l'origine de ruptures en cisaillement pour les *piliers* les plus proches du versant ;
- la combinaison d'instabilités de pentes et de cavités souterraines ;
- l'influence des facteurs externes tels que la végétation et les précipitations.



Des glissements ou des écroulements de grande ampleur peuvent alors survenir, dommageables pour les enjeux qu'ils soient situés à l'aplomb des cavités ou en pied de versant. Ainsi, la figure 40 illustre l'écroulement en masse (10 000 m<sup>3</sup> de matériaux éboulés) survenu en 1910 à Vendôme (Loir-et-Cher).

Figure 40  
Écroulement en masse  
du coteau à Vendôme en 1910  
PPR de la ville de Vendôme

### **Les méthodes d'extraction**

La technique d'extraction utilisée peut jouer un rôle dans la stabilité d'une carrière. À titre indicatif, on citera notamment :

- l'utilisation d'explosifs entraîne parfois l'éclatement superficiel de la roche contrairement à l'extraction manuelle qui est moins agressive pour le massif rocheux ;
- la technique d'extraction par *hagues* et *bourrages* est généralement stabilisatrice car elle diminue la hauteur des vides et *frette* les piliers ;
- l'écrémage des piliers (action d'extraire la roche des piliers juste avant l'abandon de la carrière) est évidemment défavorable pour la stabilité d'une carrière.

### **La géométrie des vides**

La dimension et l'agencement des chambres et galeries d'une carrière ont une incidence directe sur sa stabilité. On citera notamment, les instabilités liées à l'existence d'une *portée* excessive ou d'un *ciel* plat, d'un nombre insuffisant de *piliers* ou de leur mauvaise superposition entre deux niveaux d'exploitation, etc.

Un sous-dimensionnement des éléments porteurs de la carrière (*piliers, toit, mur*) peut entraîner l'apparition de *fractures mécaniques* dont l'origine est à rechercher dans la redistribution des contraintes après excavation.

La caractérisation des vides est complexe car elle repose dans un premier temps sur la réalisation d'un plan support. Le travail de caractérisation de la géométrie des vides ne s'appuie pas seulement sur une représentation plane mais également sur une représentation en coupe indispensable par exemple dans le cas des catiches, des cavités à niveau superposé, etc.

Lors du relevé géométrique les points de vigilances pourront porter :

- sur la méthode de relevé : arpentage, triangulation... et éventuellement sur l'incertitude concernant la précision du relevé et conduisant à l'élaboration du plan de la cavité ;
- sur les hauteurs de vide : elles ne sont pas homogènes en tout point de la carrière et peuvent varier selon les niveaux exploités. Il convient de procéder à de nombreuses mesures afin de disposer d'une population statistiquement représentative ;
- le taux de défrètement : l'obtention de ce pourcentage de surface vide par rapport à la surface totale peut être obtenue de différentes manières (évaluation par la surface moyenne des piliers, largeur moyenne des galeries ...). Il convient de préciser comment la valeur est obtenue ;
- sur l'évaluation des épaisseurs de recouvrement et les méthodes qui ont permis d'y aboutir.

### 1.2 Facteurs externes

#### **Rôle de l'eau**

L'eau constitue le facteur externe prépondérant dans la déstabilisation des carrières souterraines.

On distinguera et caractérisera l'importance :

- des eaux d'origine météorique (pluie, neige) soit infiltrées directement dans le massif, soit collectées par ruissellement ;
- des eaux d'origine anthropique ou parasite (réseau d'eau potable, d'eau usée, assainissement d'infrastructure...);
- des eaux souterraines (nappe).

Selon la porosité du matériau, la variation de teneur en eau d'une roche peut influencer sa résistance mécanique et occasionner une surcharge temporaire. Par exemple, les craies peuvent perdre jusqu'à 50 % de résistance en compression simple entre l'état sec (jamais constaté sur le terrain) et la saturation.

L'écoulement de l'eau peut également par érosion mécanique ou par dissolution créer ou agrandir des discontinuités (fracturations naturelles). Ainsi, dans le cas d'infiltration (fig. 41) naturelle ou anthropique (fuite d'un réseau de surface ou existence d'un puits d'infiltration), l'eau est un facteur accélérant l'évolution vers la ruine de la carrière.



Figure 41  
Venues d'eau en carrière par infiltration  
suite à des fuites de réseaux persistantes  
(Bagneux - Haut-de-Seine)



De même, un phénomène de remontée de *nappe* (fig. 42) et/ou le manque de ventilation d'une carrière (entraînant une augmentation de l'hygrométrie) peuvent augmenter la teneur en eau des masses rocheuses porteuses (*piliers, voûtes*). Par ailleurs, dans certains cas particuliers, suite à de fortes précipitations, les terrains de recouvrement peuvent apporter une surcharge à la carrière.

Figure 42  
Détail d'un pilier d'une carrière souterraine de Vendôme (Loir- et-Cher). Les lasses horizontales visibles sur le pilier témoignent du battement de la nappe phréatique.

La figure 43, indiquant le nombre d'interventions de l'Inspection générale des carrières de Versailles (IGC) en fonction des précipitations annuelles, montre un lien existant entre la pluviométrie et les effondrements de cavités souterraines.

Par ailleurs, sous l'effet du gel, l'eau peut avoir une action mécanique pénalisante sur les entrées en cavage. À l'intérieur du massif, du fait de l'inertie thermique, ses effets disparaissent rapidement.

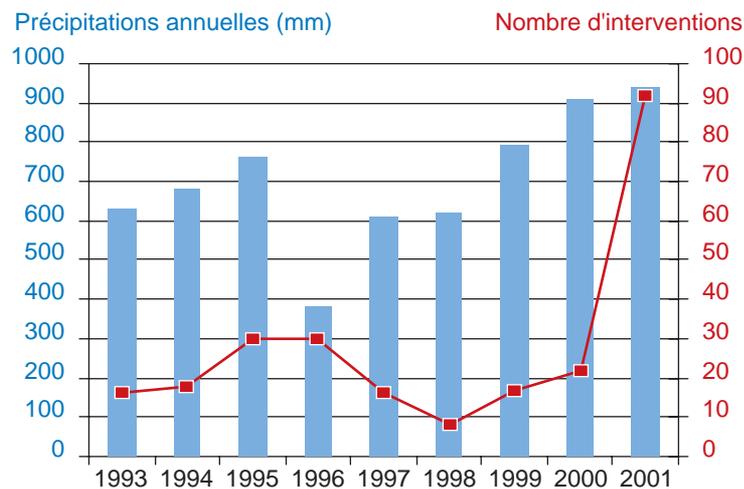


Figure 43  
Représentation de la pluviométrie annuelle et du nombre d'interventions de l'IGC de Versailles pour des phénomènes de ruine de cavités souterraines

### Rôle de la végétation

Le couvert végétal en surface peut jouer un rôle déstabilisateur pour les carrières les moins profondes. En effet, la croissance des végétaux s'accompagne de celle de leurs racines, qui colonisent les milieux les plus favorables à leur développement (humides et fracturés). Il est donc fréquent de retrouver des racines dans des discontinuités rocheuses au *toit* des carrières (fig. 44).

L'agrandissement de l'ouverture des discontinuités par les racines est un facteur déstructurant le massif rocheux. À la mort des végétaux (à la suite d'une coupe ou naturellement), les racines se dégradent et laissent des fractures ouvertes dans la roche. Ces fractures constituent un drainage préférentiel de l'eau présente dans les matériaux de *recouvrement* de la carrière.

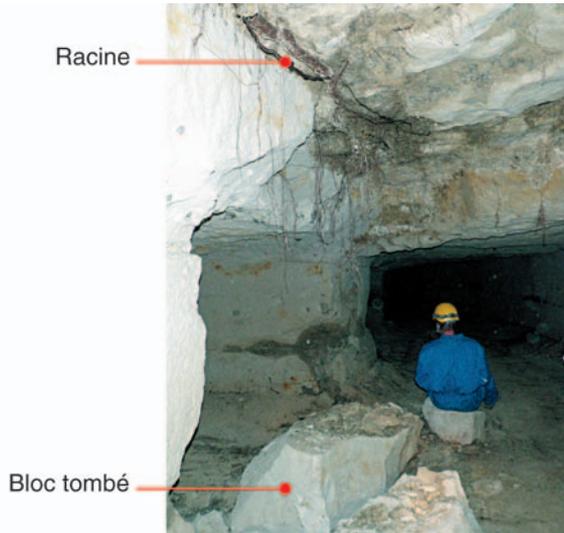


Figure 44  
Désordres en toit de carrière causés par la croissance des racines - Courgeon (Orne)

La présence de racines peut, enfin, modifier les conditions physico-chimiques des roches. L'impact de ce phénomène sur l'instabilité d'une carrière est toutefois mal connu et difficilement quantifiable.

Selon les cas, la végétation peut jouer un rôle favorable ou défavorable en fonction des conditions du site (infiltration, évapotranspiration, ruissellement, etc.) dans la stabilité d'une carrière.

La description s'attachera :

- à localiser les éléments de végétation importants à connaître,
- à préciser les essences d'arbres ou de végétaux en présence, en indiquant, lorsque cela est possible, l'ordre de grandeur de leur taille.

**Variations de charges en surface**

La variation en surface d'une charge, qu'elle soit statique (bâti, remblai-déblai, etc.) ou dynamique (circulations routières ou ferroviaires, surcharge liée à des précipitations), a une influence sur la répartition des contraintes autour de la carrière.

Les surcharges augmentent les contraintes verticales dans les piliers (fig. 45). En bordure de la zone remblayée, les piliers peuvent subir des sollicitations particulières (cisaillement) du fait de l'inclinaison des contraintes induites.

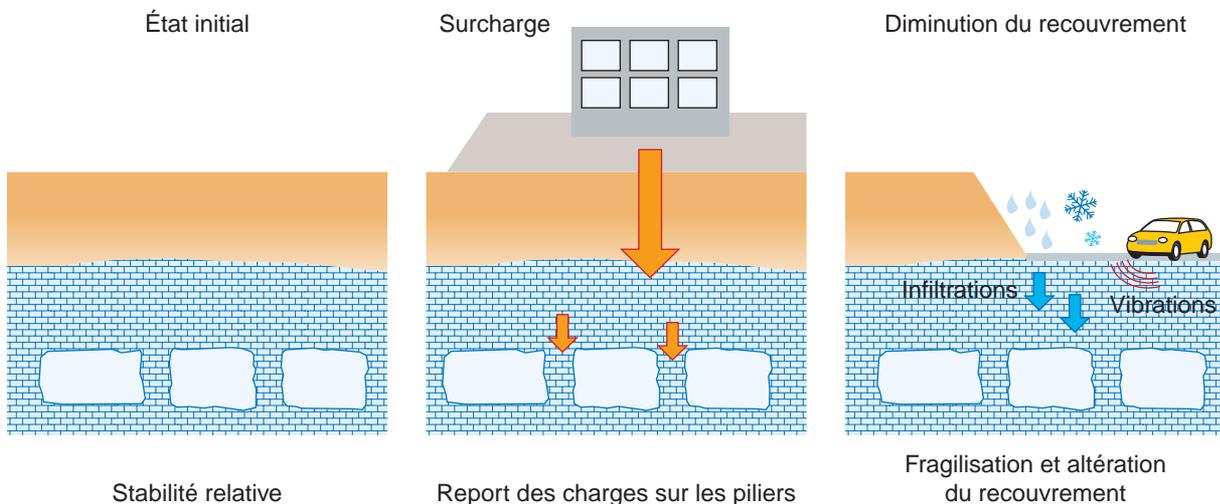


Figure 45  
Impact des variations de charges en surface sur la stabilité d'une carrière

À l'inverse, les déblais tendent à diminuer la charge pour les carrières profondes (influence favorable à la stabilité). Toutefois, la diminution des épaisseurs des terrains de *recouvrement* augmente en contrepartie la sensibilité de la carrière vis à vis des autres facteurs externes (infiltrations, végétation, vibrations). La création d'un déblai peut ainsi contribuer à favoriser l'apparition de désordres en surface (fig. 46).



Figure 46

Lors de la réalisation d'un déblai, la surcharge liée à la pelle a entraîné la rupture de la dalle de toit d'une carrière (Bourges - Cher)

Enfin, dans certaines configurations hydrogéologiques, la présence de *nappes* temporaires dans les formations constituant le *recouvrement* des carrières peut constituer une surcharge.

### **Occupation humaine au sein de la carrière ou en surface**

Les carrières souterraines sont aujourd'hui en majorité abandonnées. Le défaut d'entretien peut être à l'origine d'une dégradation de l'état initial et l'absence de surveillance empêche toute action préventive.

À contrario, une occupation mal maîtrisée (suppression des *piliers*, déblai des *bouillages*, etc.) peut également être nuisible à la stabilité de l'ensemble.

Dans certains cas, les carrières souterraines ou leurs accès ont été utilisés comme des décharges, occasionnant ainsi des risques sanitaires et un danger pour les visites (émanation de gaz).

Une mauvaise occupation de la surface peut aussi être préjudiciable à la stabilité de la carrière, comme par exemple, une modification des écoulements d'eau en surface ou une modification du couvert végétal.

### **Vibrations**

Il semble que les vibrations pourraient avoir un rôle aggravant dans certaines configurations particulièrement instables. Mais leurs effets sur les carrières souterraines sont, à ce jour, très mal connus et non quantifiés.

Les vibrations peuvent avoir plusieurs origines :

- les circulations environnantes (routière, ferroviaire...)
- l'utilisation de certains engins de chantier (compacteurs, brise-roche hydraulique...) (fig. 47) ;
- le bruit excessif (discothèque) ;
- les séismes...



Figure 47

Découverte de façon fortuite d'une carrière souterraine à l'occasion de travaux de terrassement

## 2. Description des désordres

Différents types de désordres sont décrits ci-après ; ils concernent successivement les accès, la carrière elle-même et la surface sus-jacente.

Les mécanismes d'instabilité sont également décrits. Ces descriptions permettent une bonne compréhension des phénomènes constatés en carrière (et au niveau des accès) pour poser le diagnostic souhaité. Les désordres de surface sont ceux qui sont le plus redoutés car ils affectent parfois des terrains occupés au contraire des espaces souterrains abandonnés.

### 2.1 Désordres au niveau des accès

#### **Entrées en cavage**

#### **Désordres affectant le front rocheux et l'entrée de la carrière**

L'observation des désordres commence fréquemment dès l'entrée de la carrière, car celle-ci est creusée dans un matériau déjà affaibli par les phénomènes de décompression et d'altération.

En général, les instabilités se manifestent par des chutes de la dalle de toit (fig. 48) et de blocs au niveau des parois extérieures (fig. 49). Elles peuvent aller jusqu'à l'obstruction de l'entrée par effondrement de la paroi rocheuse.

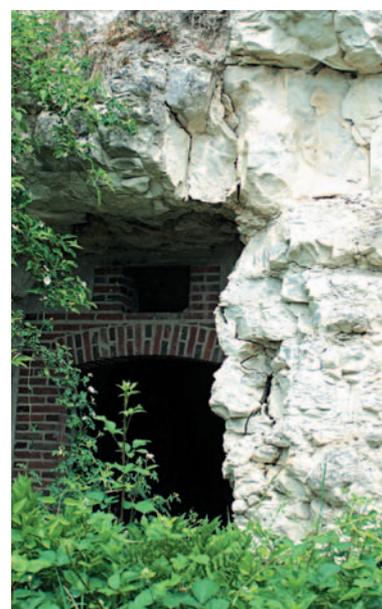
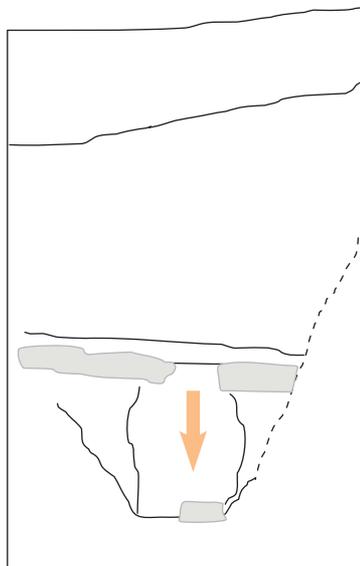


Figure 48

Dalle de toit tombée à l'entrée d'une carrière de calcaire grossier, commune de Mériel (Val-d'Oise)

Figure 49

Fracturation du front rocheux à l'entrée d'une carrière de calcaire grossier à Mériel (Val-d'Oise)

Les mécanismes de rupture mis en jeu sont liés à des efforts de flexion dans la dalle du toit qui peuvent conduire à la rupture de celle-ci d'autant plus facilement qu'elle sera affectée de fractures de décompression (parallèles à la pente).

**Désordres affectant les galeries d'accès**

L'accès à certaines carrières se fait parfois par l'intermédiaire d'une galerie plus ou moins longue et étroite (boyaux) permettant de traverser des terrains tendres ou meubles pour accéder au gisement. Lorsque le poids et la poussée des terres ont été mal appréciés, ces boyaux peuvent connaître des dégradations allant jusqu'à bloquer le passage, par déversement et flambement (excès de compression) des parois latérales et/ou soulèvement du mur (fig. 50).

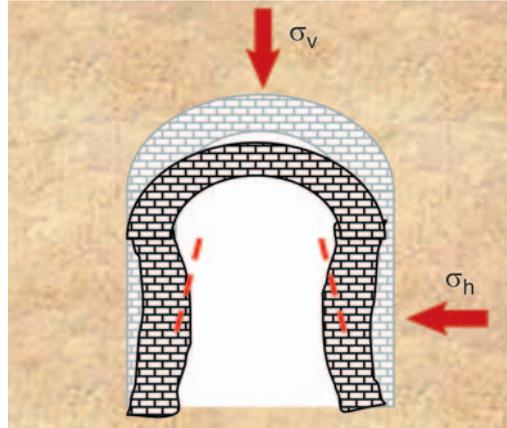


Figure 50  
Désordres sur la paroi d'une galerie d'accès à une carrière de gypse, traversant des éboulis de pente Annet-sur-Marne (Seine-et-Marne)

**Accès par puits**

La majorité des puits d'accès des carrières en plateau, ainsi que certains puits d'aération des carrières accessibles à flanc de coteau, ont été comblés, partiellement ou totalement. Dans certains cas, les puits étaient comblés sur toute leur hauteur, avec blocage des matériaux de comblement par des murs en maçonnerie ; dans d'autres cas, des madriers étaient encastrés à quelques mètres de profondeur puis recouverts de matériaux.

Les ruptures des bouchons de ces puits sont à l'origine de désordres en surface de forme circulaire et de dimensions métriques, mais dont la profondeur peut atteindre plusieurs dizaines de mètres lors du déboufrage d'un comblement partiel.

Le mouvement peut être progressif (tassement des matériaux de remblai) ou brutal (rupture d'un bouchon partiel). Le schéma et les photographies de la figure 51 illustrent ces phénomènes.

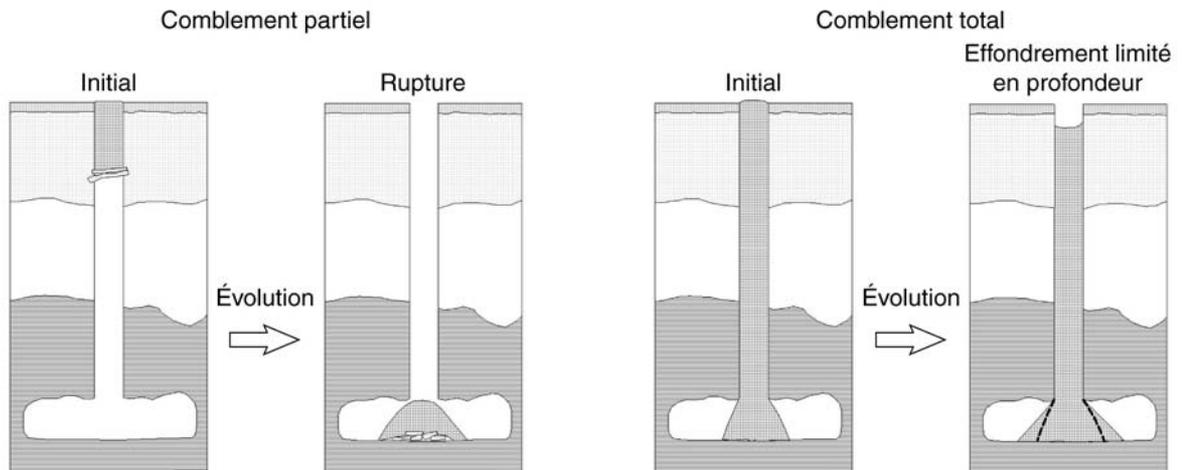


Figure 51 a  
Schéma d'évolution d'un bouchon de puits

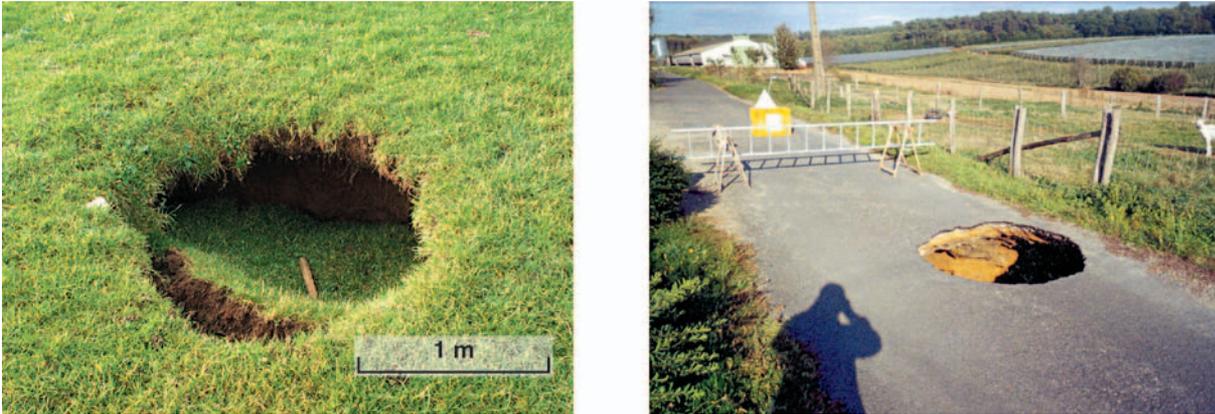


Figure 51 b  
Photographies de rupture de bouchon de puits  
Esteville (Eure) et Verneil-le-Chétif (Sarthe)

### 2.2 Désordres en carrière

Les désordres présentés ci-après sont décrits pour chacune des parties constitutives de la carrière (toit, piliers et mur). Toutefois, il arrive fréquemment que ces désordres concernent plusieurs éléments de la carrière.

#### **Désordres au niveau du toit**

Ces derniers sont liés à la nature des terrains constitutifs du toit, à son degré de fracturation (d'origine tectonique ou mécanique) et aux divers facteurs externes qui peuvent le concerner (surcharge, infiltration d'eau, etc).

Les phénomènes les plus fréquents sont des chutes de dalles du toit et des montées de cloches de *fontis* ainsi que des chutes de masses prédécoupées par les fractures de diverses origines.

#### **Le fléchissement des dalles et les chutes de toit**

Lorsque le *toit* d'une carrière exploitée par *galeries* filantes ou par *chambres* et *piliers* est formé d'une roche finement stratifiée, les désordres les plus fréquents sont les *décollements de banc* du *toit*, suivis à plus ou moins long terme par des « *ciels tombés* » ou chute de la première dalle de *toit*.

Le fléchissement des *bancs* de *toit* (fig. 52), qui prélude la chute de *toit*, concerne plus particulièrement les bancs lités (souvent présents dans les calcaires et marno-calcaires, plus rarement dans le gypse).



Figure 52  
Fléchissement des bancs du toit dans une carrière de calcaire grossier du bois de Vincennes (Paris)

## Chapitre 2

Les chutes de *toit* sont courantes en carrières souterraines (fig. 53) et peuvent constituer le stade initial d'une montée des désordres vers la surface.

Leurs formes et leur volume dépendent de la nature du matériau, de la géométrie de l'exploitation ainsi que du degré de fracturation du massif rocheux.

Dans le cas de matériaux peu ou pas fracturés, les *ciels* tombés sont situés généralement aux carrefours de galeries, là où les portées sont les plus grandes et ils prennent alors le plus souvent une forme elliptique.



Figure 53 : Chute du toit d'une carrière de calcaire grossier à Méry-sur-Oise (Val-d'oise)

L'explication mécanique de ces désordres repose sur les éléments suivants :

- le creusement de la galerie induit une redistribution des contraintes à son voisinage (fig. 54) ; en particulier, la contrainte verticale au *toit* est quasi nulle, ce qui induit une faible sollicitation des bancs du ciel, bénéficiant d'un effet de voûte au-dessus de la galerie ;

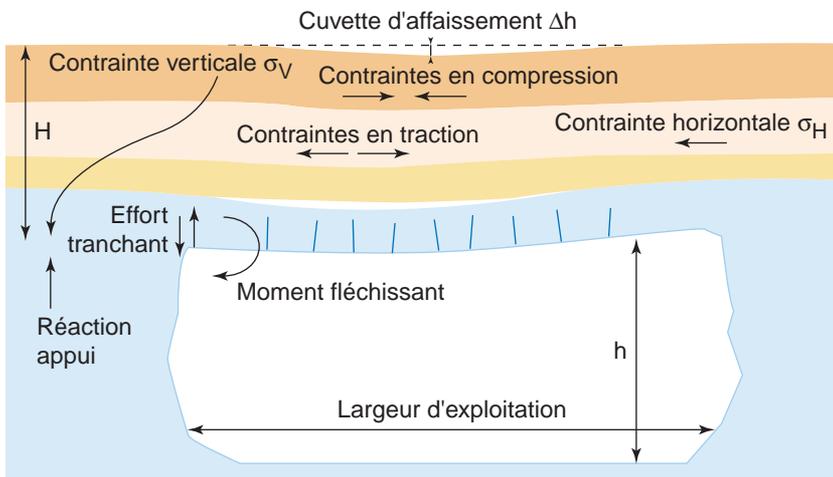


Figure 54  
Schéma explicatif du phénomène.  
Les bancs de toit sont décollés  
et ne supportent donc que leur  
propre poids

- la flexion des *bancs* de *toit* est principalement liée au poids propre de ces bancs. Le décollement de bancs que l'on observe fréquemment exprime cette absence de chargement vertical ; il est lié à la résistance quasi-nulle des joints à la traction. On explique ainsi l'efficacité de *piliers* à bras de faible résistance, qui suffisent à bloquer le processus de décollement-chute (fig. 55) ;

- en l'absence de fractures tectoniques, les chutes de toit sont en général en relation avec des *portées* trop grandes (telles que celles observées aux carrefours de galeries) et avec la rupture par flexion d'un premier *banc* de *toit*, généralement lité et insuffisamment résistant par rapport à son épaisseur. L'apparition de *fractures mécaniques* est souvent engendrée par l'accentuation du fléchissement de la dalle du *toit*. Celles-ci, fréquentes dans l'axe des galeries (fig. 56), suivent un tracé long parfois de quelques dizaines de mètres, en ligne droite ou en baïonnettes, par réfraction sur des diaclases ou toute autre discontinuité.



Figure 55  
Piliers à bras soutenant une dalle de toit dans une carrière de calcaire grossier Bois de Vincennes (Paris)



Figure 56  
Fracturation mécanique de la voûte d'une carrière de craie du Sénonien à Lavardin (Loir-et-Cher)

- dans les massifs rocheux naturellement fracturés, l'activité extractive se heurte au pré-découpage de la roche, qui constitue généralement un facteur d'instabilité supplémentaire, en particulier au niveau de la tenue du toit (fig. 57).

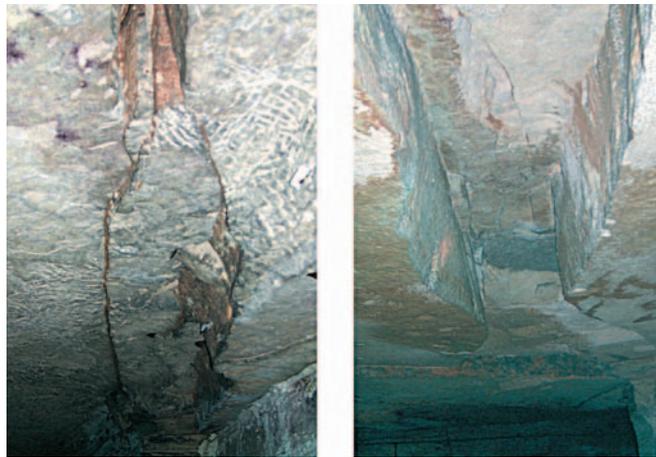


Figure 57  
Fractures de décompression (à gauche) et panneau décimétrique de toit effondré (à droite), dans la carrière de calcaire grossier de Mériel (Val-d'Oise)

### Cloches de fontis

On appelle montée de cloche de fontis un vide qui progresse (fig. 58) vers la surface (suivant une cheminée pseudo cylindrique dont le diamètre est proche de celui de l'effondrement initial) par ruptures successives des terrains surmontant le vide initial.

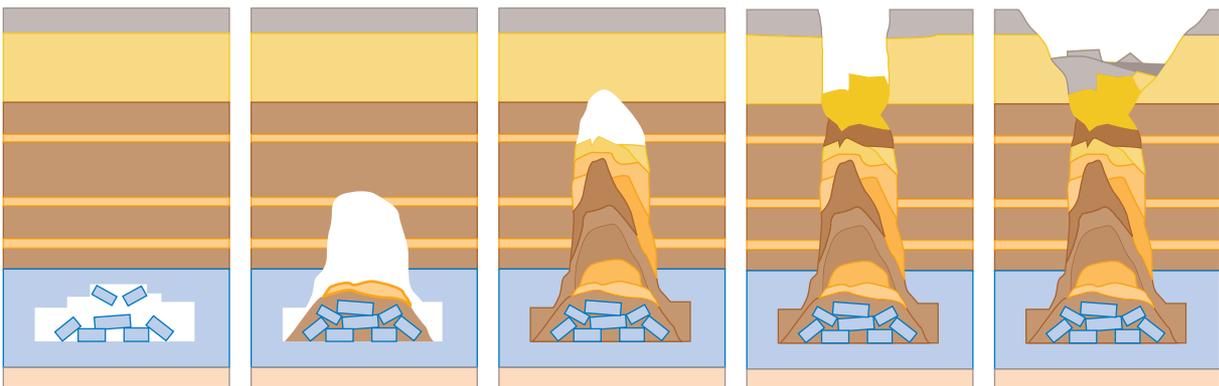


Figure 58  
Schéma d'évolution d'un fontis

## Chapitre 2

Les mécanismes qui déclenchent le phénomène sont généralement associés :

- à la flexion ou au cisaillement de la dalle de *toit* lorsque la *portée* est excessive ;
- à la chute de blocs au *toit*, en lien avec un découpage par combinaison de *fractures tectoniques* ou *mécaniques* ;
- à la rupture localisée de *pilier* entraînant une partie de *toit*.

La vitesse de montée vers la surface dépend de la nature lithologique des terrains considérés et de l'existence de facteurs externes aggravants (infiltration d'eau, nappe dans des terrains non cohésifs, etc.).



Cette montée du vide peut être stoppée par le foisonnement des matériaux éboulés (auto comblement) ou quand la cloche rencontre un banc plus raide dans les terrains de *recouvrement*. Le phénomène peut être ralenti par des phases d'équilibre transitoires durant lesquelles le sommet de la cavité présente une géométrie en voûte ou « cloche » temporairement stable (fig. 59).

Figure 59

Vue d'une cloche de fontis au toit d'une carrière de gypse de Triel-sur-Seine (Yvelines)

Noter la présence de la surface stratigraphique ou « faux-ciel » et du sommet du cône d'éboulis.

Quand les vides sont suffisamment importants, au regard de l'épaisseur de *recouvrement*, les matériaux éboulés et *foisonnés* se répandent sans obturer complètement la cloche et les désordres atteignent la surface (fig. 60).



Figure 60

Déversement des matériaux argilo-marneux saturés du recouvrement au travers d'une cloche de fontis affectant une carrière de gypse à Taverny (Val-d'Oise)

### Désordres liés à la présence de poches de matériaux meubles

Dans des matériaux soumis à des phénomènes de dissolution, on rencontre localement des poches comblées par des matériaux meubles (issus des formations de couverture).

Ces poches peuvent se vidanger plus ou moins brutalement et constituent par ailleurs des drains préférentiels qui, en favorisant des arrivées d'eau dans la cavité, sont susceptibles de déstabiliser localement la carrière (fig. 61 et 62). Ce phénomène peut également occasionner des désordres perceptibles en surface (ouverture de points d'infiltration des eaux de surface).



Figure 61  
Cheminée karstique remplie de  
matériaux argileux  
Carrière de la Glacière à Vendôme  
(Loir-et-Cher)



Figure 62  
Débourrage d'un conduit karstique dans une marnière  
de Seine-Maritime

### **Désordres au niveau des piliers**

#### **Cas de 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. 63) ;
- *écaillages* plus ou moins importants (fig. 64 et 65) ;
- effacement des piliers par rupture en « diabolos » (fig. 66).

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 63  
Fissure mécanique dans un pilier d'une carrière  
de calcaire grossier à Mériel (Val-d'Oise)



Figure 64  
Petit écaillage d'un pilier  
ou épaufrure à Courgeon (Orne)



Figure 65  
Écaillage important d'un pilier  
de la carrière de calcaire grossier  
de Méry-sur-Oise (Val-d'Oise)



Figure 66  
Pilier en diablo dans une carrière  
de gypse à Roquevaire  
(Bouche-du-Rhône)

### Cas des piliers affectés par des alternances lithologiques

Dans certains cas, des variations ponctuelles de la *lithologie* des piliers peuvent occasionner des désordres particuliers n'affectant qu'une partie du pilier (contrôle lithologique). Ainsi, lorsque deux niveaux de raideurs distinctes se superposent, on assiste à des phénomènes de traction-cisaillement au sein du pilier. Les terrains les plus tendres fluent sous l'effet de la charge et les terrains les plus résistants développent des fentes de traction (fig. 67).

À 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 68.

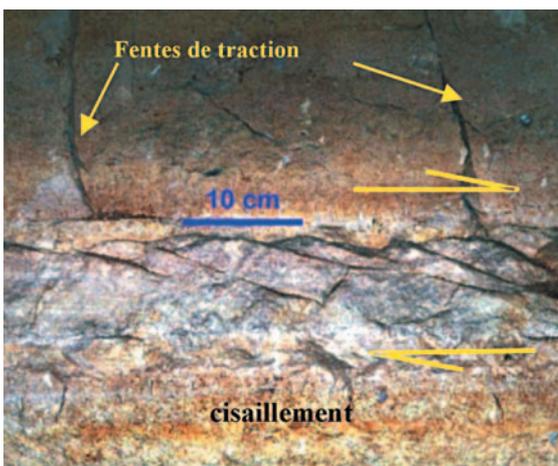


Figure 67  
Fluage du banc beige et fentes de traction associées  
Carrière calcaire grossier, bois de Vincennes  
(D. Moiriat, 2001)



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

Figure 68  
Ruine d'un niveau d'un pilier de la première masse de  
gypse à Neuilly Plaisance (Seine-Saint-Denis)

### Cas des piliers affectés par des discontinuités structurales

Dans des environnements fracturés, les désordres observés dans les piliers sont directement guidés par la position des discontinuités (contrôle structural).

Les piliers peuvent être découpés par des fractures tectoniques obliques qui modifient la distribution des contraintes, donnent lieu à l'apparition de désordres spécifiques et réduisent ainsi leur surface utile (fig. 69).

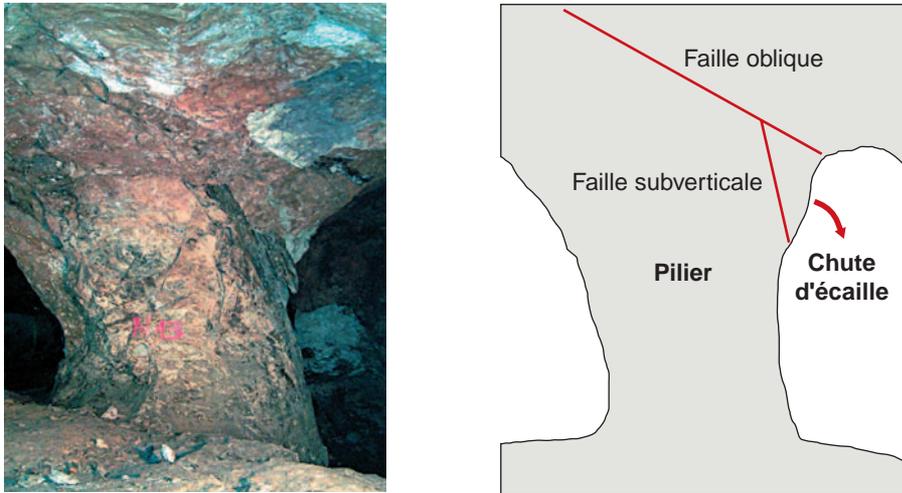


Figure 69  
Cisaillement sur fracture tectonique et chute d'écaillage potentielle dans la carrière de gypse de Roquevaire (Bouches-du-Rhône)



Les *failles de versant* (ou failles de *décompression*) affectent également les *piliers* (fig. 70), déviant le champ de contraintes et générant un effort de cisaillement.

La densité et la direction de ces failles évoluent avec la distance vis-à-vis du versant (fig. 71), entraînant des variations des types de désordres associés.

Figure 70  
Faille de versant affectant le toit et un pilier d'une carrière de calcaire grossier à Mériel (Val-d'Oise)

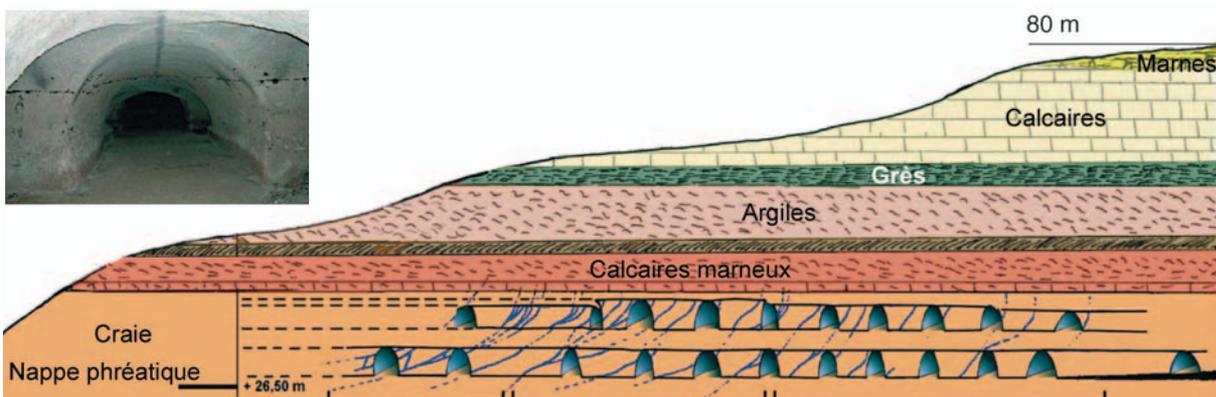


Figure 71  
Répartition des fractures de versant dans une carrière de craie de Meudon (Hauts-de-Seine)  
(D. Moiriat, 2001)

### Cas des piliers affectés par plusieurs types de discontinuités

Dans un milieu sédimentaire nettement stratifié, des désordres, appelés défournements, apparaissent en nez de pilier (c'est à dire sur l'arrête saillante de celui-ci). Il s'agit de l'effondrement de dièdres découpés par des fractures structurales ou des fractures mécaniques combinées à des joints stratigraphiques (fig. 72).

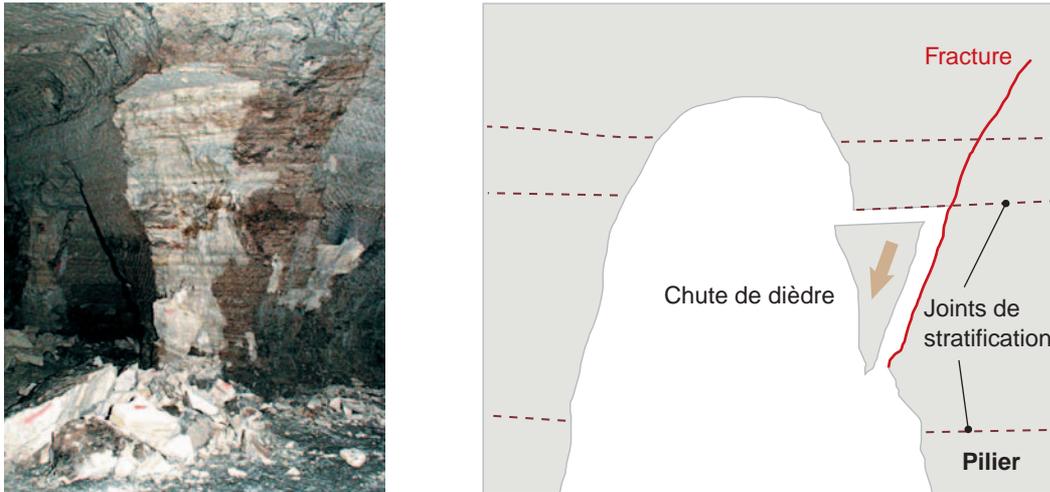


Figure 72

Vue et schéma d'un défournement de nez de pilier dans la carrière de gypse de Triel-sur-Seine (Yvelines)

### Désordres au niveau du mur

Dans une carrière exploitée par piliers tournés, lorsque le mur est constitué d'un banc peu épais reposant sur une couche relativement plus déformable, un poinçonnement de cette couche inférieure par les piliers peut se produire ; il s'accompagne d'un soulèvement du plancher des galeries (soufflage). Ce mécanisme initie des dégradations d'autres parties de la carrière (désordres des piliers, notamment).

L'explication mécanique est la suivante :

- la couche inférieure formant la dalle reçoit toute la charge des terrains de recouvrement par l'intermédiaire des piliers ; la planche résiduelle subit une flexion au droit des piliers ;
- si la capacité portante (à long terme) de la couche inférieure est insuffisante, un poinçonnement se développe ; la planche résiduelle sous les galeries adjacentes est alors cisailée et un soulèvement se produit au centre des galeries (fig. 73).

Ce phénomène est particulièrement fréquent dans les carrières de gypse ludien de la région parisienne, la couche exploitée reposant sur des marnes.

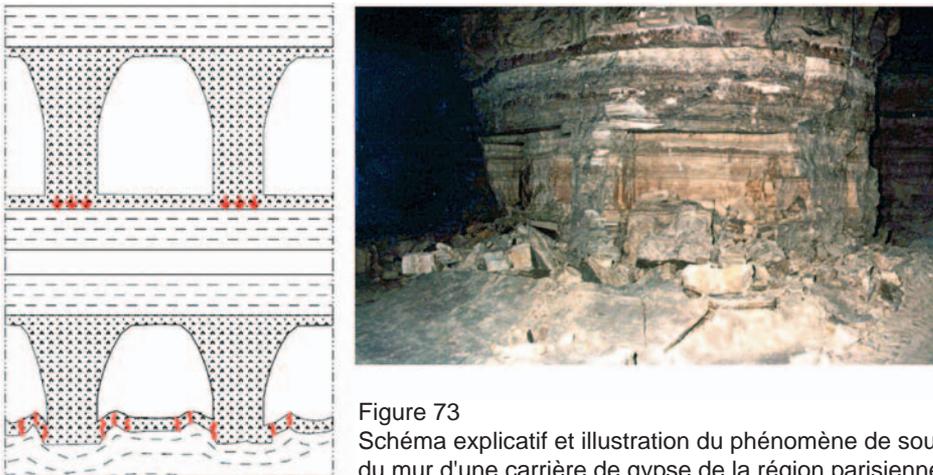


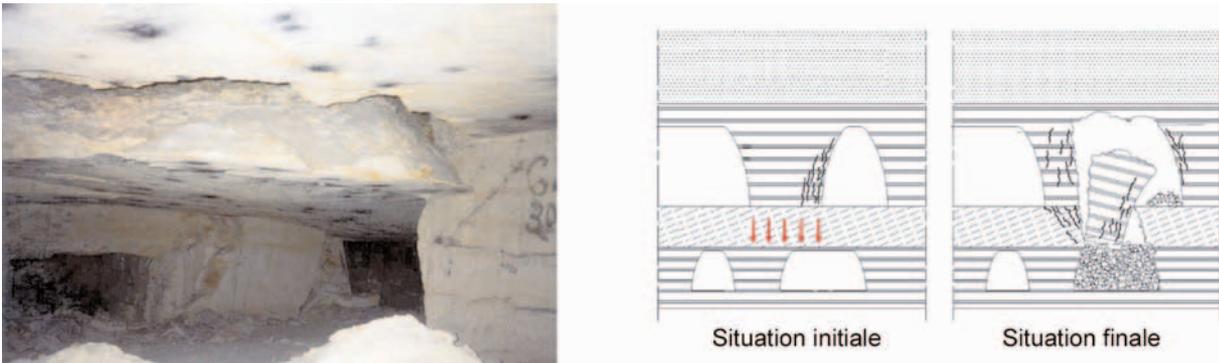
Figure 73

Schéma explicatif et illustration du phénomène de soufflage du mur d'une carrière de gypse de la région parisienne Triel-sur-Seine (Yvelines)

**Désordres liés aux carrières à plusieurs niveaux**

La spécificité des désordres liés aux carrières se développant sur plusieurs niveaux peut résulter soit d'un défaut de superposition des *piliers* entre niveaux, soit de la défaillance de résistance mécanique du *niveau intercalaire*.

- Les défauts de superposition des *piliers* (fig. 74a) se traduisent par des reports d'efforts préjudiciables dans les niveaux (fig. 74b). La perte d'assise des piliers du niveau supérieur peut conduire à leur ruine et causer à terme l'apparition de désordres en surface.



Figures 74a et b

Vue et schéma d'évolution d'une carrière à deux niveaux avec mauvaise superposition des piliers

- Lorsque la superposition des piliers n'est pas en cause, la ruine du niveau séparatif sous son poids propre se traduit par une perte de *frettage* sur un pilier devenu unique (continuité entre le ciel du niveau supérieur et le *mur* du niveau inférieur). L'élançement alors plus important induit une fragilité accrue du pilier et sa possible ruine (fig. 75).

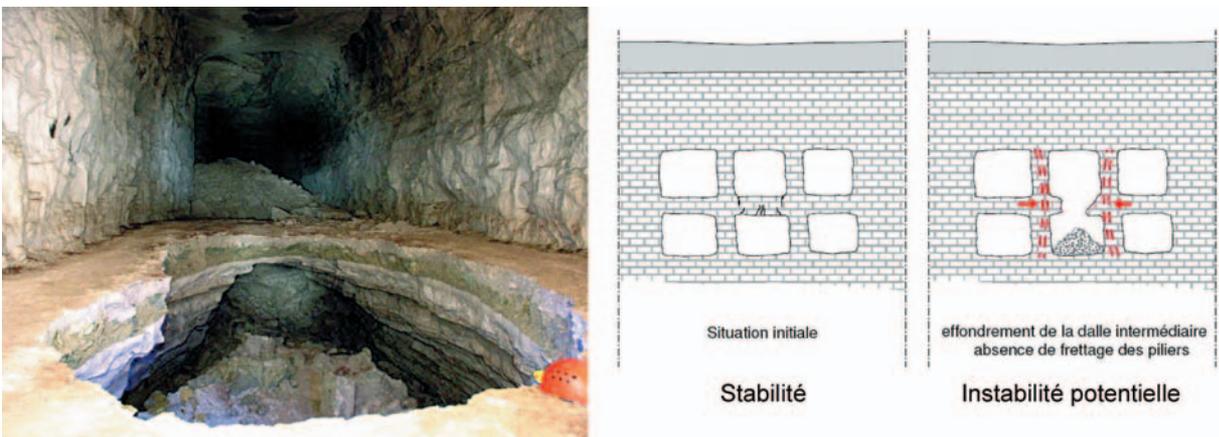


Figure 75

Vue et schéma d'une rupture du niveau séparatif dans une carrière de gypse à Annet-sur-Marne (Seine-et-Marne)

### 2.3 Désordres en surface

À plus ou moins long terme et de façon plus ou moins brutale, les cavités souterraines sont vouées à une ruine qui peut entraîner des désordres de surface dont les caractéristiques vont dépendre de différents facteurs (importance et profondeur des vides, mode de rupture, nature des terrains de *recouvrement*, etc.).

En fonction de la topographie de surface, ces désordres auront des caractéristiques géométriques variables (effets d'une pente, par exemple) et pourront occasionner des phénomènes connexes tels que des glissements de terrain ou des chutes de blocs (cas des falaises sous-cavées, par exemple).

#### **Affaissements**

Un *affaissement* se manifeste par une dépression topographique en forme de cuvette à fond plat et bords fléchis (fig. 76 et 77), consécutive à la ruine partielle ou totale d'une carrière souterraine.

Les conditions de formation d'un *affaissement* sont de deux sortes :

- soit le *recouvrement* se déforme souplement ;
- soit la présence de remblais au sein de la carrière amortit la descente globale des matériaux (exploitations par *hagues* et *bouffrages* ou affaissements dirigés).

Les dimensions de la zone affaissée vont dépendre de l'extension de la cavité éboulée et de l'angle de propagation des désordres dans les terrains de couverture. L'extension en surface varie de quelques mètres à quelques dizaines de mètres. La profondeur maximale ( $\Delta h$ ) est, en général, métrique. Bien que difficile à évaluer, ces données sont importantes à établir.

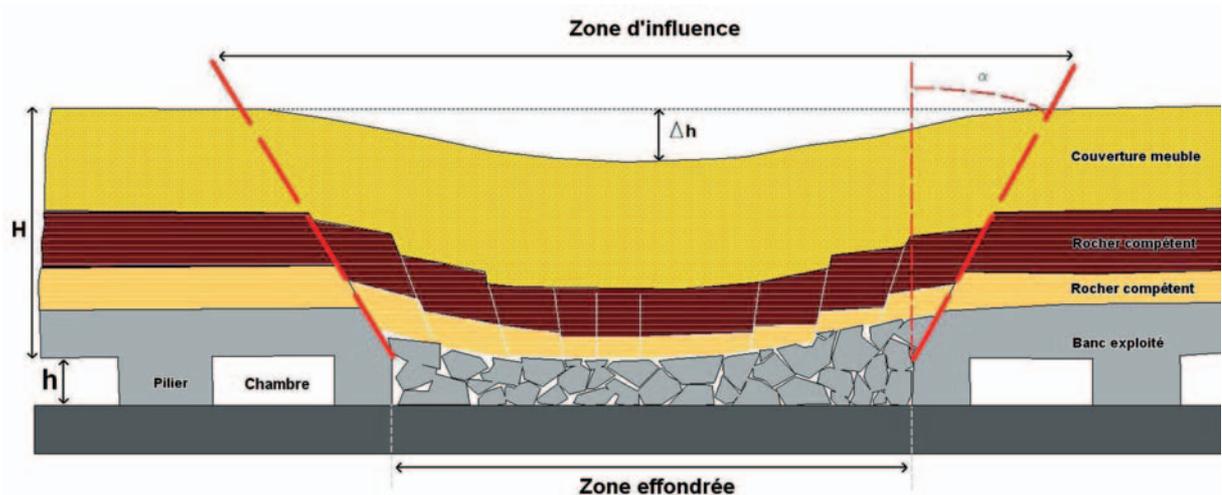


Figure 76  
Schéma de principe d'un affaissement



Figure 77  
Affaissement à l'aplomb d'une carrière souterraine à Meigné (Maine-et-Loire)

Les affaissements se développent progressivement en surface mais ils peuvent être d'une intensité importante et provoquer la ruine des constructions exposées.

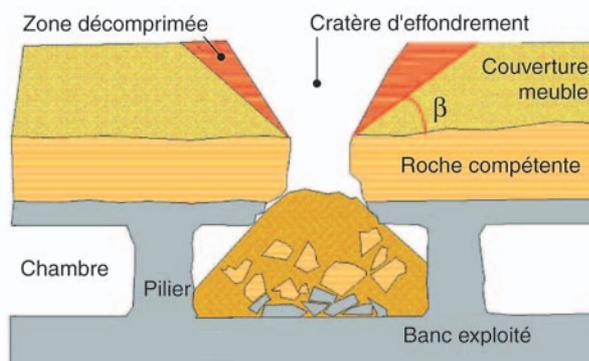
Dans certains cas, l'affaissement provoqué constitue une technique d'exploitation à part entière (voir chapitre 1.3.3 - Affaissement dirigé). L'amplitude des tassements survenant en surface résulte des tassements instantanés dus au foudroyage de la galerie ainsi qu'à des tassements différés liés à la compaction progressive des matériaux remaniés du recouvrement. Ainsi, sur des exploitations de gypse de la région parisienne de 5 à 8 mètres de hauteur, sous près de 80 mètres de couverture de marnes et de sables, la technique des affaissements dirigés a induit des tassements en surface compris entre 1,60 et 3,90 mètres.

### **Effondrements ponctuels (fontis)**

Un fontis est un effondrement brutal provoqué par le débouché à la surface de la cloche de fontis. Il prend la forme d'un entonnoir ou celle d'un cratère pseudo-circulaire (fig. 78a).

Le diamètre initial (de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres de diamètre) ainsi que sa forme dépendent du diamètre de la cloche de fontis, de la présence d'eau et des caractéristiques géotechniques des terrains de surface.

Lorsque les terrains de recouvrement sont plutôt meubles, on constatera une évolution du diamètre dans le temps (fig. 78b et c). Les parois du fontis, initialement subverticales, auront tendance à s'évaser pour atteindre un angle correspondant à la pente d'équilibre des terrains (pente  $\beta$  de la fig. 79). Les indications même approximatives sur les pentes sont intéressantes pour évaluer les possibilités d'évolution ultérieures.



Figures 78a, b et c  
Apparition d'un fontis circulaire (diamètre 5 mètres) à l'aplomb d'une carrière à Villedieu le Château (Loir-et-Cher) le jour de l'effondrement (photographie a). 10 jours plus tard, le diamètre du fontis a évolué (photographie b). 1 mois et demi après, le fontis atteint la voie communale (diamètre 8m - photographie c)

Figure 79  
Schéma type d'un fontis

Dans certains cas, le fontis met directement en relation la carrière avec la surface (fig. 80).



Figure 80  
Photographie du même fontis que sur la figure 78, prise avec un angle plongeant mettant en évidence la présence de la galerie souterraine

### **Effondrements généralisés**

En liaison avec la ruine totale ou partielle d'une carrière souterraine exploitée par chambres et piliers, l'*effondrement généralisé* (fig. 81 et 82) se manifeste en surface quasiment instantanément après l'évènement souterrain, de façon violente et spontanée. Les bords de l'effondrement sont marqués par des fractures. Ses dimensions, qui peuvent atteindre quelques centaines de mètres, sont en rapport avec celles de la cavité effondrée, la nature des terrains de recouvrement ainsi que la profondeur de la carrière.

Ce type de désordre se produit lorsque la rupture en chaîne des piliers entraîne un report de charge vers les terrains de couverture. Plus l'épaisseur et la résistance mécanique des terrains de recouvrement sont importantes, plus la probabilité que l'intégralité de la carrière soit affectée sera élevée.

À l'intérieur de la zone effondrée, des vides résiduels peuvent subsister. Ils pourront être à l'origine de mouvements de surface ultérieurs.



Figure 81  
Effondrement généralisé d'une marnière en Haute-Normandie

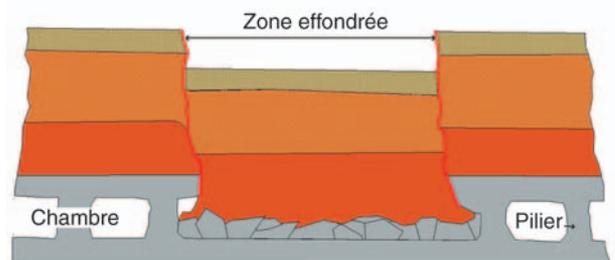


Figure 82  
Schéma type d'un effondrement généralisé

## Chapitre 3

# Éléments de commande d'un diagnostic de stabilité

## 1. Qu'est-ce qu'un diagnostic ?

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.

Pour réaliser le diagnostic, il est nécessaire d'acquérir certains éléments préalables (décrits au chapitre 4) qui permettront une évaluation de la stabilité de la carrière (voir chapitre 5).

Pour remplir son devoir de conseil, le bureau d'études devra accompagner le diagnostic :

- de recommandations de mesures de sécurité et/ou de travaux de confortement et /ou de surveillance. (Ce point sera décrit succinctement au paragraphe 5 de ce chapitre « Suites du diagnostic » mais ne fait pas l'objet de ce guide) ;
- 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 font l'objet, le cas échéant, d'une mission spécifique complémentaire.

Le diagnostic de stabilité doit idéalement combiner des approches complémentaires à savoir celles du naturaliste, de l'ingénieur et du modélisateur.

- L'approche du naturaliste doit permettre de rassembler des éléments objectifs de description de la carrière, de son environnement géologique, structural et hydrogéologique et de leurs évolutions. Une bonne connaissance de sites similaires dans un contexte géologique comparable peut permettre de formuler un diagnostic qualitatif pertinent.
- L'approche de l'ingénieur s'appuiera sur des paramètres géotechniques du site, des caractéristiques mécaniques des matériaux et sur un suivi instrumental éventuel. L'utilisation de calculs ou de règles empiriques doit permettre de formuler un diagnostic quantitatif. Ce diagnostic sera d'autant plus détaillé et pertinent que le site est accessible et qu'il a fait ou qu'il fera l'objet d'investigations.
- Avec le développement des outils de modélisation numérique, il est désormais possible de modéliser certains comportements géo-mécaniques. L'approche du modélisateur, même si elle ne prend que difficilement en compte l'ensemble des paramètres et facteurs entrant en jeu dans ces comportements, est un outil précieux pour la compréhension des mécanismes de rupture.

## 2. Définition des niveaux de diagnostic

Schématiquement, quatre types de diagnostic peuvent être identifiés en fonction des objectifs recherchés, des moyens à mettre en œuvre et du temps requis pour les mener à bien comme indiqué dans le tableau 1.

Un même site pourra faire l'objet de différents types de diagnostics en fonction de l'urgence et de la nature du risque. Si des vies humaines sont menacées, un diagnostic d'urgence doit être formulé, sans mettre en œuvre des moyens élaborés. Par ailleurs, si le site présente des enjeux particuliers, des moyens spécifiques pourront être employés après une reconnaissance détaillée du site.

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).

Tableau 1  
Définitions des différents types de diagnostics

Niveau	Objectif du diagnostic	Éléments nécessaires au diagnostic	Outils du diagnostic	Temps requis
<b>Diagnostic d'urgence</b>	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

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).

Il n'est pas possible de faire un diagnostic de niveau 3 pour une carrière inaccessible.

Une logique d'enchaînement des niveaux de diagnostic est proposée sur le logigramme suivant (fig. 83).

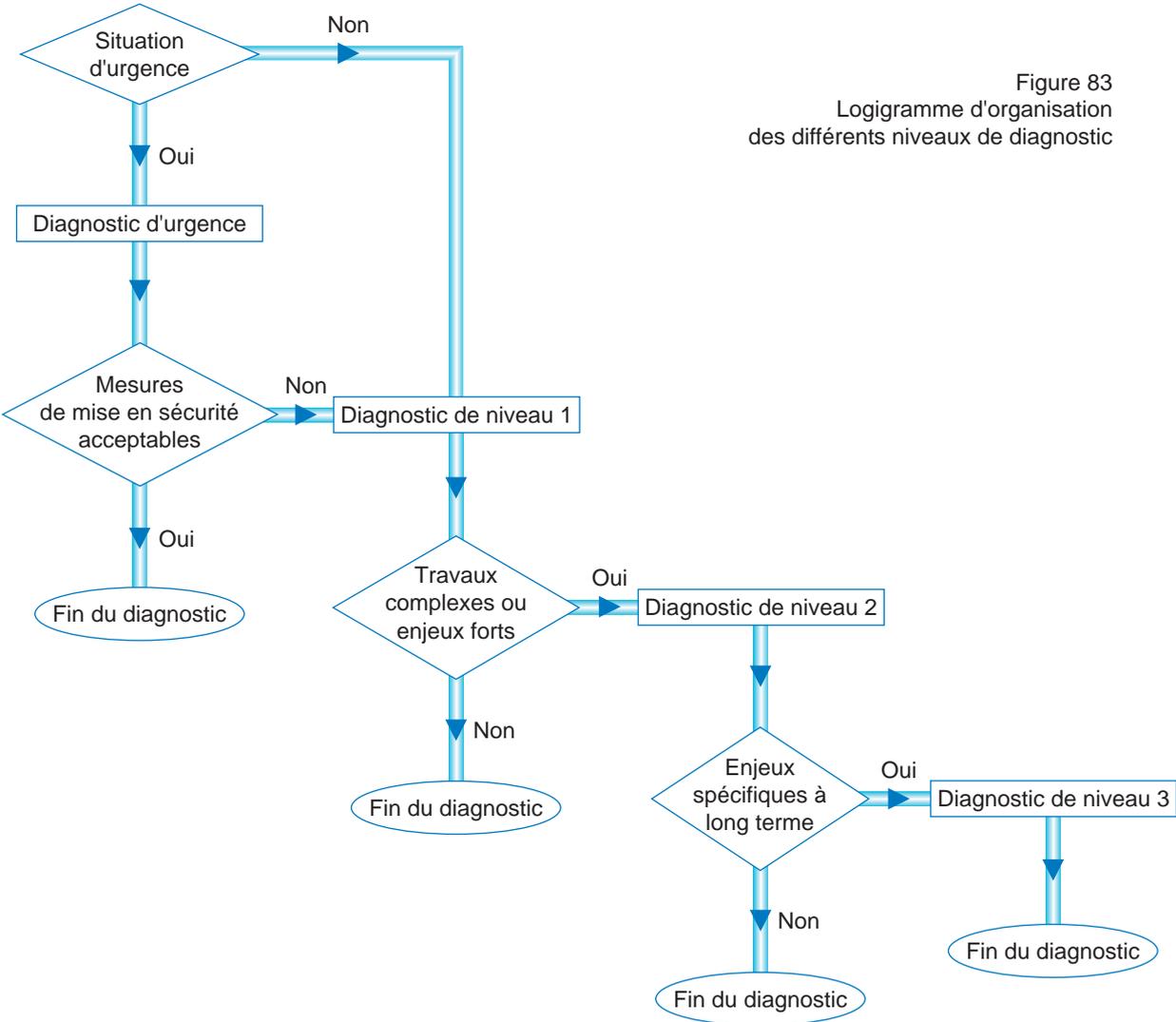


Figure 83  
Logigramme d'organisation  
des différents niveaux de diagnostic

### 3. Principes de réalisation d'un diagnostic

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

#### 3.1 Définition du 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.

En effet, l'approche différera notablement selon que le diagnostic sert à l'établissement d'une carte d'aléa sur un territoire étendu (exemple des PPR) ou qu'il renseigne sur le risque de déstabilisation d'une parcelle. Le périmètre d'étude sera également différent selon la nature des phénomènes redoutés : un fontis ou un effondrement généralisé ne concerne pas les mêmes surfaces et n'a pas le même mode de propagation vers la surface.

#### 3.2 Acquisition des données nécessaires

Selon le niveau de diagnostic visé et l'accessibilité de la carrière souterraine, une démarche logique est à engager afin de collecter l'ensemble des données nécessaires décrites dans le chapitre 4. Cette démarche est reprise dans le logigramme de la figure 84.

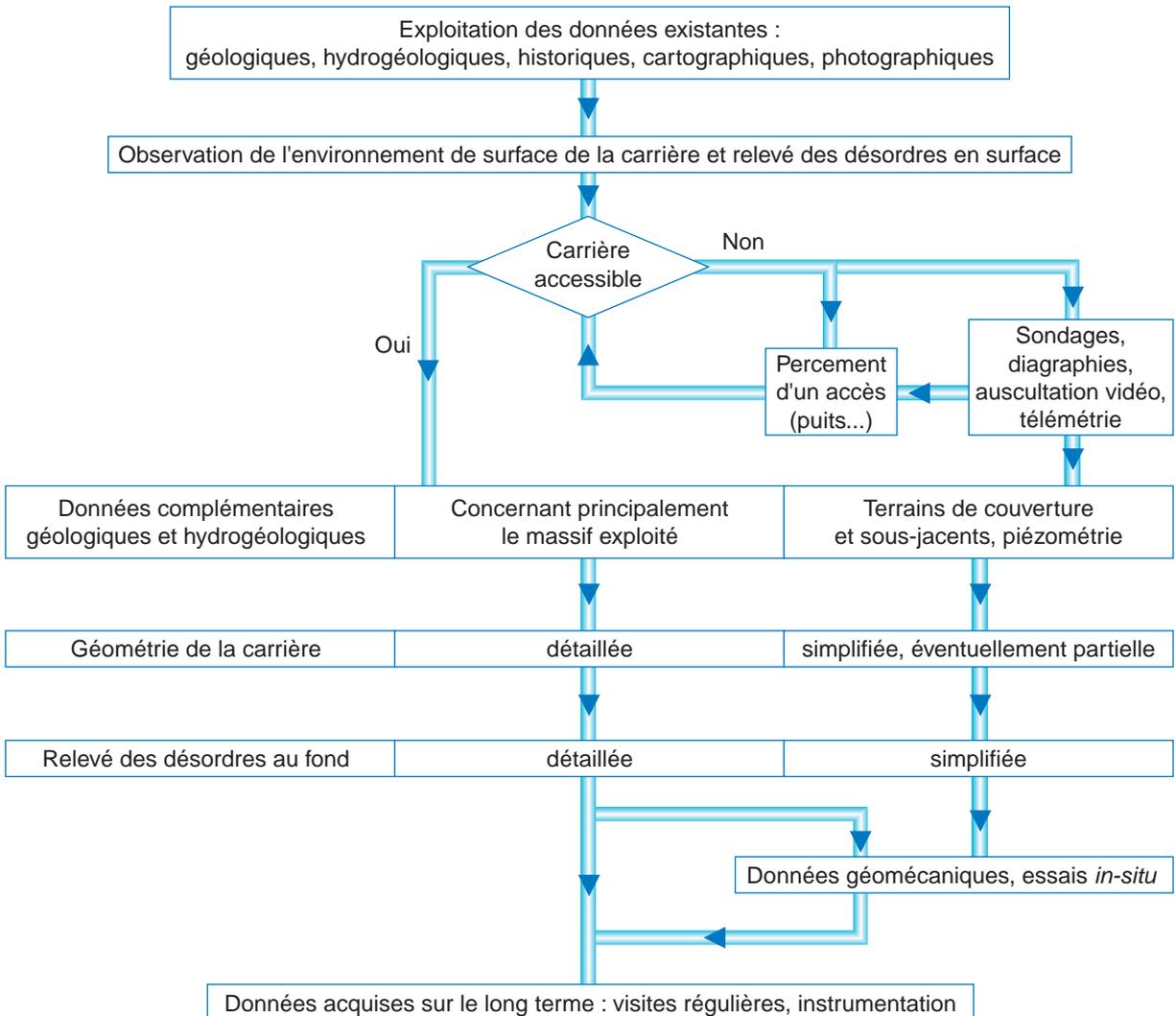


Figure 84  
Logigramme présentant l'enchaînement de l'acquisition des données nécessaires au diagnostic

### 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 une instabilité de la voûte).

### 3.4 Formulation du diagnostic (qualification et zonage d'aléa)

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.

La qualification de l'aléa nécessite la mise en œuvre de techniques détaillées au chapitre 5.

## 4. Les résultats attendus pour chaque niveau

La formulation du diagnostic, quel qu'en soit le niveau, mettra l'accent sur :

- la (les) cause(s) des désordres observés (en surface, en carrière) ;
- le degré de stabilité actuel et futur de la carrière ;
- la caractérisation des aléas de surface liés à la carrière avec un niveau de précision en cohérence avec le niveau de diagnostic considéré ;
- l'impact potentiel sur les enjeux présents.

### 4.1 Diagnostic d'urgence

Le diagnostic d'urgence se traduit par un compte-rendu oral auprès du donneur d'ordre et par l'élaboration d'une note qui décrira au minimum :

- le contexte (topographique, géologique, hydrogéologique, historique) ;
- les désordres observés en surface et en carrière, si elle est accessible.

Cette note fera une synthèse de ces éléments afin :

- de définir l'origine des désordres ;
- d'identifier et qualifier succinctement les aléas (phénomènes redoutés) ;
- de définir les préconisations d'urgence nécessaires pour réduire le risque à court terme sur les enjeux portés à la connaissance de l'expert ;
- de fixer, au besoin, les investigations nécessaires à l'établissement d'un diagnostic de niveau 1.

La description des désordres s'appuiera avantagement sur des photographies.

### 4.2 Diagnostic de niveau 1

Ce niveau de diagnostic s'appuie principalement sur une cartographie géotechnique qui sera établie sur un fond de plan levé à une précision adaptée (voir le chapitre 4 paragraphe 2.3).

La cartographie géotechnique positionnera tous les éléments obtenus lors de la réalisation de l'étude pouvant intervenir dans l'instabilité de la carrière et notamment :

- les données existantes (historiques, géométriques, géologiques...) de la carrière ;
- les désordres en surface et en carrière ;
- les résultats des investigations (principalement relevés topographique et géologique).

Cette carte sera complétée par une cartographie des aléas « mouvement de terrain » en surface et en carrière.

## Chapitre 3

Le rapport de synthèse associé à cette cartographie :

- détaillera et interprétera les investigations réalisées ;
- décrira les instabilités observées, leurs origines et leurs mécanismes d'évolution ;
- qualifiera les aléas « mouvement de terrain » liés à la carrière ;
- donnera les principes des travaux de confortement nécessaires ;
- définira, au besoin, les investigations à mettre en œuvre dans le cadre d'un diagnostic de niveau 2.

### 4.3 Diagnostic de niveau 2

Ce niveau de diagnostic a pour objectif de quantifier le niveau de stabilité de la carrière. Chronologiquement, il peut être entrepris à la suite d'un diagnostic d'urgence ou d'un diagnostic de niveau 1. Techniquement, il comprend une première étape comprenant les objectifs du diagnostic de niveau 1 (qualification de l'aléa). L'élaboration d'une cartographie géotechnique est donc un pré-requis.

On retrouvera sur cette cartographie, en plus des éléments du niveau 1, la localisation des reconnaissances réalisées spécifiquement pour ce niveau d'étude et les secteurs faisant l'objet des calculs analytiques.

Le rapport de synthèse comprendra :

- les investigations (reconnaisances et essais) menées, leur analyse et interprétation ;
- les calculs analytiques réalisés et les hypothèses adoptées ;
- la quantification de la stabilité de la carrière à court, moyen et long terme ;
- la qualification des aléas « mouvement de terrain » liés à la carrière ;
- tous les éléments permettant le pré-dimensionnement des confortements nécessaires ;
- la définition, au besoin, des investigations à mettre en œuvre dans le cadre d'un diagnostic de niveau 3.

### 4.4 Diagnostic de niveau 3

Ce niveau de diagnostic a pour objectif d'étudier le comportement mécanique de la carrière et son évolution potentielle. Chronologiquement, il peut être entrepris à la suite de tout type de diagnostic. Techniquement, il reprendra les différentes étapes correspondant aux diagnostics de niveau 1 et 2. En conséquence, les données collectées devront être actualisées.

La cartographie géotechnique localisera les zones évaluées par approche numérique et/ou celles faisant l'objet d'un suivi par instrumentation.

Le rapport d'étude présentera :

- une synthèse des études antérieures ;
- l'instrumentation mise en œuvre et l'interprétation des résultats des mesures ;
- la description des essais réalisés (données géomécaniques) et leur interprétation ;
- les calculs numériques réalisés et leur interprétation ;
- tous les éléments permettant le dimensionnement de travaux de confortement nécessaires.

Le rapport devra conclure sur :

- la stabilité à court, moyen et long terme de la carrière ;
- les conditions de stabilité locales et ponctuelles ;
- l'évolution potentielle de la carrière en fonction de sa sensibilité aux variations de son environnement ou de sa géométrie (scénarii d'accidents prévisibles) ;
- la typologie des confortements à mettre en œuvre.

## 5. Suites du diagnostic

À la lumière des éléments apportés par le diagnostic et en dehors d'un cas de diagnostic « rassurant » n'entraînant pas de mesures particulières, le géotechnicien devra conseiller le maître d'ouvrage sur les trois familles de solutions suivantes :

- réduire les enjeux futurs (aménagement du territoire) ou les enjeux existants (évacuation, réduction de vulnérabilité, etc.) ;
- organiser une surveillance pour pouvoir prendre des mesures adaptées lorsque cela deviendra nécessaire ;
- mettre en œuvre des techniques de prévention par traitement passif (actions sur la structure à protéger) ou actif (action sur la cavité ou son environnement proche).

### 5.1 Mesures de sécurité consécutives à un diagnostic

À la suite d'un diagnostic, le géotechnicien peut être amené à recommander des mesures conservatoires telles que :

- la délimitation d'un périmètre de sécurité ;
- l'interdiction d'accès à la carrière ;
- l'arrêt ou la restriction de la circulation ;
- l'évacuation de la population ;
- la préconisation d'un inventaire des ouvrages susceptibles d'être affectés ;
- la fermeture de réseaux ;
- la préconisation de travaux d'urgence (remblaiement de l'effondrement, déviation des eaux de surface) ;
- etc.

L'objectif de ces mesures est d'assurer la sécurité des personnes et des biens à court terme sur les territoires exposés. La mise en œuvre de ces mesures n'est pas du ressort de l'expert, ces mesures devant être généralement appliquées par les propriétaires des parcelles impactées, éventuellement sous le contrôle de l'autorité publique. Toutefois, l'omission d'une mesure conservatoire par le géotechnicien peut engager sa responsabilité .

### 5.2 Surveillance

Dans le cas où des mesures de sécurité ne pourraient être prises immédiatement, il peut être décidé de surveiller la cavité et d'organiser l'évacuation de la population menacée en cas d'alerte. Celle-ci est déclenchée grâce à une surveillance visuelle et/ou instrumentale .

La surveillance opérationnelle d'une carrière devra être réalisée sur la base d'un cahier des charges qui mentionnera notamment les informations suivantes :

- l'objectif de la surveillance (déclenchement de l'évacuation des populations, surveillance en phase travaux, etc.) ;
- les paramètres mesurés (généralement déplacement) et déterminés en accord avec le maître d'ouvrage (le dispositif doit permettre de détecter les phases d'accélération) ;
- la définition des mesures pratiquées (implantation des capteurs, fréquence, durée, précision, fiabilité, maintenance, etc.) ;
- l'exploitation et la gestion des données (acquisition, traitement, interprétation, diffusion...) ;
- les seuils d'alerte qui sont à déterminer selon la présence d'enjeux et qui doivent s'appuyer sur le contexte géologique régional ;
- les procédures de mise en sécurité (qui fait quoi ?) en cas de dépassement de ces seuils,
- les acteurs concernés (gestionnaires, services de secours, propriétaires exposés, experts) et le circuit de diffusion de l'information.

Des ouvrages spécifiques traitant de cette problématique existent. Nous renvoyons le lecteur à leur consultation. (*Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : surveillance - traitement*. Guide technique INERIS)

### 5.3 Travaux de confortement

Le diagnostic peut aboutir à la recommandation de travaux afin de réduire soit l'aléa soit la vulnérabilité des enjeux potentiellement impactés.

Parmi les techniques de réduction de l'aléa (fig. 85) couramment préconisées, on citera notamment :

- la reprise des voûtes instables par ancrage du ciel ;
- le renforcement du soutènement (cerclage et ou renforcement latéral des piliers existants, édification de piliers supplémentaires) ;
- des solutions de comblement (comblement gravitaire, injection, comblement partiel, etc.).

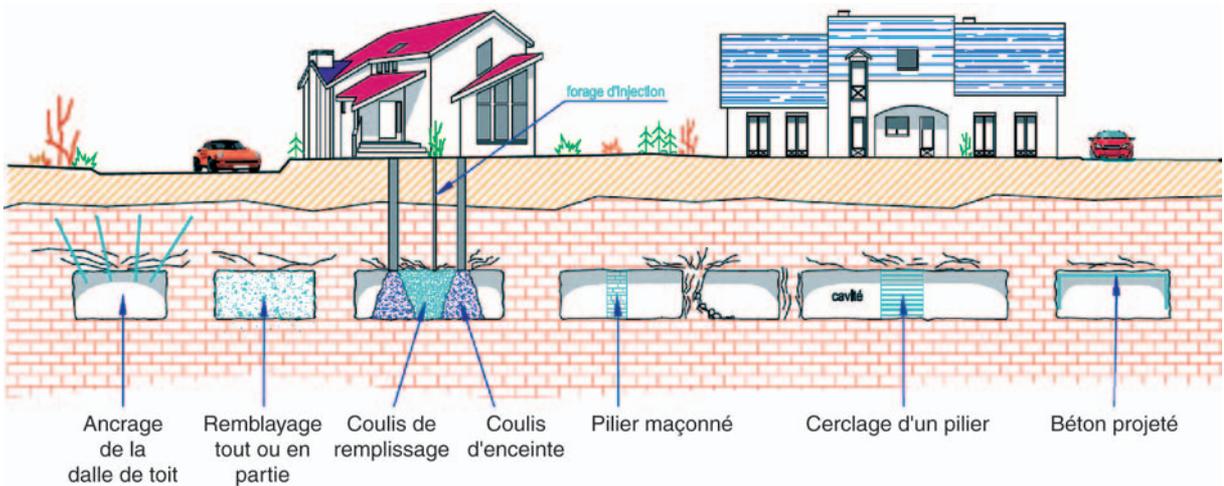


Figure 85  
Schéma récapitulatif des techniques de réduction de l'aléa

Parmi les techniques de réduction de la vulnérabilité (fig. 86), on mentionnera :

- la mise en œuvre d'une nappe géosynthétique de renforcement évitant un effondrement brutal de la surface (technique dite du " parachute ") lorsque la surface n'est pas construite et de préférence sous les voiries ;
- le renforcement de la structure des constructions (réalisation de radier, de fondations profondes, de chaînages...)
- la gestion des eaux de surface (imperméabilisation).

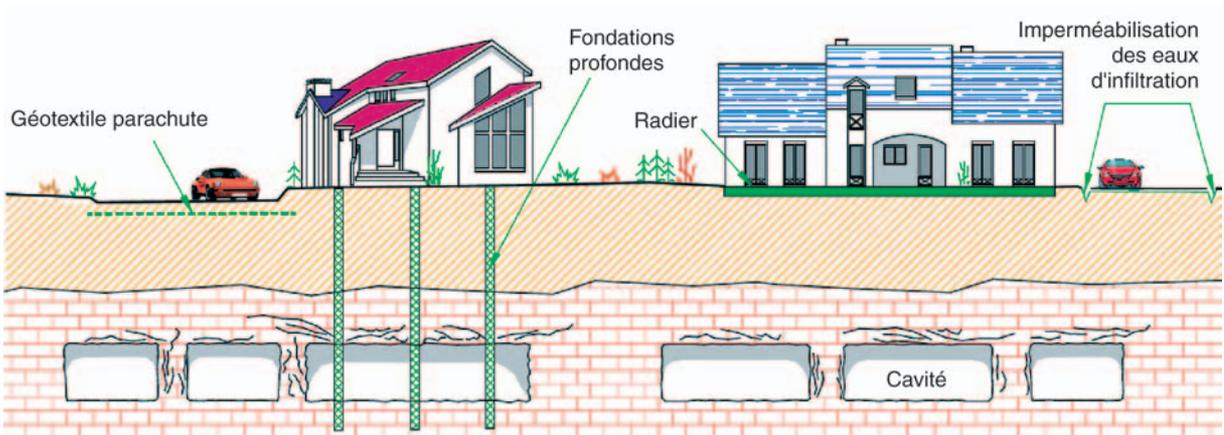


Figure 86  
Schéma récapitulatif des techniques de réduction de la vulnérabilité

La description précise et le dimensionnement de ces techniques ne sont pas l'objet de ce guide et devront dans tous les cas faire l'objet d'une étude spécifique par un bureau d'études compétent. Pour plus de détails, le lecteur consultera d'autres ouvrages spécifiques :

- *Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : Surveillance - traitement*. Guide technique INERIS ;
- *Travaux de consolidations souterraines exécutées par piliers maçonnés dans les carrières de calcaire grossier situées en région parisienne*. Inspection générale des Carrières ;
- *Injection gravitaire, clavage et traitement des fontis, préalables à la mise en œuvre de fondations profondes, de type pieux ou micropieux de type supérieur ou égal à II, en zone sous-minée par d'anciennes carrières souterraines ou à ciel ouvert*. Inspection générale des Carrières.



## Chapitre 4

# Éléments nécessaires au diagnostic

*L'établissement d'un diagnostic de qualité nécessite de rassembler les données existantes et d'en acquérir de nouvelles. Ce chapitre décrit 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.*

*En fin de chapitre est proposé un tableau récapitulatif des moyens à mettre en œuvre en fonction du niveau de diagnostic visé.*

## 1. Exploitation des données existantes

Les données existantes peuvent être recherchées dans divers services, dont au minimum :

### - État :

DREAL : direction régionale de l'écologie, de l'aménagement et du logement

DDTM : direction départementale des territoires et de la mer

### - Organismes publics :

Cerema : centre d'études et d'expertise pour la route, l'environnement, la mobilité et l'aménagement (anciennement CETE)

BRGM : bureau de recherches géologiques et minières

INERIS : institut national de l'environnement industriel et des risques

### - Départements :

service des archives départementales, services techniques des conseils généraux

### - Communes :

archives communales et services techniques de certaines communes

D'autres sources, selon les régions, peuvent procurer des informations intéressantes (associations de spéléologues, bureaux d'études, etc.). Il convient donc, pour chaque étude, d'inventorier localement les sources à consulter.

Les données peuvent prendre différentes formes :

- archives papier issues principalement des recherches aux archives départementales ;
- archives numérisées ou numériques, rapports fournis par des bureaux d'études ou téléchargés sur internet ;
- bases de données accessibles sur internet (BRGM : infoterre...) ou émanant de divers services ;
- témoignages oraux issus d'enquêtes auprès de personnes possédant une connaissance locale (« Anciens », exploitants de carrières, etc.).

### 1.1 Données géologiques et hydrogéologiques

La collecte des données géologiques et hydrogéologiques commence tout d'abord par la localisation de la zone étudiée sur les cartes géologiques et hydrogéologiques disponibles.

L'analyse de ces cartes et de la banque de données du sous-sol ([www.infoterre.fr](http://www.infoterre.fr)), permet d'appréhender à différentes échelles (régionale à locale) des informations qui portent sur la description des facteurs intrinsèques de la carrière comme :

- la succession des couches lithologiques au niveau de la carrière (en distinguant éventuellement les variations de faciès attendues) ;
- la géométrie des couches géologiques (pendage, épaisseur, limites et extension en surface, etc.) ;
- la nature et les grandes orientations des structures tectoniques (plis, failles, discontinuités et micro-structures potentielles, etc.) ;

## Chapitre 4

- les différentes nappes qui pourraient concerner la carrière et leur fonctionnement (battement, sens d'écoulement, etc.).

Ces informations constituent des éléments nécessaires à la réalisation d'un « modèle géologique et hydrogéologique de base ». En fonction du niveau de diagnostic requis, ce modèle sera enrichi par d'autres recherches bibliographiques (rapports, thèses, etc.).

### 1.2 Données historiques

Une recherche historique permet de recueillir des données précieuses sur :

- les modalités d'extraction des matériaux et l'usage ultérieur de la cavité ;
- les modifications de l'environnement susceptibles d'avoir un impact sur la stabilité passée ou future de la carrière.

Cette recherche s'appuie essentiellement sur les différentes sources d'archives (écrites, orales et numériques) et permet de traiter des carrières accessibles ou non. Dans le détail, les informations recueillies peuvent porter sur :

#### L'exploitation

Les plans, le mode d'exploitation, l'existence d'arrêts et de reprises d'exploitation, les volumes exploités permettent d'évaluer l'étendue des vides et les remblaiements en carrière. Ces informations sont particulièrement importantes pour les carrières non-accessibles.

#### Les incidents éventuels

Les effondrements ou chutes de toits survenus en phase d'exploitation renseignent sur les types de désordres à attendre. Les accidents particuliers (par exemple, explosion pendant la guerre) informent sur d'éventuelles précautions pour l'intervention sur site ou permettent d'identifier des facteurs aggravants.

#### Les modifications du terrain

- Les éventuels désordres en surface après l'exploitation ;
- Les travaux de consolidation effectués en cours ou après l'exploitation ;
- La réalisation de remblai ou déblai à l'aplomb de la carrière ;
- La mise en place de réseaux en surface.

DÉPARTEMENT de l'Orne		SURVEILLANCE DES CARRIÈRES	
ARRONDISSEMENT de Pont-Audemer		PROCÈS-VERBAL DE VISITE	
CANTON de Bourgthéroulde		21 mars 1901	
COMMUNE d'Épreville-en-Roumois		Date des visites	
LIEU DIT St. Eglise		Situation de la carrière : Dans un terrain clos	
		Substance exploitée : Sable	
Mode d'exploitation : Puits et galeries			
Nombre moyen d'ouvriers employés : au fond : 3 à la surface : 2			
Propriétaire : M. Elie à Épreville-en-Roumois			
Locataire ou fermier :			
Exploitant : M. Elie			
Date de l'ouverture : 1893			
Date de la déclaration : 4 février 1894			
Abord : Le puits est percé par une large			
Distance : 12 mètres d'un chemin rural			
Front de taille. — Hauteur : Largeur :			
Diamètre : 1.30 Profondeur : 20 mètres			
Puits : Couches traversées : 11 mètres dans la terre et 10 mètres dans la roche			
Revêtement : Soudonné dans la traversée des terres			
Bat : très bon			
Nombre d'étages : 2 Profondeur de chacun d'eux : 10 et 10 mètres			
Largeur : 2 à 3 mètres			
Chambres : Hauteur : 3 mètres			
Toit : système conique			
Dimensions des piliers : 4.5 et 6 mètres			
OBSERVATIONS : L'étage supérieur se joint au précédent par un massif de 5 mètres d'épaisseur d'une faible étendue. Il a pu être constaté que les travaux de l'étage inférieur sont dans de bonnes conditions (craquis au verso).			
Écrit le 19 avril 1901			
Le Contrôleur des Mines			

Figure 87  
Exemple de PV dressé par le Service des Mines suite à la visite en 1908 d'une marnière souterraine dans la commune d'Épreville-en-Roumois

L'une des principales sources de données historiques est constituée par les archives anciennes, conservées aux archives départementales et communales. Le tableau 2 présente les séries à consulter, *a minima*, au service des archives départementales.

La numérotation des séries et des sous-séries peut être différente selon les régions. Il est donc nécessaire avant toute recherche de consulter les répertoires de classement des séries archivées.

Un exemple de document retrouvé dans la série S des archives départementales de Seine-Maritime est donné figure 87.

Tableau 2  
Exemples de séries à consulter au service des archives départementales

Série	Contenus
Dépôt archives communales	Informations diverses pouvant porter sur des travaux (réparation suite à des effondrements, entretien des routes), des ouvertures de carrières, des accidents, etc.
<b>M</b> Administration générale et économie	installations dangereuses ou provoquant des nuisances dont les carrières
<b>O</b> Administration et comptabilité communales	Voiries communales, urbaines, vicinales Extraction de matériaux pour la construction et l'entretien des routes
<b>S</b> Travaux publics, transports	Archives Ponts et Chaussées - Routes départementales et nationales - Extraction de matériaux pour la construction et l'entretien des routes  Archives Chemins de Fer - Extractions de matériaux pour construction et entretien des voies ferrées  Archives Service des Mines pouvant contenir selon les régions - Réglementation et affaires générales concernant les carrières - États mines et carrières, états des exploitations souterraines à dispenser de délégués mineurs - Rapports de surveillance - Registres d'enregistrement des déclarations d'ouverture de carrières - Surveillance des carrières : déclarations, rapports, contraventions, plaintes, accidents, désordres, etc.
<b>W</b> Archives administration	Archives récentes des administrations, très diverses (archives DRIRE, DDE, SDIS, etc.)
<b>Z</b> Archives préfetures	Archives diverses pouvant contenir des documents concernant les carrières, les extractions et des accidents
<b>P</b> Finances, cadastre et Poste	Plans cadastraux anciens (napoléoniens) et plus récents, matrices cadastrales

Ce procès verbal donne des informations précises sur :

- la géométrie d'ensemble de la carrière et sa profondeur ;
- la largeur des chambres et des galeries ;
- les dimensions des piliers ;
- la nature et l'épaisseur des terrains de recouvrement au niveau du puits ;
- l'état de la carrière au moment de la visite.

Il comporte également des informations moins précises sur la localisation spatiale de cette carrière (distance à une route et nom du propriétaire, ce qui peut permettre d'affiner la recherche par l'étude des matrices cadastrales de l'époque).

### 1.3 Données issues des supports cartographiques

Les sources d'incertitude liées à ces supports sont nombreuses ; en conséquence, il convient d'être prudent sur l'exploitation des données détaillées ci-dessous.

#### • Cartes topographiques

En fonction du niveau de diagnostic, il est conseillé d'associer la collecte des informations géologiques à celle de données morphologiques (fig. 88) déduites de l'examen des cartes (topographiques, géomorphologiques, etc.) afin d'appréhender la situation de la carrière (fond de vallée, plateau, versant).

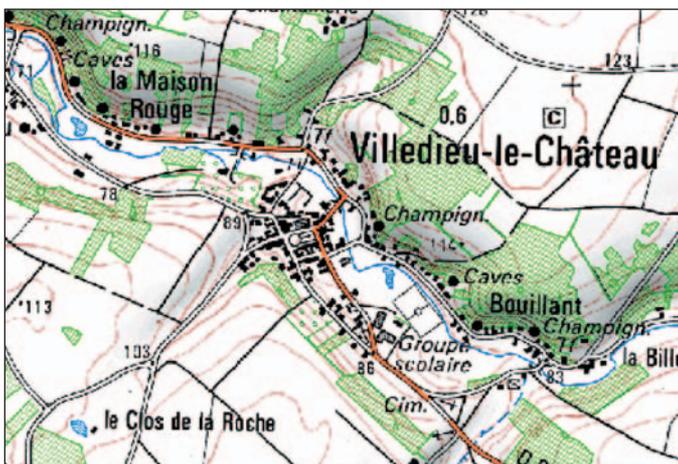
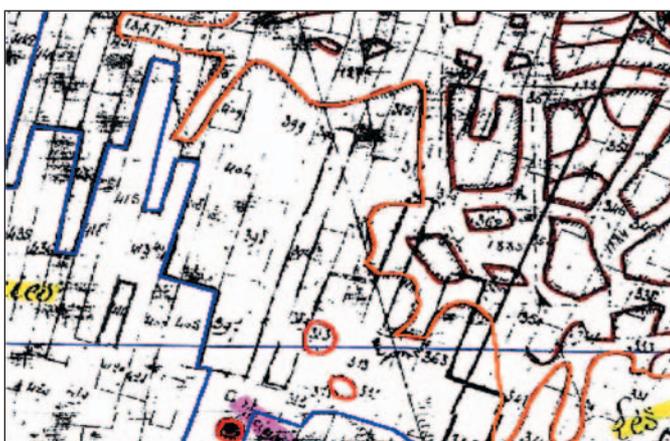


Figure 88  
Extrait de la carte IGN au 1:25000  
indiquant la position des entrées  
de carrière à flanc de coteau  
© IGN

La toponymie peut également être un outil utile pour mettre en évidence la présence de carrières souterraines et renseigner sur leur typologie ainsi que sur d'anciens désordres. On citera notamment le terme « perrière » signifiant carrière dans de nombreuses régions, ou l'ensemble des termes relatifs au traitement de la chaux (le four à chaux, la chaulerie, etc.) indiquant l'existence de zones d'extraction qui, régionalement, peuvent être souterraines. De nombreuses informations peuvent être déduites de la lecture de l'ouvrage d'André Pégrier, géographe à l'IGN (*Les noms de lieux en France - Glossaires de termes dialectaux*. A. Pegrier et al. - Commission de toponymie 2006).

#### • Plans cadastraux

La connaissance des emprises foncières peut être un outil précieux au moment du diagnostic. Dans le cadre de la demande d'autorisation d'exploitation, les carriers doivent (depuis le début du 19<sup>e</sup> siècle) préciser le parcellaire objet de la demande. S'il n'y a aucune certitude que les carrières se soient étendues sur la totalité des parcelles où des droits ont été acquis, cette information reste utile (fig. 89).



En orange : contour des carrières  
En rouge : effondrements observés  
sur le terrain  
En bleu : contour du plan cadastral  
acquis suivant les registres de la DRIEE  
(Direction régionale interdépartementale  
de l'Environnement et de l'Énergie  
- ancien service des mines)

Figure 89  
Délimitation des zones d'expansion potentielles de carrière en s'appuyant sur les limites cadastrales (cadastre napoléonien) où les droits ont été acquis

Les plans cadastraux, anciens et modernes, constituent également dans certaines régions une source d'information sur la présence, la localisation, l'extension et la typologie de carrières souterraines.

### • Modèles numériques de terrain

S'ils existent, les modèles numériques de terrain pourront être employés, sous réserve que leur précision soit compatible avec les niveaux de diagnostic réalisés.

Ainsi, le modèle standard constitué par la BD Topo Pays de l'IGN est insuffisant pour un diagnostic de niveau 4.

## 1.4 Données issues de la photo-interprétation

La recherche historique peut être utilement complétée par une étude de photo-interprétation, en particulier pour les carrières aujourd'hui inaccessibles. Cette étude permet, d'une part, de rechercher des indices liés à l'existence de carrières souterraines et, d'autre part, d'étudier l'environnement de ces carrières.

Il est recommandé de réaliser une étude stéréoscopique et multi-dates de photographies aériennes verticales (missions IGN, IFN, etc.), choisies en fonction de leur échelle et de leur émulsion. La photo-interprétation peut ainsi permettre de repérer différents types d'indices liés à la présence de carrières souterraines ou permettant d'appréhender leur contexte :

- des désordres de surface : effondrements, dépressions topographiques, désordres remblayés, etc. (fig. 90 a et b - Seine-Maritime) ;
- des traces d'anciennes exploitations : entrées en cavage, puits d'accès ou d'aération, etc. ;
- des indices hydrologiques (écoulement des eaux de surface, zones d'infiltration, etc.) ;
- des indices géologiques (lithologiques, structuraux) et géomorphologiques, donnant des informations sur l'environnement de la carrière (présence de failles, épaisseur de recouvrement, etc.).

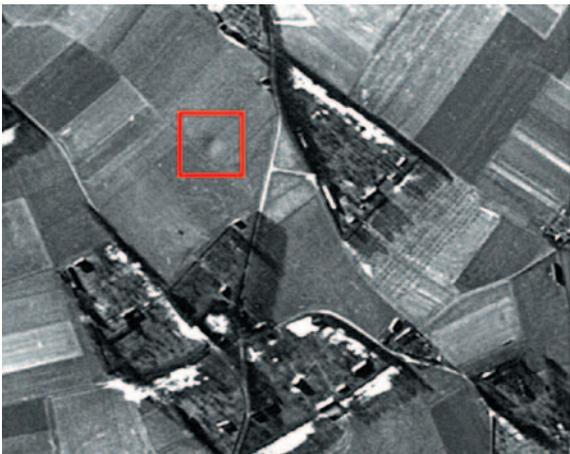


Figure 90a

Affaissement caractérisé par une dépression  
*Mission IGN 1:25 000 - 1963 - Panchromatique NB*

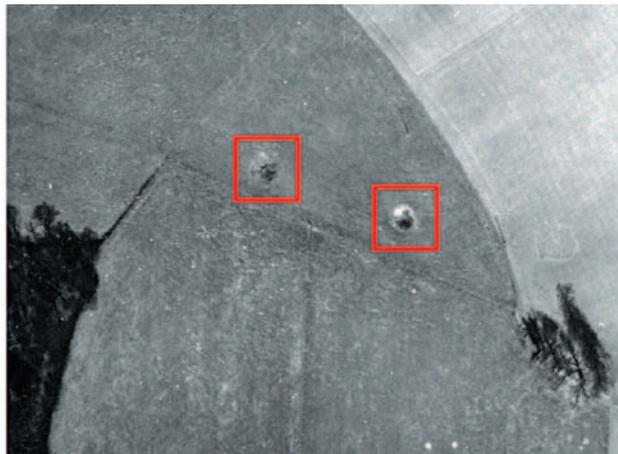


Figure 90b

Effondrements, caractérisés par des trous à l'emporte-pièce  
*Mission IGN 1:8000 - Années 70 - Panchromatique NB*

La photo-interprétation nécessite une validation sur le terrain des anomalies repérées car celles-ci peuvent avoir une origine autre que la présence d'une carrière souterraine à leur aplomb. Par exemple, une mare asséchée peut donner la même réponse qu'un ancien effondrement remblayé. Pour valider un indice, des informations complémentaires devront donc être recherchées sur le terrain et en enquêtant auprès de personnes « sachantes » (riverains, « anciens », etc.).

Dans certains cas, la photo-interprétation n'apportera que peu voire pas d'informations, notamment dans les zones boisées, les zones agricoles à végétation haute, les zones urbanisées. Pour plus de détails concernant l'apport de la photo-interprétation pour la caractérisation des cavités souterraines et plus généralement pour l'étude des risques naturels, on se référera utilement au guide technique édité par le LCPC en 1999 : *l'utilisation de la photo-interprétation dans l'établissement des plans de prévention des risques liés aux mouvements de terrain*. Potherat P., Doridot M., Chahine M.

### 1.5 Données géomécaniques

En fonction des études antérieures réalisées, on peut trouver et utiliser des résultats d'essais mécaniques (résistance à la compression  $R_c$  en particulier), sous réserve d'un contexte analogue (géologie, géométrie et environnement identiques) et après analyse critique des données.

Les sources à consulter sont les bases documentaires des Universités, les publications scientifiques, les rapports d'études d'organismes spécialisés, etc.

### 1.6 Données sur l'environnement de la carrière

Des données utiles portant sur la présence de réseaux, d'aménagements de surface, de végétation, et autres, seront collectées grâce à une recherche bibliographique complétée par une enquête orale.

## 2. Reconnaissances et investigations de terrain

Les reconnaissances détaillées dans ce paragraphe concernent les paramètres intrinsèques des carrières et les facteurs externes dont la connaissance est nécessaire pour réaliser un diagnostic de stabilité. Les reconnaissances sont menées selon les indications données dans le chapitre 3.

Quand la carrière est accessible, il est relativement aisé d'obtenir ces éléments. Toutefois, l'intervention en carrière souterraine est considérée comme « travaux dangereux » dans l'article R 4512-7 du code du travail.

À ce titre, le personnel intervenant doit être formé aux risques encourus liés à l'instabilité des vides souterrains, équipé de protections collectives (détecteur de gaz, sangles...) et individuelles (casque, baudrier, cordes, gants...) et disposer d'un suivi médical adapté. Du reste, pour chaque intervention :

- les risques encourus par le personnel doivent être évalués (difficultés d'accès ou de cheminement dans la carrière, composition de l'air ambiant, présence de radon, etc.) ;
- un plan de prévention doit être élaboré pour identifier les risques et prévoir des procédures en cas d'accident (appel des secours) ;
- les équipements de protection individuels et collectifs doivent être régulièrement contrôlés selon leur utilisation.

### 2.1 Environnement de surface de la carrière

Une connaissance détaillée de l'environnement de la carrière permet de mieux juger les facteurs qui aggravent les conditions de stabilité du site.

À ce stade, il convient donc de vérifier et compléter les informations collectées préalablement. On devra, par exemple :

- s'assurer de la conformité des données topographiques du site avec la réalité (levé topographique, etc.) ;
- faire vérifier le bon fonctionnement des réseaux d'eaux (EP, AEP, EU) et principalement l'étanchéité ;
- prendre en compte les aménagements de surface récents (imperméabilisation, drainage, infiltration, remblais, déblais, etc.) ;
- noter la présence de végétation lorsque la carrière est peu profonde (végétation hydrophile, arbres à système racinaire pivotant, etc.) en précisant l'essence et la taille ;
- considérer la proximité d'une voirie et les vibrations induites par la circulation des poids lourds ;
- etc.

Pour ce faire, une visite détaillée du site s'impose pour les niveaux de diagnostic d'urgence et de niveau 1. En cas de besoin, des études spécifiques (levés topographiques, diagnostics de réseaux, étude hydraulique, etc.) devront être réalisées pour les diagnostics de niveaux 2 et 3.

### 2.2 Géologie et hydrogéologie du site

Pour un diagnostic d'urgence, une identification visuelle sommaire de la lithologie permettra de confirmer les informations recueillies au préalable (données existantes) et de concevoir un modèle géologique de base.

Pour les diagnostics de niveaux plus élevés, on cherchera à affiner la connaissance du site par une description fine :

- des terrains de *recouvrement* et de leurs variations de faciès ;
- du massif exploité ;
- du *mur* et des terrains sous-jacents.

Si le modèle hydrogéologique de base indique que la nappe aura une incidence sur la tenue de la carrière, il conviendra d'appréhender son battement, son sens et son gradient d'écoulement.

Ces descriptions s'appuient sur la réalisation et l'interprétation de levés géologiques (entrée en cavage, au front de masse, piliers), et/ou de sondages (examen de carottes, diagraphies, etc.), et/ou d'un suivi piézométrique.

Le levé géologique devra s'attacher à repérer les particularités géologiques et hydrogéologiques (variations de faciès, venues d'eau, zones karstiques, réseau de failles, etc.) de la carrière.

Le résultat de ces investigations doit permettre d'affiner le modèle géologique et hydrogéologique. Ce modèle décrira notamment :

- la configuration lithologique (en particulier description du gisement, des terrains de *recouvrement*, du *mur*, des *piliers*) ;
- la configuration structurale (pendage, fracturation) ;
- la configuration hydrogéologique.

Pour les cavités inaccessibles, le levé géologique est impossible ; de ce fait, les informations géologiques ne pourront être acquises que par la réalisation de sondages.

### 2.3 Géométrie de l'exploitation

La géométrie de la carrière doit être étudiée à l'échelle globale et au niveau de ses éléments constitutifs (piliers, mur, remblais, galeries, etc.). La précision des relevés géométriques de la carrière est à adapter au niveau de diagnostic recherché.

On définira deux niveaux de précision de relevé d'une carrière :

- la géométrie globale ;
- le plan de détail.

#### • Géométrie globale

La géométrie globale d'une carrière consiste en une cartographie de ses contours, de ses éléments constitutifs et des éventuels confortements. Elle comprend également le relevé des hauteurs de vide. Elle peut être issue d'un plan d'archive ou d'un levé simple de précision métrique (infra-métrique pour la hauteur). Un rendu à 1/500 semble être l'échelle la plus petite envisageable et adaptée au niveau de précision recherché (fig. 91).

Elle permet d'évaluer :

- les dimensions horizontales (longueur et largeur des galeries caractéristiques) ;
- la profondeur (les cotes du terrain naturel, du toit, du mur). En particulier, pour les carrières de faible profondeur, l'épaisseur du recouvrement sera mesurée ou déduite de ces informations ;
- l'épaisseur approchée des remblais en galerie s'ils existent ;
- le calage par rapport à la surface.

L'établissement d'une géométrie globale peut être suffisante pour un diagnostic de niveau 1 (fig. 91). Ce plan pourra être utilement complété par une coupe verticale schématisée, permettant de visualiser l'ensemble de la zone sous-minée, sa profondeur, la topographie de la surface, etc.

Dans le cas des carrières inaccessibles, l'acquisition d'une géométrie globale nécessite la réalisation de sondages, complétés par des auscultations vidéo et télémétriques.

Les informations tirées essentiellement de l'observation par caméra vidéo seront incomplètes mais pourront se rapporter à la forme des galeries et des piliers, et à l'état général de la carrière (chutes de toit, piliers ruinés, effondrements, etc.). Un opérateur expérimenté est en mesure d'évaluer approximativement la géométrie des galeries et le volume des vides.



Figure 91  
Géométrie globale relevée avec  
des moyens simples  
(laser mètre et trépied)

Les mesures télémétriques en sondage peuvent permettre d'atteindre une précision centimétrique (fig 92) pour des visées ponctuelles. À l'échelle d'une carrière, ce mode d'acquisition ne permet cependant d'obtenir qu'une géométrie globale (précision métrique).

Dans les carrières ennoyées, la mise en œuvre de techniques spécifiques (type Sonar), bien que peu répandue, peut permettre d'obtenir des informations sur la géométrie de celles-ci.



Figure 92  
Vue panoramique à 180° destinée à la reconnaissance de la carrière de deuxième masse de gypse  
du parc des Lilas à Vitry-sur-Seine (Val-de-Marne)

### • Plan de détail

Le plan de détail d'une carrière est une cartographie des objets décrits dans la géométrie globale à une précision décimétrique (en plan et hauteur) et nivelée. On s'appliquera à faire correspondre l'occupation de surface et les observations en carrière. L'atteinte de ces objectifs de précision implique de réaliser davantage de mesures que pour la géométrie globale (y compris les mesures de hauteur sous-voûte).

Le plan de détail devra permettre d'appréhender la complexité de la géométrie en complétant la vue en plan par des coupes localisées (variation de section des piliers, positionnement d'une cloche de fontis, forme des remblais...). Si la carrière possède plusieurs niveaux, des plans propres à chaque niveau seront réalisés : ils permettront de visualiser la superposition des piliers.

Ces plans seront obtenus avec des moyens adaptés et du personnel qualifié.

Pour un diagnostic de niveau 2 ou 3, un plan de détail de la carrière (fig. 93) est indispensable. Un rendu au 1/200 correspond à ce niveau de précision.

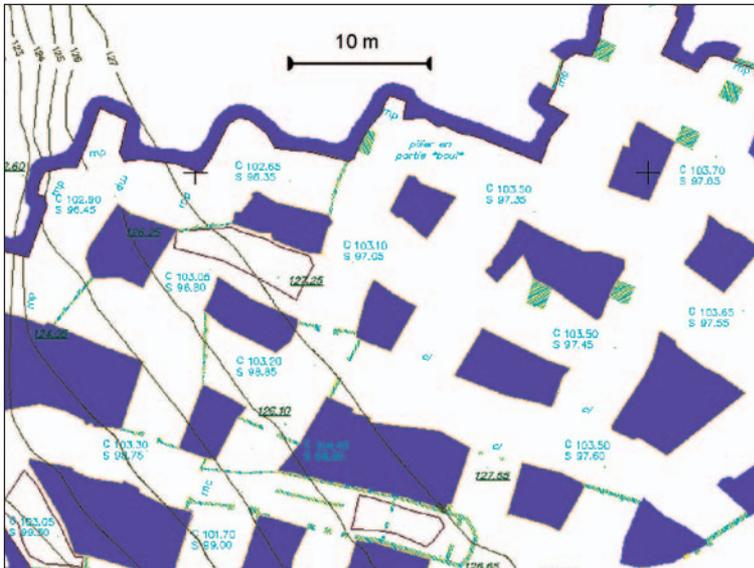


Figure 93  
Extrait d'un plan de détail d'une carrière de gypse exploitée dans la première masse du ludien sur le territoire du Val-d'Oise. Les éléments verts représentent des travaux de confortement (piliers)

## 2.4 Relevé des désordres

Quand la carrière est accessible, il est généralement aisé d'effectuer un examen détaillé des désordres et de les cartographier. Dans certains cas, des moyens particuliers devront être mis en œuvre pour examiner en détail toutes les parties de la carrière (échelle, nacelle, cordes, etc.)

### • Description succincte des désordres (diagnostic d'urgence)

Lors d'un diagnostic d'urgence, une description succincte des principaux désordres en carrière et en surface doit suffire à l'élaboration du diagnostic. À ce stade, un relevé exhaustif des désordres n'est pas nécessaire.

Cette description devra s'appuyer sur des photographies et/ou des schémas.

### • Description détaillée des désordres (autres niveaux de diagnostic)

Pour les diagnostics de niveaux plus élevés, le relevé exhaustif et détaillé des désordres est en revanche obligatoire.

La cartographie des désordres doit être explicite et précise pour ce qui concerne leur localisation et leur extension. De plus, la description du degré d'avancement du désordre, en surface comme en carrière, doit s'appuyer sur une typologie précise pour éviter toute ambiguïté (on se reportera utilement aux termes employés dans le chapitre 2 et rappelés dans le lexique tels que : décollement de banc, cloche de fontis, fontis, etc.). Par ailleurs, il est utile de porter sur la carte la date d'apparition ou d'évolution des désordres, information qui peut orienter le diagnostic ou en renforcer les conclusions.

### **Relevé en carrière**

Le relevé systématique des désordres en carrière (fig. 94 et 95) est indispensable à un diagnostic de niveau 1 ; il est une source précieuse d'information pour les diagnostics de niveau 2 et 3.

Ce relevé des désordres peut être réalisé en même temps que le relevé géologique (cf. § 2.2). L'attention du géotechnicien portera sur tous les désordres significatifs tels que décrits au chapitre 2 et notamment :

- l'état du *toit* : la présence de fractures ou fissures sera vérifiée par un relevé visuel précis, l'existence d'un *décollement de banc* du *ciel* pourra être vérifiée par auscultation sonique au centre de la portée ;
- le *mur* : la topographie de celui-ci sera étudiée afin de détecter un *soufflage* éventuel ou un poinçonnement par un pilier ;
- les *piliers* et le *front de masse* : le diagnostic pourra inclure une description précise des faces et un *sonnage* au marteau. La numérotation des piliers permet un bon repérage des relevés ;
- les éventuelles dégradations des dispositifs de renforcement (piliers maçonnés, *bourrages*, murs...).

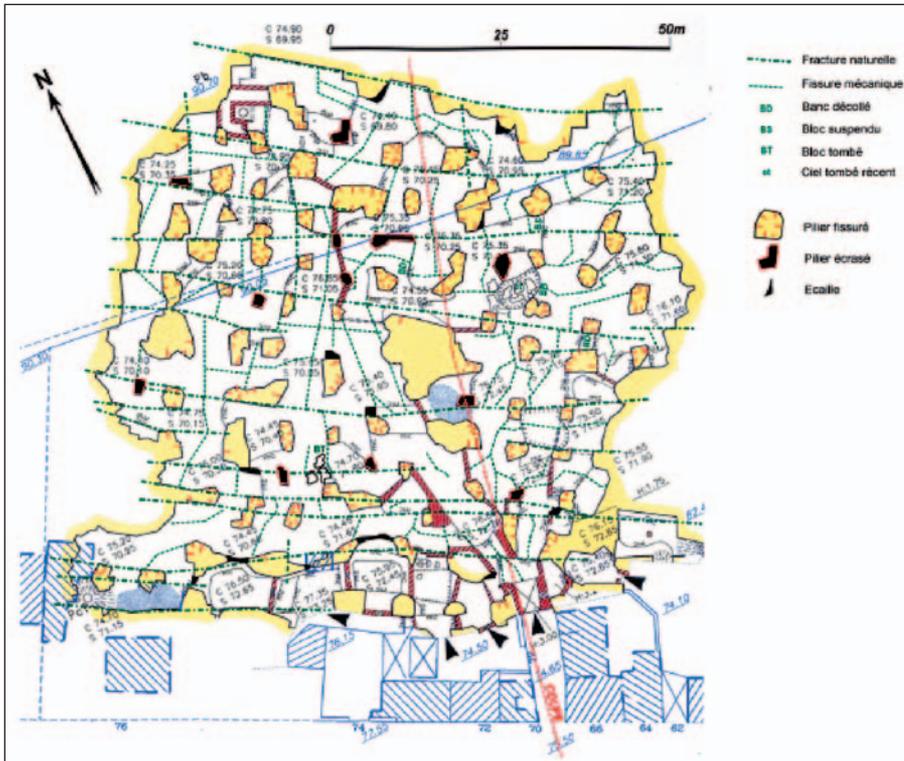


Figure 94  
Relevé de désordres dans une carrière de calcaire grossier de la région parisienne

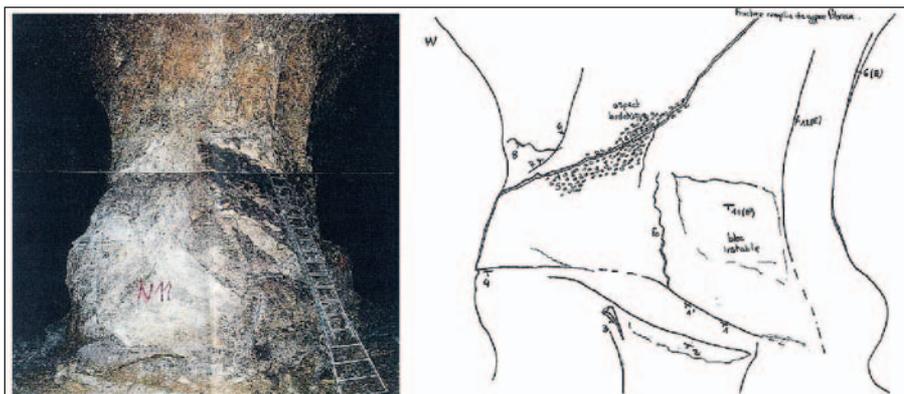


Figure 95  
Relevé de désordres réalisé à l'échelle d'un pilier dans la carrière de gypse de Roquevaire (Bouches-du Rhône)

L'observation des désordres sera complétée par les informations obtenues par la recherche bibliographique : mécanismes, vitesse d'évolution, fréquence des événements, etc. Si possible, ces données seront également reportées sur le plan (en utilisant une sémiologie permettant de distinguer les éléments « bibliographiques » des observations de terrain).

Le relevé des désordres en carrière est également possible via une caméra en sondage mais il est alors plus difficile à réaliser et ne saurait être exhaustif. Celui-ci pourra toutefois être considéré comme une description succincte des désordres.

### Relevé en surface

Le relevé portera sur toute anomalie topographique de structure, d'infrastructure et du terrain naturel (fissuration, tassement, inclinaison anormale d'un bâtiment, rupture de pente, crevasse, cuvette d'affaissement, effondrement ponctuel ou généralisé).

À ce stade, il convient de souligner l'apport (amont) que peut fournir l'observation des photographies aériennes afin de localiser les effondrements antérieurs mais également de suivre aux cours des années le rythme d'apparition de ces désordres (photographies multi-dates) et l'occupation des sols.

Une fois observés, l'interprétation des désordres sur une structure fait appel à des qualifications spécifiques et peut nécessiter l'intervention d'un spécialiste en structure ou bâtiment afin d'en confirmer l'origine.

Le relevé des désordres en surface doit être mis en relation avec :

- l'emprise de la carrière et sa géométrie (principalement l'épaisseur de recouvrement) ;
- les désordres relevés en carrière.

Si les désordres observables en surface sont reliés de façon certaine à la présence d'une carrière souterraine, ils sont la traduction d'une dégradation avancée de celle-ci. Néanmoins l'existence de désordres en surface ne témoigne pas systématiquement de la ruine d'une carrière sous-jacente, elle peut avoir d'autres causes (déficience d'un réseau enterré, cavité naturelle, déblai, etc.).

### 2.5 Données géomécaniques

Le problème de la représentativité des essais de laboratoire en mécanique des roches a fait l'objet de nombreuses études. Afin de prendre en compte la variabilité des propriétés mécaniques, il importe de définir :

- les conditions de prélèvement et d'échantillonnage : il s'agit de l'emplacement, du mode de prélèvement (sondages carottés au toit et au mur, prélèvements de blocs dans les piliers, etc.), de leur répartition (sur l'ensemble des horizons géologiques et l'extension du site) et de la définition du nombre d'essais à réaliser (élément déterminant du coût d'un diagnostic de stabilité) ;
- le choix de la valeur représentative de la résistance du matériau : les résultats obtenus sur éprouvette de laboratoire ne correspondent pas exactement aux propriétés du matériau en place. Les essais de laboratoire sont quasi-instantanés et ne peuvent prendre en compte l'influence du fluage, ce qui impliquerait des essais longs et délicats. D'autre part, il est difficile de quantifier les effets d'échelle et d'élançement qui différencient les propriétés d'une éprouvette de celles du massif. Enfin, la variabilité des résultats complique encore la tâche. Ainsi si l'on a la possibilité de faire un grand nombre d'essais, le tracé d'histogrammes facilite le choix d'une valeur représentative selon l'Eurocode.

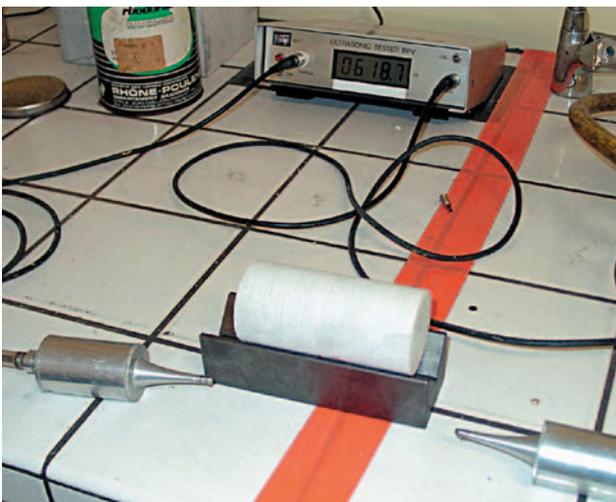
#### • Essais de laboratoire

Les essais évoqués ci-après sont pour la plupart codifiés par des normes françaises ou européennes qu'il convient d'appliquer strictement pour une interprétation optimale. Compte tenu de leur coût, ces essais sont utilisés pour l'élaboration des diagnostics de niveau 3.

#### *Pétrophysiques*

La base de toute étude géomécanique est une bonne identification du matériau : la réalisation d'essais simples et rapides permet, entre autres, d'évaluer l'homogénéité du site.

Outre l'étude pétrographique, les mesures de la porosité, de la masse volumique, du degré de saturation (NF P94-410-1, -2 et -3) et de la vitesse du son sur éprouvette (NF P94-411) (fig. 96) sont les mesures élémentaires qu'il convient de mettre en oeuvre.



On pourra recourir selon les cas à des essais plus complexes mettant notamment en évidence les phénomènes de fluage (NF P94-423).

Figure 96  
Mesure de la vitesse du son  
sur une éprouvette rocheuse

**Mécaniques**

Les essais mécaniques indispensables sont les essais de résistance :

- en compression uniaxiale (NF P 94-420) pour évaluer la résistance des piliers (fig. 97) ;
- en traction indirecte ou fendage (fig. 98) notamment pour ce qui concerne la résistance du toit (NF P 94-422).

Enfin, un essai de résistance à la flexion sous charge centrée peut également être intéressant (norme EN 12 372).

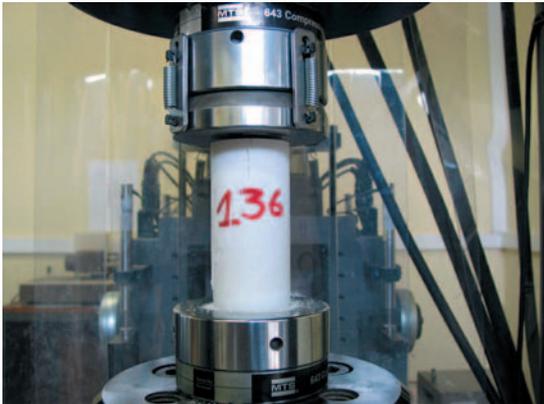


Figure 97  
Essai en compression simple

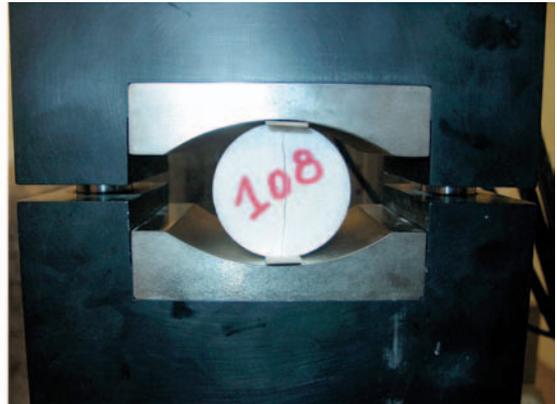


Figure 98  
Essai en traction indirecte

L'influence de la teneur en eau ne doit pas être négligée, en particulier pour les roches poreuses (fig. 99), et il est donc nécessaire de réaliser les essais à la teneur en eau de la roche en place (le plus souvent voisine de la saturation).

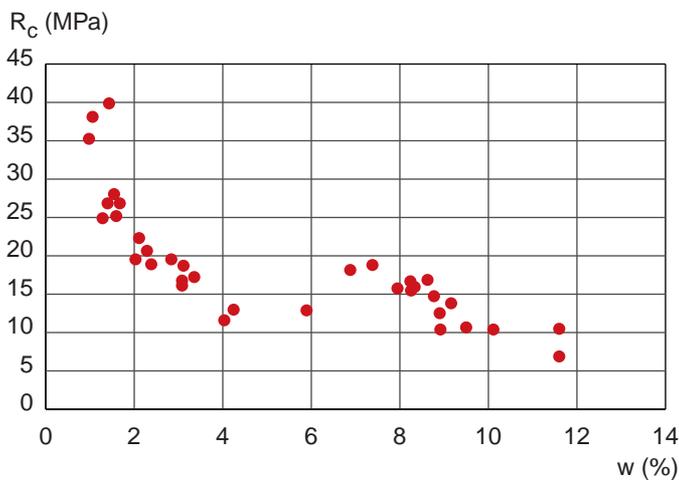


Figure 99  
Influence de la teneur en eau sur la résistance en compression uniaxiale (craie du tunnel sous la Manche)

Pour prendre en compte le vieillissement et le fluage de la roche, on peut admettre en première approximation que les caractéristiques à long terme, aussi bien de résistance en compression que de module d'Young, sont divisées par un coefficient de correction de 2 pour la craie et par de 3 pour le gypse, par rapport aux essais normalisés ; cette réduction est moins importante pour des calcaires compacts (facteur de 1,2 à 1,5).

Concernant les effets d'échelle et de forme, le calage sur l'expérience régionale est recommandé. L'augmentation de l'élanement induit typiquement une baisse de résistance et une accentuation du comportement fragile (fig. 100). La présence de discontinuités (à orientation verticale et surtout oblique) dans un pilier contribue évidemment à la réduction des valeurs des caractéristiques mécaniques.

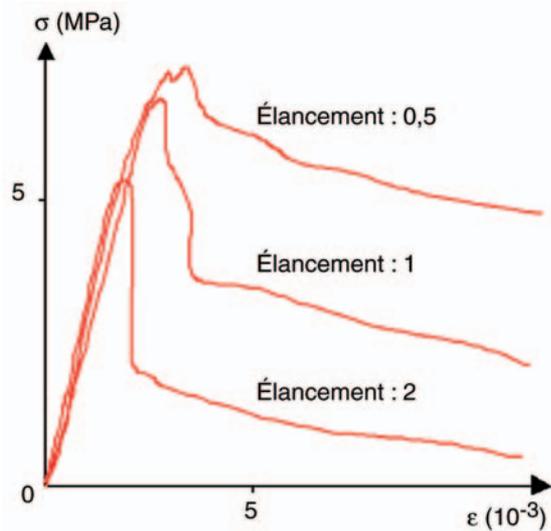


Figure 100  
Compression uniaxiale : effet de l'élanement sur la courbe effort-déformation d'éprouvettes d'un calcaire poreux (diamètre constant, hauteur variable)

Enfin, des essais de déformabilité (module d'Young et coefficient de Poisson) et des essais triaxiaux peuvent permettre de compléter la caractérisation mécanique du matériau.

• **Essais in-situ**

**Géophysique**

Ces méthodes sont réservées au diagnostic de niveau 3 et leur définition doit faire l'objet d'une réflexion poussée (notamment en terme de gain par rapport aux informations déjà disponibles ).

Les trois méthodes suivantes peuvent être utilisées :

- le radar géologique pour l'auscultation des parois ou des piliers afin notamment de préciser la densité de fracturation et la localisation de fractures au sein du massif ;
- la tomographie sismique d'un pilier pour caractériser son état global de fracturation et mettre en évidence d'éventuelles zones de fragilité ;
- les méthodes sismiques de surface pour caractériser la qualité du recouvrement d'une carrière.

**Mesures de contraintes**

En préambule, il convient de rappeler (recommandations AFTES ) que les méthodes disponibles de mesure des contraintes sont difficiles à mettre en œuvre, d'un prix de revient élevé, délicates à interpréter et à extrapoler. En conséquence, l'utilisation de ces mesures relève du niveau 3. Néanmoins, il s'agit du seul moyen de mesure des contraintes réelles dans le massif rocheux.

Il est vivement recommandé de multiplier les essais, compte tenu des variations locales souvent très brusques du tenseur des contraintes, liées à la présence d'hétérogénéités lithologiques, de discontinuités, de zones fracturées.

- Les méthodes de mesures en forage (dilatomètre, libération des contraintes, tests hydrauliques de fractures) sont plutôt adaptées aux études de reconnaissances géotechniques ;

- La méthode du vérin plat (fig. 101) applicable dans les roches peu fracturées, est un essai fréquemment usité, mais qui nécessite une bonne connaissance du massif et la réalisation de plusieurs mesures. Un vérin plat est introduit dans une saignée plane de forme circulaire, puis monté en pression jusqu'à retrouver l'équilibre initial. La contrainte normale au vérin est déduite de cette pression ;

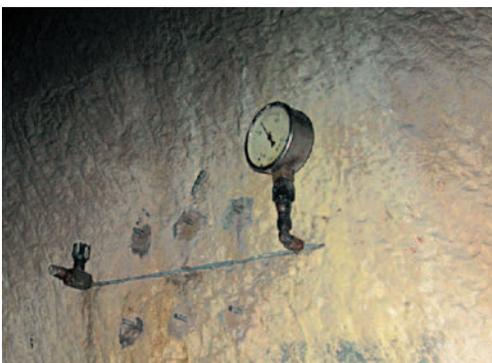


Figure 101  
Dispositif de mesure de contrainte au vérin plat  
Carrière de la Maladrerie à Caen (Calvados)

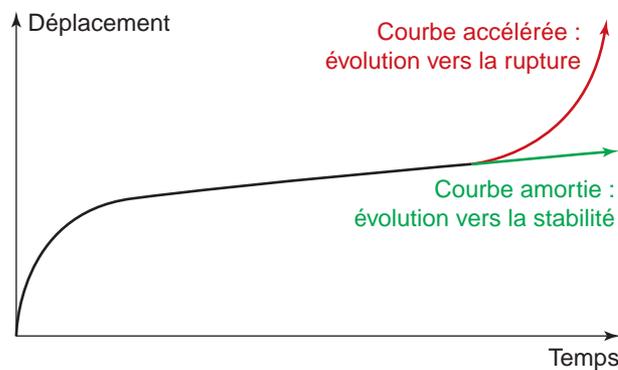
- La méthode basée sur la libération des contraintes consiste à faire une découpe dans la paroi (saignée, carottage, surcarottage, etc.), isolant ainsi un échantillon de roche du champ de contrainte environnant. L'effet du relâchement de contrainte est mesuré par des cellules, ce qui permet d'évaluer le tenseur des contraintes connaissant la déformabilité de la roche (essai de laboratoire).

### 3. Données acquises sur le long terme (suivi de l'évolution)

Dans certains cas, il peut être décidé de « mettre en observation » la carrière souterraine afin de détecter une éventuelle évolution des déformations et des désordres l'affectant. Cette observation peut se faire par des moyens allant d'une inspection réalisée à intervalles réguliers jusqu'à des dispositifs de télé-mesure en temps réel.

Le suivi de l'évolution doit permettre de suivre l'évolution dans le temps des phénomènes singuliers repérés dans la carrière (report chronologique des dégâts dans le temps).

Le suivi de l'évolution d'un site est usuellement mis en œuvre pour les diagnostics de niveau 2 et 3 lorsqu'il existe des incertitudes sur la cinétique d'évolution à terme de la stabilité (stabilisation ou rupture). Elle permet de conforter l'analyse géotechnique tout en permettant de détecter l'approche d'une éventuelle rupture par la divergence du comportement d'un « point » instrumenté (fig. 102).



#### 3.1 Visites régulières

La réalisation de visites à intervalles réguliers par un géologue qualifié peut permettre le suivi d'une évolution lente. Elle est évidemment impossible si l'état de la carrière est trop dégradé.

Une méthode rigoureuse doit être adoptée :

- réaliser un constat initial précis (ou point zéro), reprenant l'ensemble des observations constatées à une date donnée (photographies et croquis) ;
- reporter ces informations sur un support cartographique dont l'échelle est adaptée aux désordres représentés ;
- disposer de points de mesures ou de repères permettant une approche qualitative de l'évolution des désordres (témoins de plâtre ou ciment, jauges graduées, plots de mesure, inventaire des blocs tombés, etc.) ;
- dans le cas des roches sensibles aux variations de teneur en eau, programmer la visite de suivi après un changement météorologique marqué (épisode de gel intense, précipitations importantes, sécheresse, etc.).

Le relevé devra être fait de la façon la plus formalisée possible (avec des mesures chiffrées, des photographies repérées et datées (fig. 103), peinture sur les blocs déjà tombés) afin de s'affranchir d'un changement de personnel entre deux visites.

Ces visites doivent faire l'objet de comptes-rendus reprenant l'ensemble des observations et indiquant une éventuelle évolution des désordres constatés. La fréquence de réalisation des visites peut être ajustée en fonction des conclusions de ces comptes-rendus.

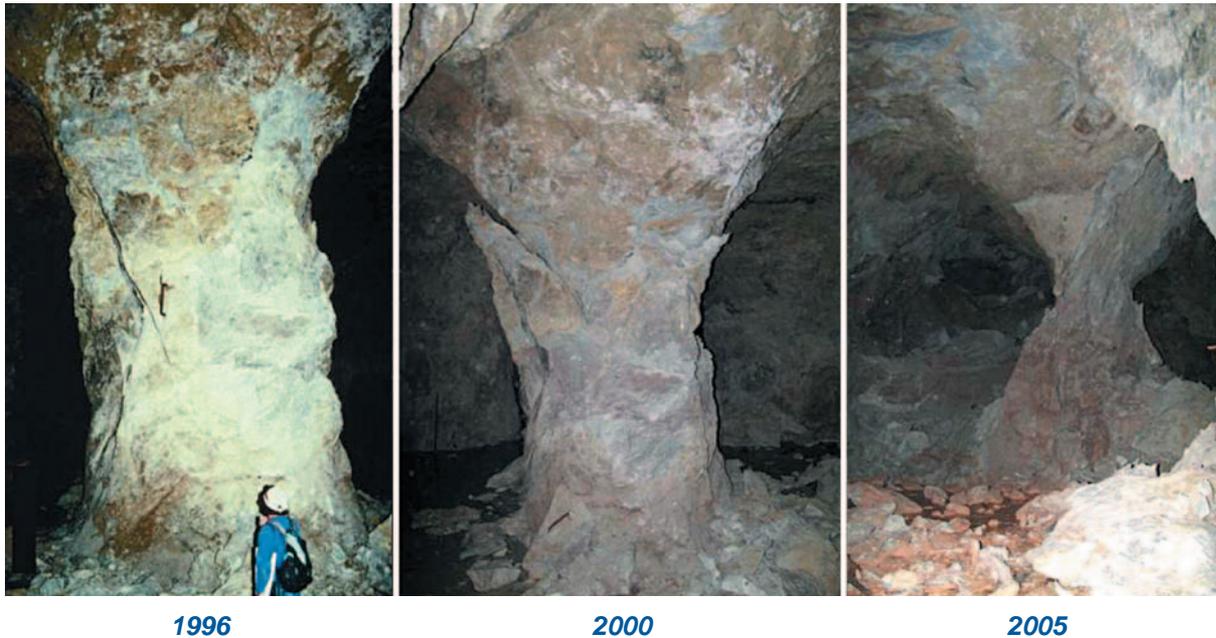


Figure 103  
Prise de vue du même pilier dans la carrière de gypse de Roquevaire (Bouches-du-Rhône)

### 3.2 Instrumentation

Une instrumentation consiste à suivre l'évolution d'une carrière par la pose de capteurs en des points particuliers dont le suivi renseigne sur la cinétique des mécanismes de dégradation et donc sur sa stabilité à terme. Elle permet de compléter le constat ou le suivi observationnel en donnant des tendances d'évolution de points particuliers. L'instrumentation concerne principalement les carrières accessibles. Les moyens à mettre en œuvre (périodicité des mesures, matériel employé, précision de la mesure) seront à adapter à la cinétique et au mécanisme de dégradation.

La plupart du temps, l'instrumentation en carrière est couplée avec un suivi visuel de l'état de la carrière et avec un suivi topographique de précision en surface. Dans certains cas (mauvais état de la carrière, besoin de réactivité, etc.), les mesures réalisées peuvent être télétransmises.

La répartition des points de mesure doit être guidée par deux objectifs découlant de l'observation visuelle et des rapports de visites régulières :

- avoir quelques points de référence en zone considérée comme « stable » ;
- quantifier les déformations des zones évolutives.

La zone stable doit avoir les mêmes caractéristiques géométriques et mécaniques que les zones évolutives pour que les mesures effectuées prennent valeur de référence. Les mesures collectées seront également utilisées pour quantifier l'influence des paramètres extérieurs sur la mesure (température, hygrométrie, vibrations, etc.).

Enfin, les points de référence peuvent permettre de détecter une extension géographique de la zone des désordres (exemple d'un report de charge suite à la ruine d'un pilier à proximité). Une redondance est conseillée dans les méthodes de mesures pour améliorer la fiabilité et pallier d'éventuelles défaillances des appareils. Dans tous les cas, l'avis d'un spécialiste est nécessaire pour valider un programme d'instrumentation.

Parmi les techniques qui rassemblent le meilleur compromis entre fiabilité de la méthode, pérennité du dispositif, facilités d'installation et de mesure, coût de mise en œuvre, on pourra citer, outre les fissuromètres (de type uni ou bi-dimensionnel), les dispositifs suivants.

**Capteur tridimensionnel « type Vinchon »**

Cet instrument métallique rigide (fig. 104) est un fissuromètre triaxial utilisé pour la mesure des déplacements relatifs de deux surfaces adjacentes séparées par une fissure ou une fracture et cela dans les trois directions orthogonales. L'écartement dans l'espace entre les deux bras scellés de l'appareil permet, par le biais d'un dispositif de couples d'ergots sphériques, une mesure de glissement, d'ouverture et de rejet à l'aide d'un pied à coulisse (fig. 105).

L'avantage de cet instrument réside dans sa robustesse, sa facilité de pose et d'utilisation (lecture directe au pied à coulisse), de réutilisation et dans son faible coût.



Figure 104  
Fissuromètre 3D

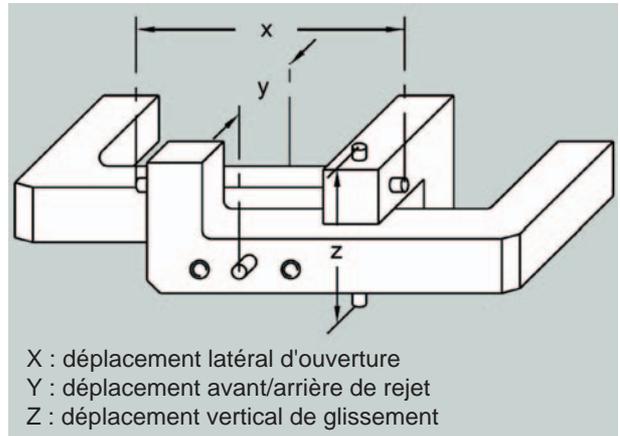


Figure 105  
Schéma de principe d'un fissuromètre 3D

**Distancemètre à fil Invar**

Cet instrument, dont le fonctionnement se rapproche des mesures extensométriques, permet de mesurer à différentes dates les mouvements relatifs de convergence ou de divergence entre deux points. Le dispositif de mesure est constitué par un fil Invar (alliage Fer-Nickel présentant une faible dilatabilité) ancré de part et d'autre d'une discontinuité. L'appareillage (fig. 106) permet la mesure sous tension constante de la distance résiduelle à l'aide d'un comparateur à lecture directe.

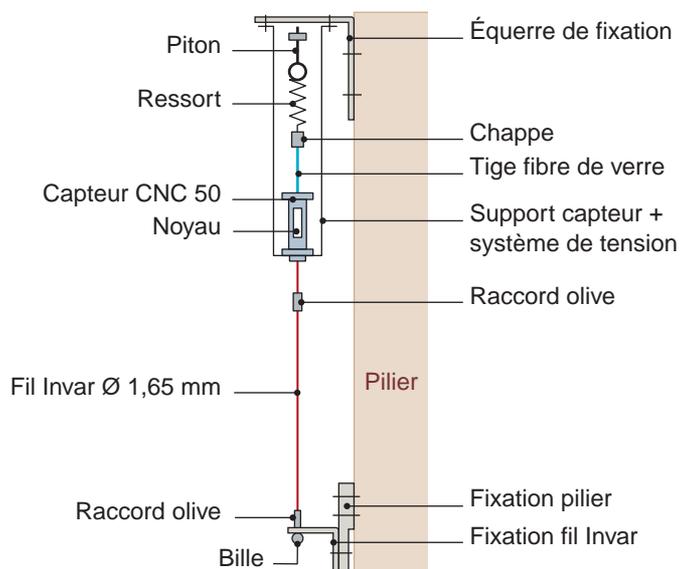


Figure 106  
Photographie et schéma de principe d'un appareil de mesure extensométrique avec enregistreur en carrière

**Extensométrie verticale depuis la surface**

Cette méthode consiste à relier les mouvements éventuels de surface avec ceux du sous-sol et, plus particulièrement, d'appréhender un mouvement du toit de la carrière.

Le principe consiste à suivre dans le temps le déplacement relatif entre deux points dont on connaît la position initiale et la distance qui les sépare. La mesure est réalisée sur un fil Invar dont une extrémité est scellée au toit des galeries (fig. 107) et dont l'autre extrémité est ramenée en surface.

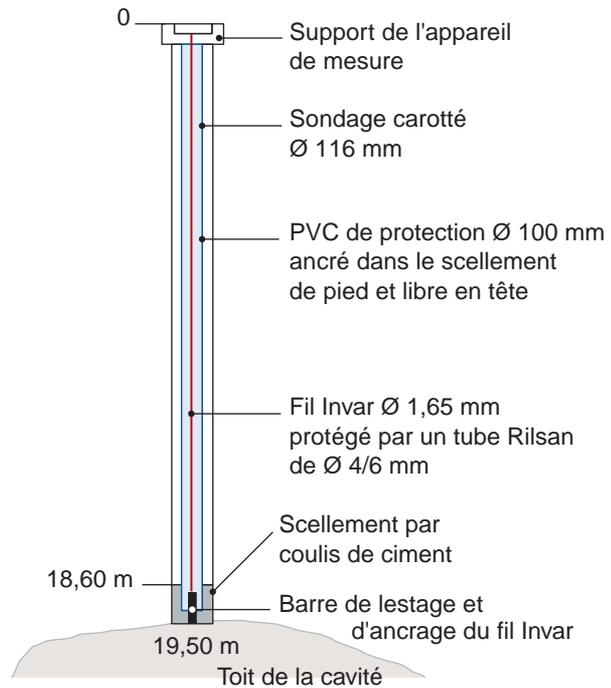


Figure 107  
Mesure extensométrique depuis la surface  
(photographie et schéma de principe)

**Canne de convergence**

Une canne de convergence (fig. 108) est un dispositif rigide permettant de mesurer le rapprochement entre deux points sur lesquels des bases métalliques ont été scellées. Le principe consiste à mesurer à intervalle de temps régulier la distance entre les deux bases. La répétition des mesures renseigne sur la vitesse de déformation. Cette technique permet notamment de mesurer l'évolution de la hauteur des galeries.



Figure 108  
Canne de convergence installée dans  
le tunnel de Saint-Cloud (Hauts-de-Seine)

## 4. Éléments requis et moyens à mettre en œuvre par niveau de diagnostic

Le tableau 3 précise par niveau de diagnostic recherché (voir chapitre 3) les moyens minimaux à mettre en œuvre. Il est bien entendu que, si des informations existantes permettent d'améliorer pertinemment la connaissance du site, il conviendra de les intégrer dans la démarche quel que soit le niveau de diagnostic visé.

Tableau 3  
Adaptation des moyens d'étude au niveau de diagnostic recherché

Éléments	Moyens	Niveaux de diagnostic			
		DU	N1	N2	N3
<b>Données existantes</b>					
Données géologiques et hydrogéologiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carte géologique et hydrogéologique, base de données du sous-sol (BSS)</li> <li>• Bibliographie (rapports, thèses, articles...)</li> </ul>				
Données historiques sur l'exploitation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Archives écrites</li> <li>• Archives numériques</li> <li>• Enquêtes orales</li> </ul>			*	*
Données issues de supports cartographiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carte topographique et géomorphologique, toponymie</li> <li>• Cadastre</li> <li>• Modèle numérique de terrain</li> </ul>				
Données issues de la télédétection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Images aériennes</li> </ul>				
Données géomécaniques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bibliographie</li> </ul>				
Données sur l'environnement de la carrière	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bibliographie, plans, schéma d'assainissement...</li> </ul>				
<b>Reconnaitances et investigations de terrain</b>					
Environnement de la carrière	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visite de terrain, observation</li> <li>• Études spécifiques (topographie, hydraulique, vibrations, réseaux...)</li> </ul>			*	*
Géologie et hydrogéologie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observation</li> <li>• Levés géologiques</li> <li>• Sondages</li> <li>• Suivi piézométrique</li> </ul>			*	*
Géométrie de l'exploitation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Levé métrique - Géométrie globale</li> <li>• Levé décimétrique - Plan de détail</li> </ul>				
Relevé de désordres	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Observation, photographies, description succincte</li> <li>• Description détaillée et localisation précise</li> </ul>			*	*
Données géomécaniques	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Essais de laboratoire</li> <li>• Essais <i>in situ</i> (dont géophysique)</li> </ul>				
Données acquises sur le long terme	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visite régulière</li> <li>• Instrumentation</li> </ul>				

Non nécessaire ou inadapté
  Possible
  Indispensable
 \* Mise à jour ou complément

# Chapitre 5

## Évaluation de la stabilité

Ce chapitre traite des différents outils disponibles pour réaliser le diagnostic de stabilité d'une carrière souterraine. On aborde 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.

Pour chacune des méthodes, on décrit le principe et des exemples de mises en œuvre.

### 1. Les outils disponibles

#### 1.1 La cartographie géotechnique (cas d'une carrière accessible)

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 (cf. chapitre 4 paragraphe 2.3) ;
- les désordres en carrière et en surface (cf. chapitre 4 paragraphe 2.4) ;
- les conditions environnementales (cf. chapitre 4 paragraphe 2.1) ;

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

Sur la base de cette première carte (fig. 109), des zones ayant les mêmes caractéristiques (typologie de désordre et géométrie) sont individualisées.

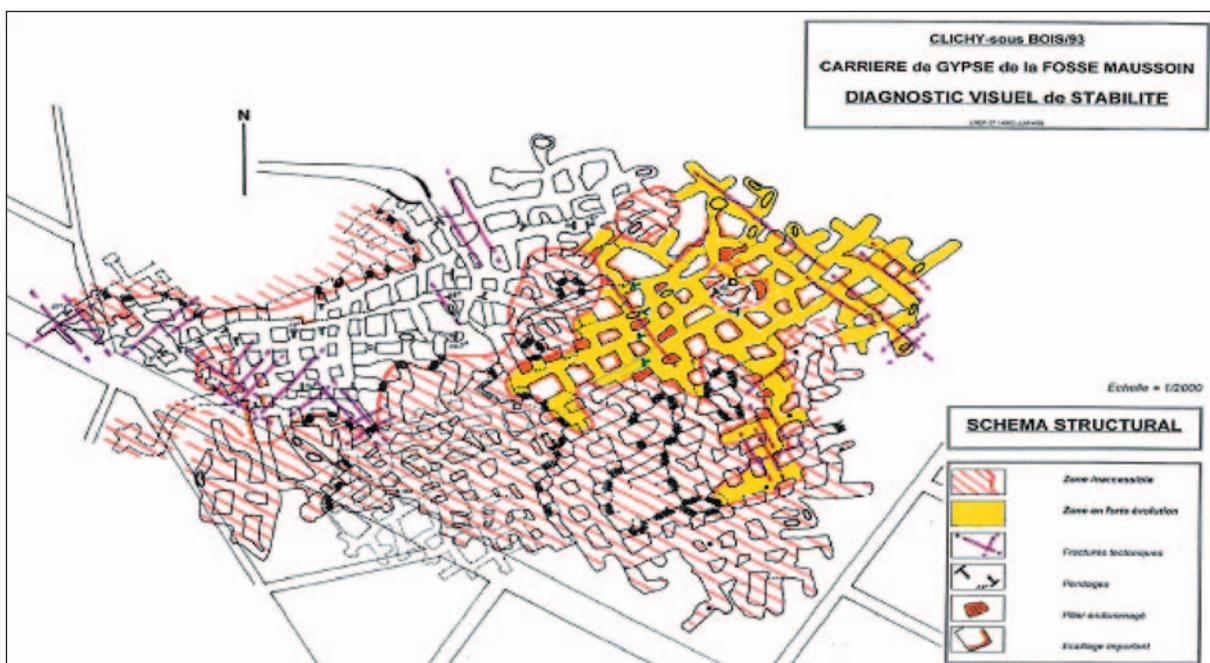


Figure 109  
Cartographie géotechnique

Sur chacune des zones identifiées, les informations collectées précédemment sont croisées avec le modèle géologique et hydrogéologique (cf. chapitre 4 § 2.2), 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. 110), qui alimente l'avis qualitatif sur le niveau général de dégradation de la carrière.

Cette cartographie géotechnique est nécessaire pour les diagnostics de niveau 1 à 3. Si elle est disponible, elle peut également contribuer à l'établissement d'un diagnostic d'urgence.

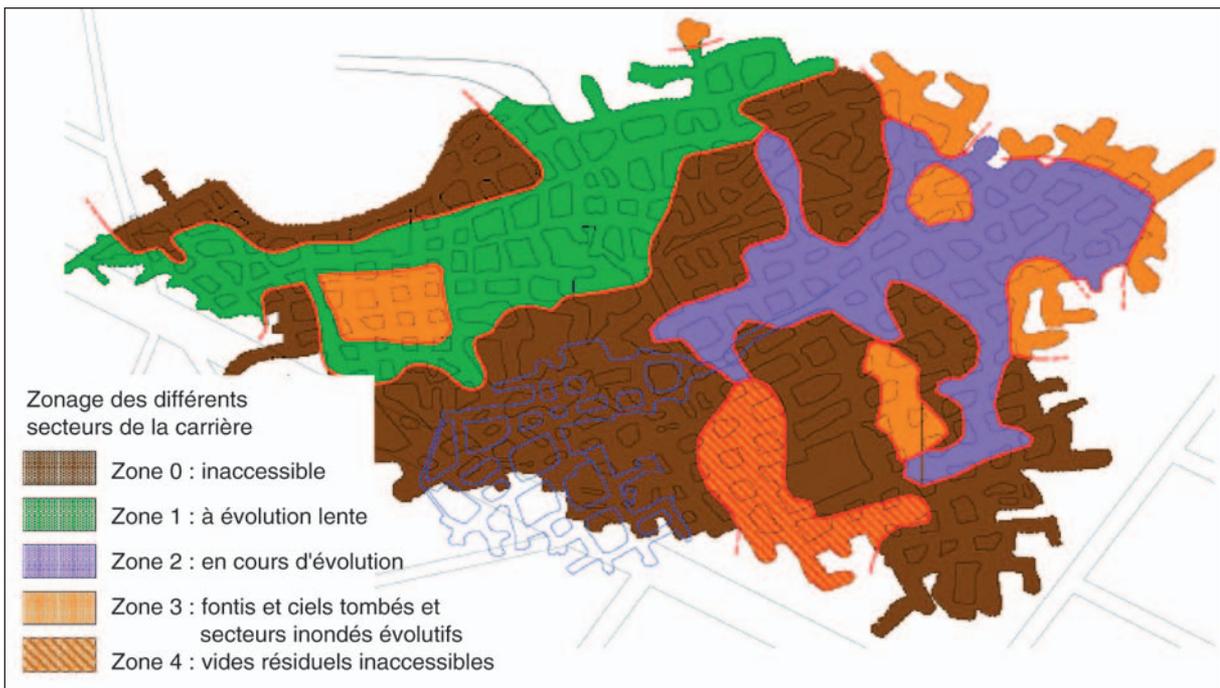


Figure 110  
Plan de zonage de stabilité d'une carrière souterraine

### 1.2 Les règles empiriques régionales

Dans ce paragraphe, plusieurs règles empiriques régionales vont être décrites. Elles permettent de fixer un certain nombre de configurations et de pouvoir donner (notamment lors de diagnostic d'urgence ou de niveau 1) des réponses rapides à des questions impliquant des enjeux importants.

Localement, les nombreuses observations réalisées par les géologues en charge de l'évaluation des risques ont donné lieu à des analyses statistiques qui peuvent fournir des indications pertinentes sur les typologies de désordres pouvant survenir ou sur les caractéristiques géométriques des cavités susceptibles d'être rencontrées.

La validité de ces règles et leur domaine d'application restent très limités car elles ont été ajustées au fil des années sur des bassins de risques bien identifiés. Rien n'interdit à un spécialiste régional de « bâtir » sa propre règle empirique selon les terrains rencontrés et les désordres constatés.

Les règles empiriques concernent tous types d'observations mais portent la plupart du temps sur les conditions de venue au jour des désordres et sur leur géométrie. Elles permettent en effet de traduire des phénomènes complexes faisant intervenir de nombreux paramètres.

Une des expressions les plus rudimentaires de ce type de loi peut, par exemple, être : « les carrières de gypse de la région parisienne sont vouées inéluctablement à une dégradation et généreront, à terme, des désordres en surface quelle que soit leur profondeur d'exploitation ».

Afin d'adopter des abréviations homogènes, le schéma (fig. 111) définit certaines dimensions types utilisées dans ces règles empiriques.

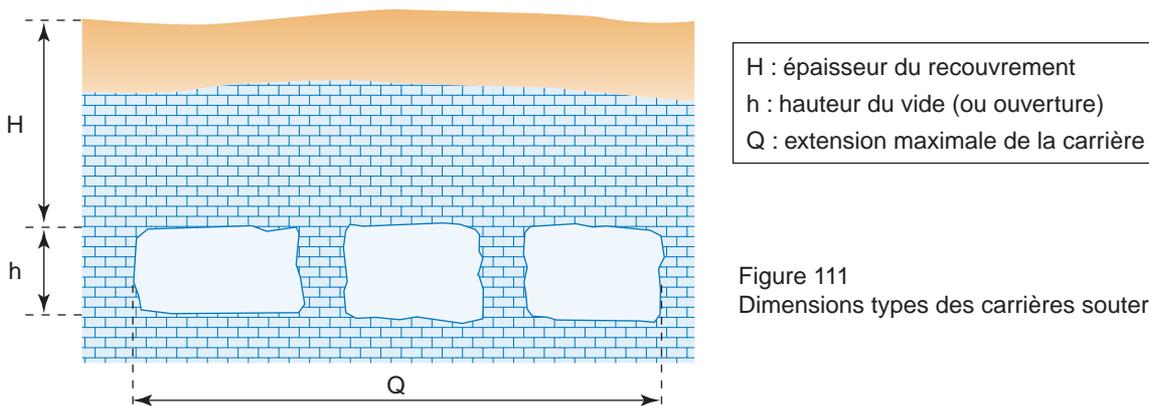


Figure 111  
Dimensions types des carrières souterraines

Parmi les règles régionales, on distinguera :

- celles qui permettent d'identifier en première approche le mécanisme probable de déstabilisation de la carrière ;
- celles qui permettent d'appréhender les conséquences éventuelles en surface.

• **Identification des mécanismes d'instabilité**

**Les montées de fontis (règle du 1/15e)**

Sur la base de l'exploitation du registre des accidents de l'Inspection générale des Carrières de la ville de Paris, J.-C. Vachat (mémoire CNAM - 1982) a analysé de nombreux effondrements survenus au droit des carrières de la région parisienne.

Pour les carrières ayant exploité le calcaire grossier, la répartition des rapports entre les épaisseurs de recouvrement et les hauteurs de vide montre l'absence d'effondrement ponctuel (fontis) lorsque l'épaisseur du recouvrement (H) dépasse 15 fois la hauteur (h) du vide en carrière (Fig. 112).

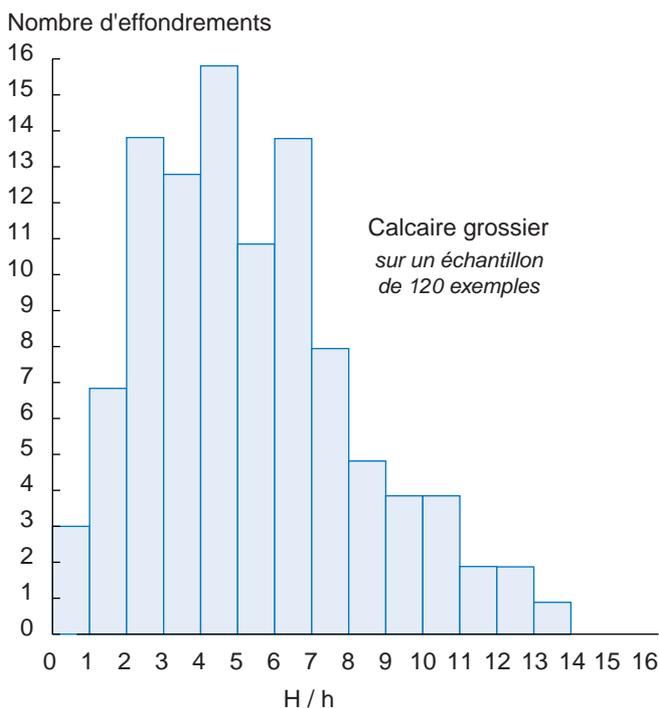


Figure 112  
Nombre d'effondrements en fonction du rapport H/h (Vachat, 1982)

Ce constat, vérifié analytiquement par Vachat, est désormais considéré comme une règle empirique. Il permet notamment d'approcher la susceptibilité d'apparition de fontis dans les carrières, lorsque l'épaisseur de recouvrement varie.

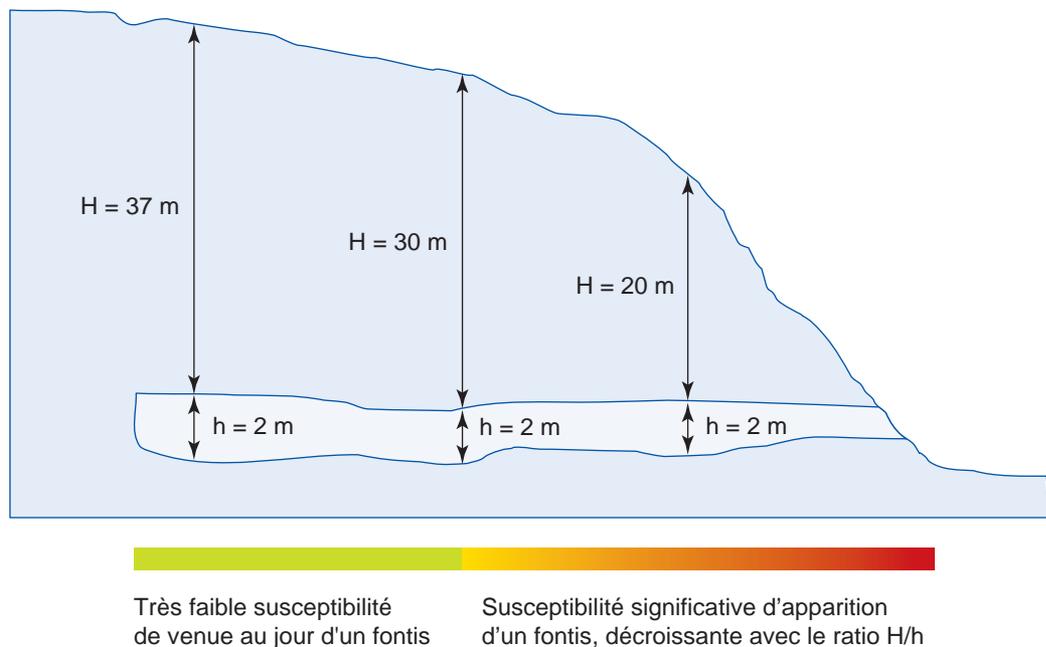


Figure 113

Représentation schématique de la susceptibilité de montée de fontis dans le calcaire grossier de la région parisienne (calculée selon la règle du 1/15e) en fonction des valeurs de H et h

### **Prédisposition à l'effondrement généralisé (règle du Q/H)**

Au-delà d'une certaine extension de la zone exploitée et d'une certaine profondeur, l'ouvrage souterrain peut subir une rupture généralisée qui se traduira en surface par un effondrement brutal.

Les analyses menées depuis 50 ans sur de nombreux cas d'effondrements, survenus principalement en sites miniers, ont conduit à déterminer de façon empirique une valeur seuil du rapport entre l'extension maximale de la carrière (Q) et la hauteur du recouvrement (H), au-delà duquel ce phénomène d'effondrement généralisé est susceptible de survenir.

Ainsi, d'après Charmoille et Thoraval (2010), pour une cavité de profondeur comprise entre 0 et 200 mètres surmontée d'un banc épais de résistance mécanique élevée, Q/H doit être supérieur à 1,3 pour que l'effondrement généralisé se produise en surface.

Des différentes sources étudiées, il ressort de façon générale qu'une valeur de ce rapport supérieure à 1 indique une susceptibilité forte à l'effondrement généralisé plutôt qu'à l'affaissement, surtout si le banc surmontant la cavité est épais et très résistant.

### **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 (décrit au chapitre 2) 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.

Les études techniques réalisées pour le plan de prévention des risques « mouvements de terrain » (PPR MVT) réalisé sur les communes de Château-du-Loir et Vouvray-sur-Loir (72) confirment cette observation. Les statistiques, établies à partir des fiches de diagnostic visuel des pans de coteaux et des caves (359 fiches utilisées), montrent que, dans 85% des cas, l'influence du coteau sur la stabilité d'une cavité est significative sur une distance à l'intérieur de la cavité égale à la hauteur du coteau (fig. 114).

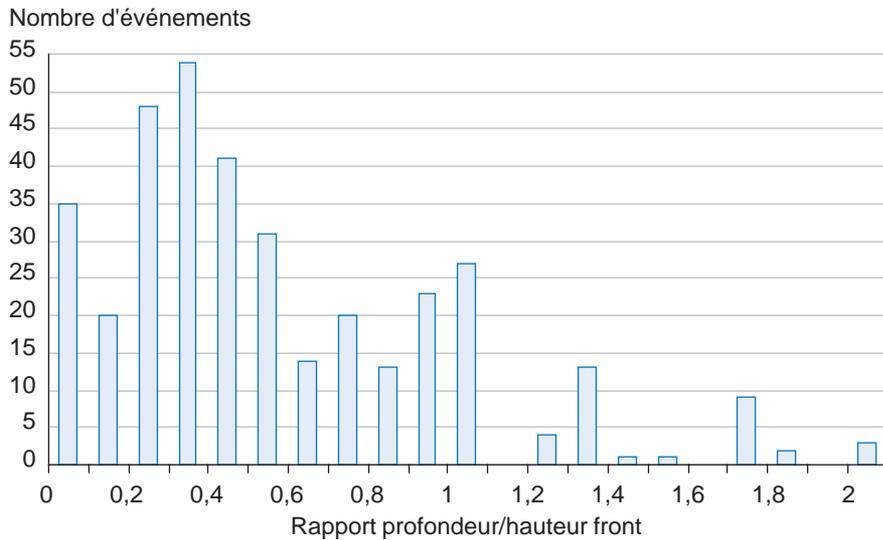


Figure 114

Répartition des fractures de décompression en fonction du rapport développement souterrain / hauteur du front ; statistiques réalisées à partir des diagnostics du coteau réalisés dans le cadre du PPR MVT de Vouvray-Château (Sarthe)

• **Caractérisation approximative des phénomènes en surface**

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

Sur le bassin d'exploitation de la deuxième masse de gypse (ludien) en bordure sud de la ville de Meaux, l'analyse de la répartition des diamètres des fontis se traduit par l'histogramme de répartition suivant (fig. 115).

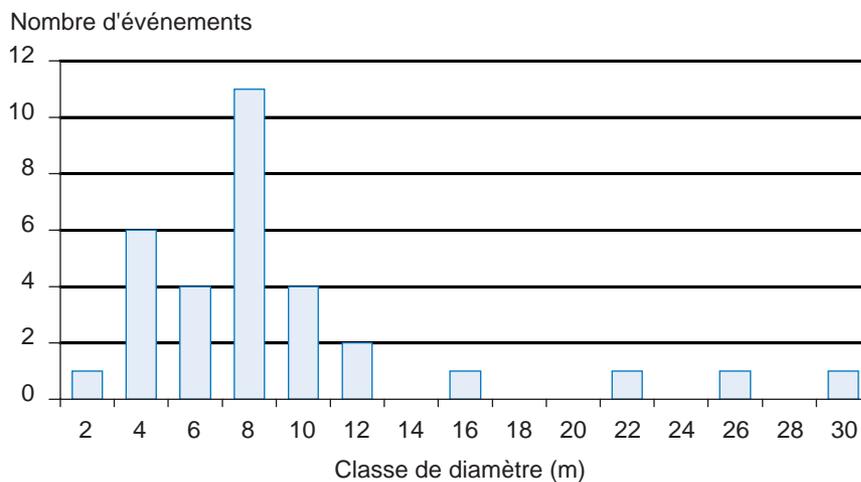


Figure 115

Répartition de la taille des fontis (Bordure sud de Meaux, 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.

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

Une analyse statistique réalisée par le BRGM en 1997 à la demande de la préfecture de la Seine-Maritime a montré que l'extension maximale des marnières étudiées était inférieure ou égale à 55 mètres dans 98% des cas.

Les données actuellement exploitées par le LRPC de Rouen (fig.116) 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).

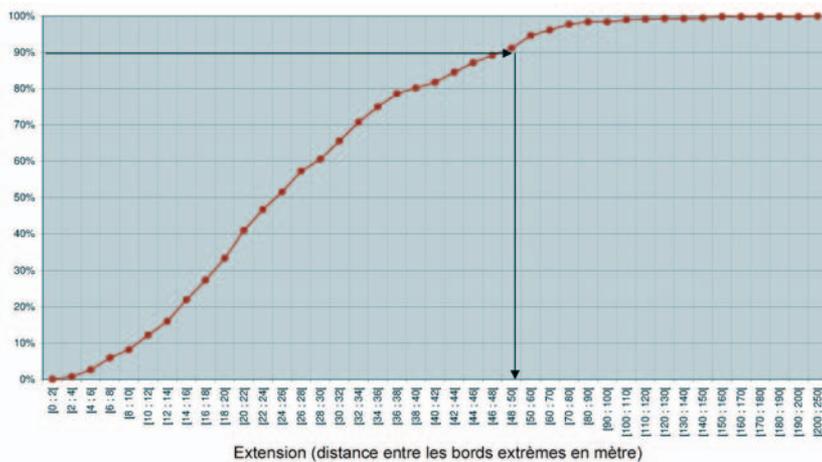


Figure 116  
Report des extensions maximales des marnières de Haute-Normandie

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 (fig. 117 ).

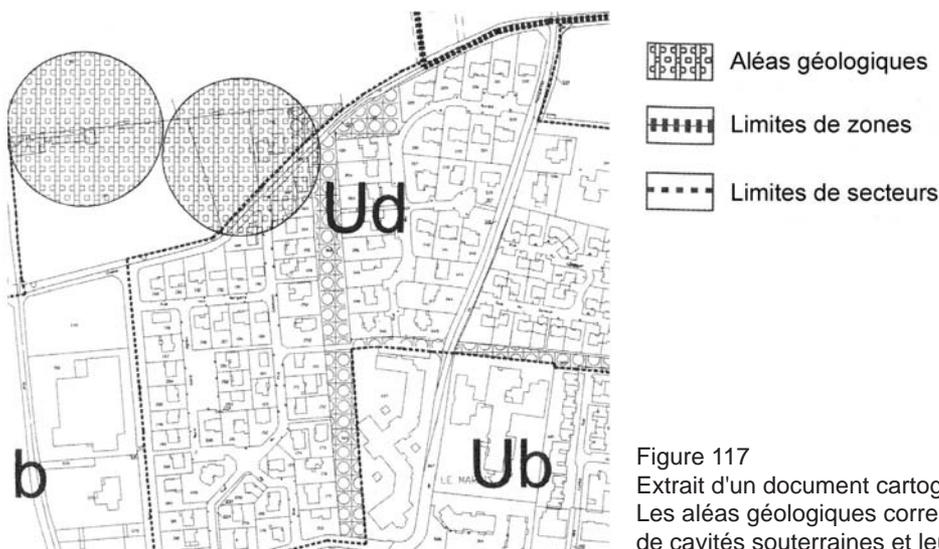


Figure 117  
Extrait d'un document cartographique de PLU  
Les aléas géologiques correspondent aux indices de cavités souterraines et leur zone d'influence

**Rayon d'action des fontis, zone d'influence d'une carrière**

Connaissant la portée maximale entre deux appuis (soit l'effondrement maximal possible), il est possible d'approcher l'ouverture maximale du fontis en surface.

Sur les carrières de calcaire grossier de la région parisienne, Vachat a constaté (fig. 118) que les montées de fontis suivent des génératrices sub-verticales (angle par rapport à l'horizontale de 80 à 85 degrés).

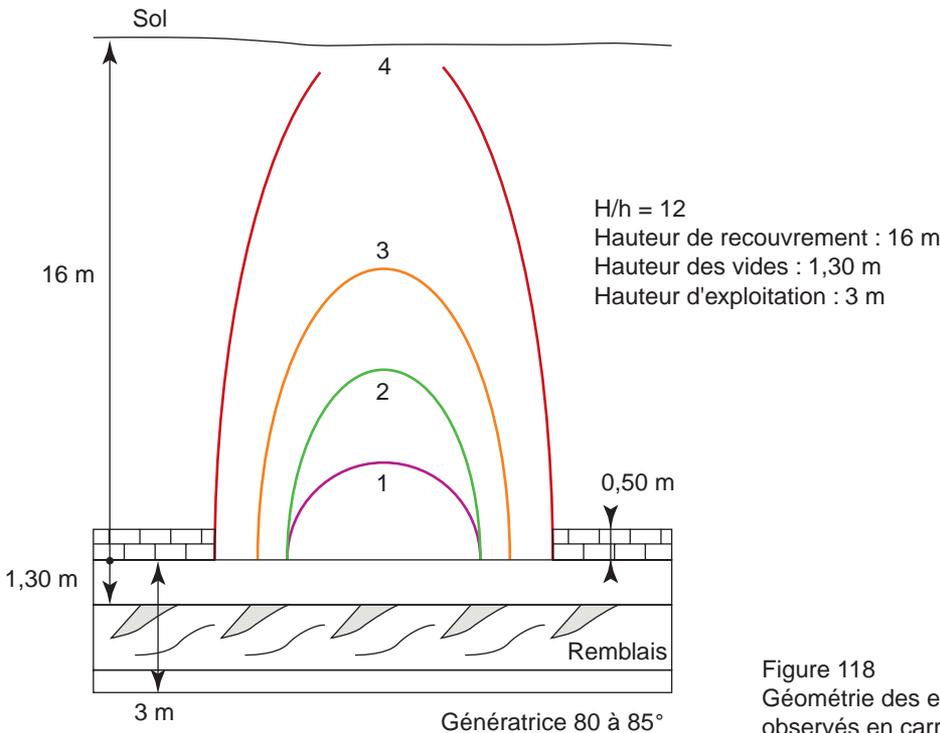


Figure 118  
Géométrie des effondrements observés en carrière (Vachat, 1982)

Lorsque l'effondrement atteint les sols meubles du recouvrement, il est observé un talutage prononcé dans ces sols (fig. 119) du fait de l'action de l'eau suivant un angle proche de l'angle de frottement interne du matériau concerné (angle  $\beta$ ).

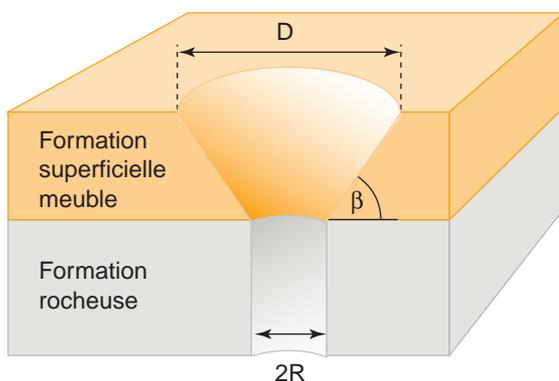


Figure 119  
Schéma théorique d'un fontis circulaire (LCPC-INERIS, 2002)

Selon la nature des matériaux, le diamètre (D) de l'effondrement est variable. Avec le temps et les sollicitations météorologiques (eau, gel, etc.), les talus de l'effondrement vont s'évaser et donner lieu à un effondrement plus grand (angle d'équilibre des talus en liaison avec les angles de frottement des matériaux). La vitesse d'évolution étant variable d'un site à un autre, on retient classiquement pour la gestion des risques les dimensions maximales susceptibles d'être rencontrées.

D'un point de vue pratique, cette extension maximale est approchée de façon satisfaisante en appliquant un angle de déstabilisation à compter du mur de la carrière (fig. 120 et 121). Cet angle  $\alpha$  est déterminé selon les contextes régionaux. Il est généralement compris entre 20 et 45 degrés.

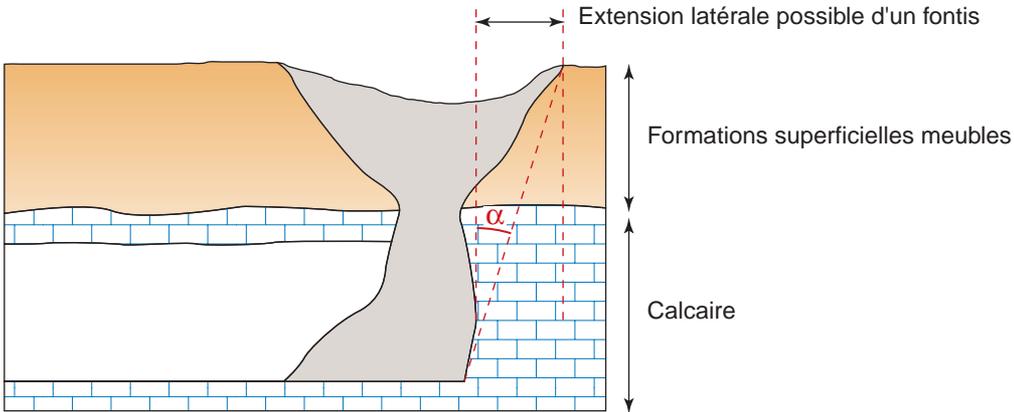


Figure 120  
Schéma de principe de l'angle d'influence ( $\alpha$ ) d'une carrière souterraine

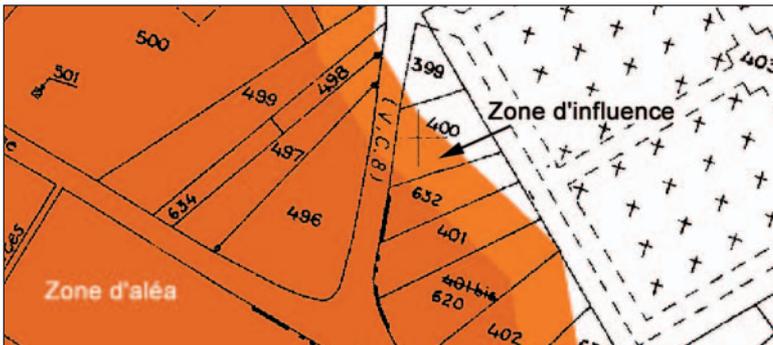


Figure 121  
Extrait d'une carte d'aléa (diagnostic de niveau 2) mettant en évidence une zone d'aléa et une zone d'influence dont la largeur est dépendante de l'importance du recouvrement.

### Amplitude maximale d'un affaissement

Les rétro-analyses menées par l'INERIS sur les affaissements connus du bassin ferrifère Lorrain ont permis d'estimer une valeur d'affaissement maximal dans le cas d'une exploitation d'un étage, en fonction du taux de défrusement ( $\tau$ ) et de la hauteur de la galerie de la mine ( $h$ ).

Il a été ainsi montré que l'amplitude maximale  $\Delta H$  prévisible au centre de la cuvette d'affaissement vaut :  $\Delta H = 0,6 * \tau * h$

Par ailleurs, selon les mêmes données, la largeur critique (extension de l'exploitation à partir de laquelle on obtient l'amplitude de tassement maximale) est observée pour un rapport extension ( $Q$ ) sur profondeur ( $H + h$ ) supérieur ou égal à 1,2 (voir figure 111).

Ces données issues de travaux miniers concernent des cavités profondes. La transposition de cette règle pour les carrières souterraines abandonnées (donc moins profondes) reste délicate et peu documentée.

### 1.3 Les méthodes analytiques

Lorsque l'évaluation du risque d'instabilité nécessite un diagnostic approfondi qui ne s'inscrit pas dans le cadre d'un simple avis d'expert, l'étude de stabilité (de niveau 2 ou 3) se traduit classiquement par l'estimation d'un coefficient de sécurité vis-à-vis de chacun des mécanismes de rupture considérés comme pertinents. Le principe est de déterminer et de comparer, d'une part, la charge supportable par le massif, exprimée par sa résistance ( $R$ ), et, d'autre part, la sollicitation régnant au sein de celui-ci ( $S$ ).

$$F = R/S$$

Pour considérer que la stabilité est assurée, la valeur de F généralement admise est strictement supérieure à 1 si des coefficients correcteurs ont été appliqués aux valeurs de résistance considérées. Par défaut, on conseillera une valeur de F supérieure ou égale à 1,5.

Le cas échéant, pour affiner le calcul, le géotechnicien peut introduire des coefficients correcteurs afin de tenir compte du phénomène de fluage des roches, de leur vieillissement.

Des coefficients correcteurs sont détaillés au chapitre 4 paragraphe 2.5, ils sont à utiliser avec précaution afin de respecter leur domaine de validité. La fracturation du massif est également un élément de dégradation des caractéristiques mécaniques du massif.

• **Méthode de l'aire tributaire**

Le principe du modèle de l'aire tributaire est d'admettre que chaque pilier de l'exploitation reprend individuellement les contraintes générées par les terrains situés au-dessus de ce pilier ainsi qu'une partie de ceux qui l'entourent (fig. 122).

L'utilisation de ce modèle est notamment possible quand l'extension maximale de l'exploitation (Q) est supérieure à une fois et demie sa profondeur (H+h), dans le cadre de carrières exploitées horizontalement, avec chambres et piliers réguliers recouverts d'un matériau homogène (fig.123).

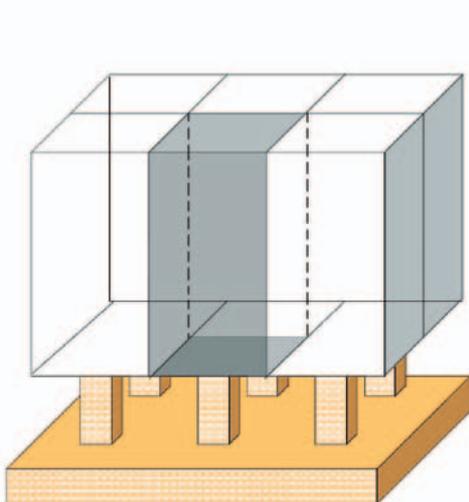


Figure 122  
Schéma de principe de la méthode

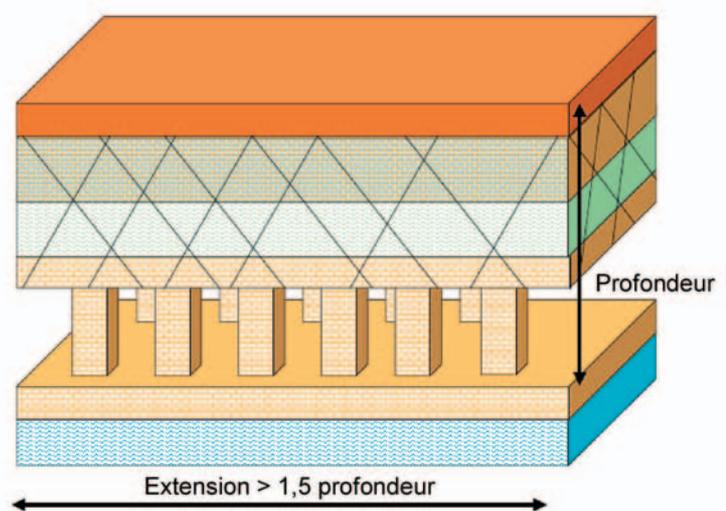


Figure 123  
Cotations adoptées pour la méthode de l'aire tributaire

- La méthode n'est pas adaptée dans les cas suivants :
- pour estimer avec précision la contrainte dans un seul pilier ;
  - dès lors que l'on se situe en bordure d'exploitation ;
  - si la voûte est fracturée et entraîne un report de charge dissymétrique ;

La contrainte verticale théorique moyenne  $\sigma_n$  exercée sur les piliers d'une zone type de la carrière est fonction du poids des terrains sus-jacents et du taux de défrètement de la carrière dans cette zone, elle est obtenue par :

$$\sigma_n = \gamma H / (1 - \tau)$$

où

$\gamma$  est le poids volumique apparent du recouvrement (kN/m<sup>3</sup>),

$H$  est la hauteur de recouvrement (m),

$\tau$  est la valeur du taux de défrètement (%)

La mise en relation entre la contrainte verticale théorique  $\sigma_n$  et les caractéristiques mécaniques moyennes des formations en présence, en l'occurrence la résistance ultime à la compression uniaxiale  $R_u$  (Chapitre 4 paragraphe 2.5), permet de définir un facteur de sécurité F qui s'exprime par la relation :

$$F = R_u / \sigma_n.$$

La représentation de la valeur de  $\sigma_n$  en fonction du *taux de défrèvement* de la carrière (fig.124) montre l'importance d'une bonne estimation préalable du taux de défrèvement.

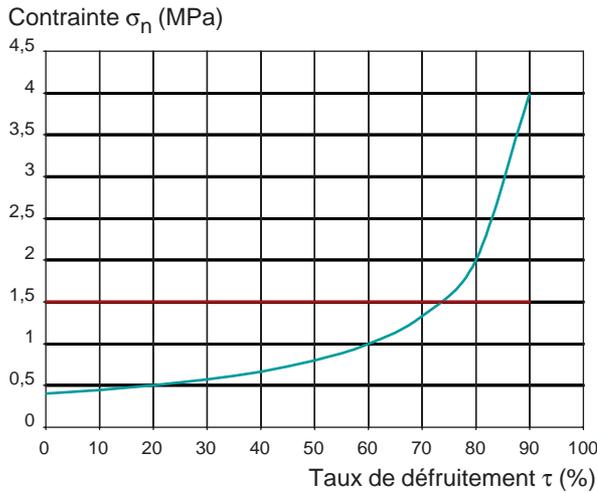


Figure 124

Valeur de  $\sigma_n$  théorique selon le taux de défrèvement. Au-delà de 75 % de taux de défrèvement, la contrainte exercée par le massif est supérieure à la résistance d'un tuffeau.

Le calcul présenté montre la contrainte prévisible au sein d'un pilier représentatif d'une carrière située à 20 mètres de profondeur dans un tuffeau présentant une faible résistance à la compression ( $R_c = 3$  MPa et donc  $R_u = 1,5$  MPa, comme précisé au chapitre 4 § 2.5). On note l'importance d'une estimation précise du taux de défrèvement, la stabilité étant acquise pour  $\tau = 70$  % et non acquise pour  $\tau = 80$  %.

Ces approches sont davantage adaptées à la détermination du dimensionnement de futures exploitations qu'au diagnostic de stabilité des carrières abandonnées. Néanmoins, elles peuvent permettre au géotechnicien de se faire une opinion sur le bien-fondé du dimensionnement de la carrière vis-à-vis des conditions de stabilité (taux de défrèvement, taille des piliers, etc.).

• **Modèles locaux de toit**

L'estimation de la stabilité de la voûte d'une carrière peut s'appuyer sur la quantification des efforts qui lui sont appliqués. Une portée maximale mesurée dans une galerie ou encore aux carrefours de deux galeries sera considérée (prendre le cas le plus défavorable) et un modèle analytique appliqué selon le contexte géotechnique du site (matériaux résistants, nature du recouvrement, etc.).

Les modèles décrits ci-après s'appliquent dans le cas d'un ciel composé d'une dalle d'épaisseur ( $e$ ) minimale 0,5 m, non fracturée verticalement et pour des matériaux ayant une structure stratifiée (matériaux sédimentaires). Ils prennent en compte un phénomène de décollement et de flexion du ciel.

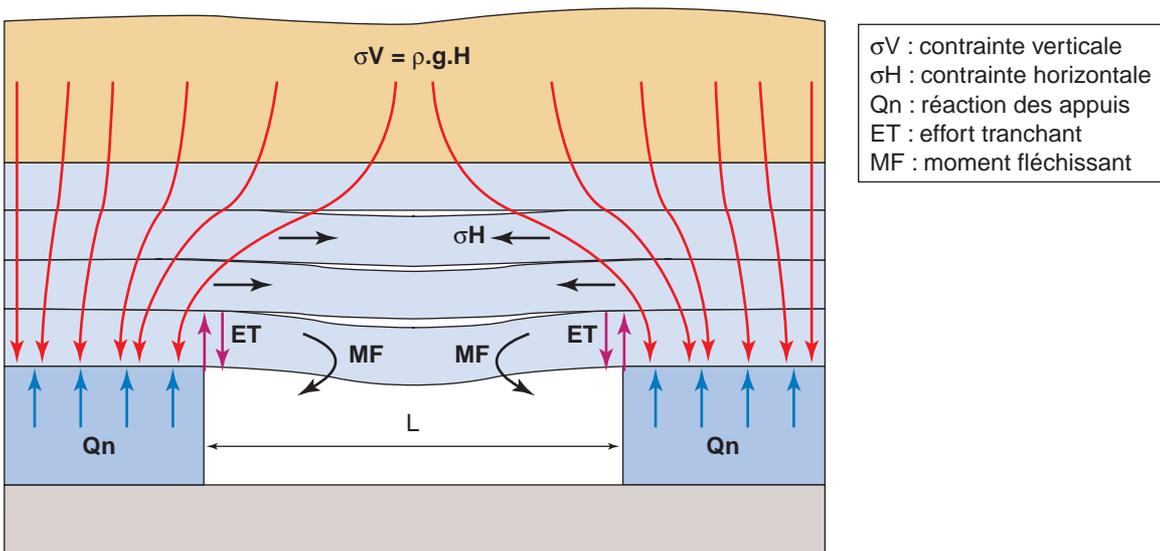


Figure 125

Schéma récapitulatif des contraintes appliquées à une dalle de toit. (LCPC - INERIS, 2002)

Deux types de modèles sont généralement employés :

- le modèle de plaque ;
- le modèle de poutre.

### **Modèle de plaque**

Le modèle de plaque posée sur 4 appuis simples simule correctement les phénomènes rencontrés lors du croisement de deux galeries. Des abaques (Goulet et Boutin, 1996) permettent, selon la géométrie de la plaque (largeur, longueur et épaisseur de la plaque) de définir le moment maximal admissible ou l'effort tranchant maximal développé au sein de la dalle.

Pour le cas particulier d'une dalle carrée (de côté  $L$ ) d'épaisseur  $e$  (avec  $e \ll L$ ), la valeur théorique de la contrainte développée dans la fibre inférieure de la dalle au centre de celle-ci est égale à :

$$\sigma_{\text{traction théorique}} = 0,67 (qL^2 / e^2)$$

avec  $q$  contrainte unitaire s'appliquant sur la plaque en kPa

$L$  et  $e$  en mètre,

$\sigma_{\text{traction théorique}}$  en MPa

La contrainte ainsi calculée est à comparer avec la contrainte en traction admissible par le matériau en prenant en compte un coefficient de sécurité à fixer selon la situation.

L'effort de cisaillement maximal est obtenu en bordure de la plaque à la jonction avec les appuis simples. Si le calcul de résistance des matériaux permet d'obtenir une valeur de résistance au cisaillement théorique, celle-ci est rarement exploitable car l'essai triaxial nécessaire à l'obtention de la résistance réelle est rarement mis en œuvre.

### **Modèle de poutre**

Le modèle de poutre encastree s'applique plus particulièrement dans le cas d'une salle rectangulaire ou d'une galerie isolée. Il peut également être appliqué à l'intersection de deux galeries en comparaison du modèle précédemment décrit (il convient alors de prendre en compte la valeur calculée la plus défavorable).

L'utilisation de ce modèle de poutre est plus facile que celui de la plaque car il ne nécessite pas la consultation d'abaques. Les données d'entrées sont :

- $L$  portée de poutre considérée (m),
- $e$  épaisseur de la poutre (m),
- $q$  contrainte unitaire appliquée sur la poutre (kPa).

La valeur de contrainte à la traction théorique maximale vaut :

$$\sigma_{\text{traction théorique}} = qL^2 / 2e^2$$

Cette contrainte est obtenue en partie supérieure de la poutre (donc dans une zone non observable) au niveau de l'encastrement (au droit des piliers).

La contrainte ainsi calculée est à comparer avec la contrainte en traction admissible par le matériau en prenant en compte un coefficient de sécurité à fixer selon la situation.

### **Conclusions sur les modèles locaux de toit**

Le modèle de poutre fléchie est représentatif de nombreux cas de figure ; cette « poutre » est partiellement encastree à ses extrémités dans le pilier, lui-même déformable, ce qui correspond à une condition d'appui complexe : en pratique, on aura à choisir entre appuis simples ou encastrement parfait en fonction de la géométrie du site.

L'utilisation de ces deux types de modèle pose la question de la contrainte unitaire  $q$  appliquée au modèle.

Selon la configuration géotechnique du recouvrement la valeur de  $q$  variera entre :

- $q = \gamma \times e$  si l'on considère que la plaque (ou la poutre) est décollée du banc supérieur et qu'elle n'est soumise qu'à son propre poids ;

-  $q > \gamma x$  e si l'on considère que les terrains de recouvrement sont constitués de matériaux meubles ou plus déformables que le bas-toit (contraste de module de 1/5 par exemple).

La réalité se trouve souvent dans l'estimation d'une « voûte de décharge » des terrains qui constituera alors la charge maximale appliquée à l'élément porteur (valeur par excès).

On conclura sur ces modèles en notant que la valeur de traction calculée est proportionnelle à la portée et inversement proportionnelle au carré de l'épaisseur élémentaire des bancs.

En l'absence de valeur d'essai permettant de comparer la résistance à la traction réelle et théorique, il est également possible de faire un rétro-calcul en relevant la valeur minimale des portées instables (suite à une flexion) et la hauteur moyenne des bancs. On obtient alors une valeur de contrainte à la traction *in-situ*, réutilisable pour le reste de la carrière.

• Règles d'arrêt des fontis

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 4), 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 (fig. 126).

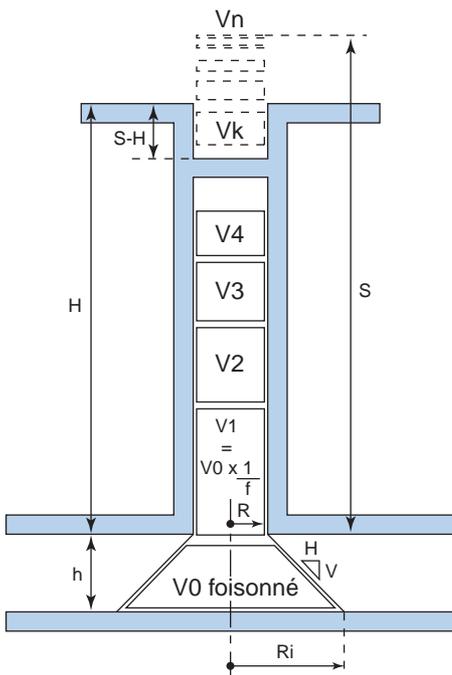


Figure 126  
Schéma explicatif du principe  
d'auto-comblement  
et des notations adoptées  
(A. Delfaut, 2007)

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)

La formule donnant S (montée de fontis) se présente sous la forme :

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

Avec :

- R rayon de la cheminée de fontis (m) ;
- $V_0$  volume initial des matériaux éboulés dans la carrière ( $m^3$ ) ;
- f coefficient de foisonnement du matériau (tableau 5) ;
- S hauteur de montée de fontis (m).

En considérant un éboulis de forme conique, la valeur de S peut être approchée par la formule suivante :

$$S = h (R_i^2 + RR_i + R^2) / 3 R^2 (f - 1)$$

avec :

- $R_i$  rayon de la base du cône d'éboulis (m) donné par la formule  $R_i = R + h / \tan(\delta)$  ;
- $\delta$  angle des matériaux éboulés dans la galerie ;
- $h$  hauteur de la galerie (m).

Si cette approche simple paraît séduisante, il convient d'être très prudent pour son application. En effet, les incertitudes liées aux coefficients de foinnement 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. La meilleure utilisation de cette règle nécessite le calage de ces coefficients sur des mesures réelles.

## 1.4 Les modèles numériques

Le recours à ces modèles est assez rare, toutefois, ils sont utilisés lors des diagnostics de niveau 3, lorsque l'approche analytique est rendue impossible du fait de la dissymétrie des galeries ou des piliers. La seule façon d'approcher quantitativement la stabilité d'une carrière souterraine ou de l'une de ses parties consiste alors à utiliser un modèle numérique reprenant les données géométriques et géomécaniques de la carrière et du matériau la constituant.

Les codes de calcul les plus usuels susceptibles d'être utilisés appliquent plusieurs méthodes différentes :

- les différences finies et éléments finis pour les modèles continus et les petites déformations ;
- les éléments distincts pour les modèles discontinus et les grandes déformations.

Plusieurs exemples de calcul sont présentés dans ce chapitre. Ils sont développés dans l'annexe 2 du guide.

### • Objectifs

La modélisation peut permettre de :

- comprendre les mécanismes en jeu ;
- évaluer des ordres de grandeurs (de contrainte, de déformation) ;
- analyser la sensibilité d'un site ;
- estimer les évolutions envisageables ;
- exclure des scénarii improbables.

Enfin, une étude paramétrique en retour peut permettre d'expliquer des désordres apparus, d'étudier des scénarii d'aménagement (creusement, comblement...) dans une carrière correctement modélisée.

### • Démarche de travail

La capacité des ordinateurs ainsi que la précision des données de terrain ne permettent pas toujours de réaliser une modélisation globale d'une carrière en 3D. En se limitant à une coupe 2D on ne pourra représenter réellement la carrière mais en sélectionnant la coupe la plus représentative, on peut obtenir une image assez synthétique de la répartition des charges dans son environnement.

Ces données peuvent alors être la base d'une modélisation locale plus précise qui peut être soit semi-globale (quelques piliers) soit locale (un à deux piliers).

On peut, dès lors, effectuer des études paramétriques en incluant des différences dans les propriétés des matériaux ou introduire une à deux fractures pour étudier les reports des contraintes. Généralement, on étudiera les murs et le toit des cavités en semi-global, les piliers en modélisation locale.

Chronologiquement, les différentes étapes d'une modélisation sont :

- la définition de la géométrie du modèle ;
- l'affectation des caractéristiques mécaniques du modèle (loi de comportement, critères de rupture, etc.) ;
- la détermination du maillage du modèle ;
- la fixation des conditions aux limites du modèle ;
- la validation du modèle par une étude de sensibilité ;

- l'analyse des résultats (c'est-à-dire la localisation des points faibles et des mécanismes de rupture probables) ;
- la justification d'un confortement.

Dans la suite du texte, ces différentes étapes sont détaillées. La définition de la géométrie du modèle doit se faire selon l'échelle de travail souhaitée (approche globale, locale ou à l'élément) et selon la symétrie des éléments de la carrière (piliers, toit, etc.).

### • Choix des caractéristiques géomécaniques du modèle

Pour un matériau continu et homogène, on adopte, dans un premier temps, une loi de comportement élastique en vérifiant que les contraintes ainsi calculées sont compatibles avec la contrainte admissible du matériau considéré (pas de zone de plasticité).

Dans un deuxième temps, le modèle est affiné en adoptant un modèle de comportement élasto-plastique. C'est ce calcul qui permet de vérifier la validité du modèle. Le critère de rupture à retenir est celui donné par la réalisation des essais géomécaniques représentatifs.

Dans le cas d'hétérogénéités lithologiques au sein du matériau (bancs de silex, joints stratigraphiques...), on approchera son comportement mécanique soit en l'altérant (définition d'un matériau équivalent moins résistant) soit en plaçant ces hétérogénéités dans le modèle et en leur affectant les caractéristiques mécaniques adaptées.

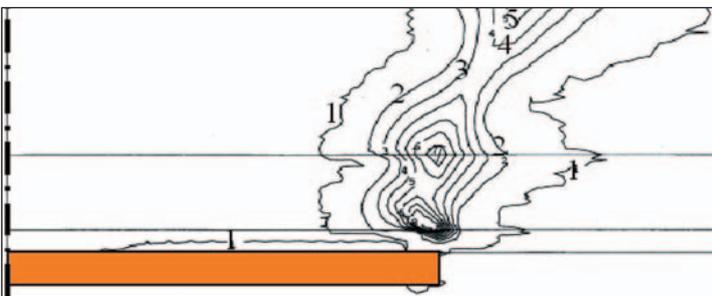
### • Modélisation globale

La modélisation de l'ensemble d'une carrière souterraine de grande étendue, exploitée par chambres et piliers, se heurte à un problème de finesse de description et de temps de calcul.

Une possibilité pour obtenir assez simplement des résultats « macroscopiques » est de représenter, sur un profil vertical 2D, la couche exploitée par un matériau continu, correspondant à une « homogénéisation » des chambres et piliers. Ce matériau peut être considéré comme élastique, avec des caractéristiques évaluées à partir de celles de la couche exploitée et du taux de défrèvement.

La taille du modèle, en particulier la dimension horizontale, doit être suffisante pour que les effets de bord puissent être négligés au droit de la carrière. Par cette technique, on peut obtenir des résultats fiables sur ce qui se passe à une certaine distance de la carrière, par exemple au voisinage de la surface.

La figure 127 présente les courbes d'égale déformation plastique au sein des terrains de couverture. On peut observer l'amorce d'une rupture partant du front d'exploitation vers la surface, préfigurant un effondrement généralisé, et, corrélativement, la faible sollicitation du toit sur l'axe de symétrie, qui reste dans le domaine élastique. Ce type d'approche permet d'obtenir un angle d'influence de la carrière (tel que défini au paragraphe 1.2.



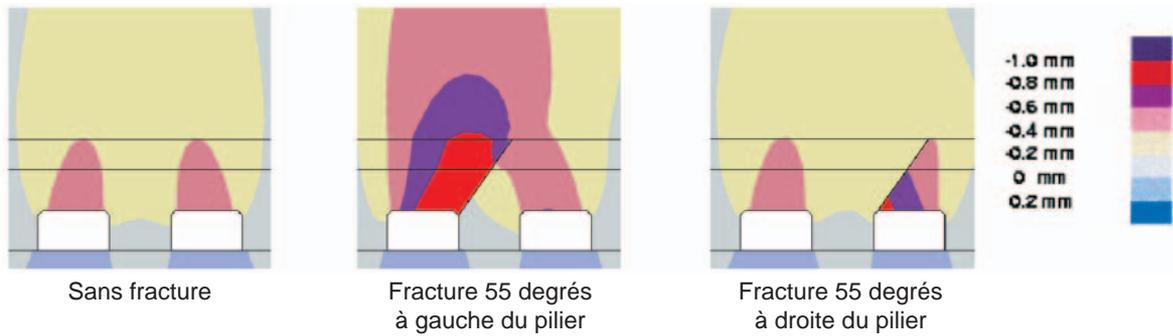
Courbes d'égale déformation plastique dans l'encaissant (code CESAR-LCPC)  
Courbe 1 :  $3,2 \cdot 10^{-6}$  m  
Courbe 7 :  $2,1 \cdot 10^{-3}$  m

Figure 127  
Modèle avec zone exploitée « homogénéisée » (en couleur). Axe de symétrie vertical à gauche.

### • Modélisation locale

On procède à une modélisation locale (ou semi-globale) lorsque les informations fournies par la modélisation globale sont insuffisantes à la compréhension des phénomènes d'évolution de la carrière. C'est notamment le cas lorsque des éléments rompent la symétrie de la carrière (présence de discontinuités rocheuses), ou dans le cas des petites carrières sans symétrie réelle (exemple : une marnière). Enfin, dans le cas d'une superposition des galeries, la réalisation d'une modélisation locale est particulièrement adaptée.

À titre d'exemple, le logiciel UDEC permet de simuler l'influence en surface de la position d'une discontinuité dans des galeries souterraines (fig. 128).



Figures 128

Relevés des déformations verticales des trois modèles locaux réalisés à l'aide du Code UDEC

• **Modélisation d'un élément**

La modélisation d'un seul élément n'est rigoureuse que pour des carrières avec des piliers de même forme et répartis de façon périodique ; cette approche est représentative, loin du front de masse, lorsque le milieu dans son ensemble respecte la périodicité sur de grandes longueurs, y compris les bancs de recouvrement.

Dans ce cas, on attirera l'attention du lecteur sur l'étendue du modèle qui doit prendre en compte la zone d'influence du vide autour de celui-ci (de deux à cinq fois la dimension du plus grand vide). De même, le maillage devra être suffisamment fin dans les zones d'intérêt : au moins une dizaine d'éléments en largeur pour un pilier.

La modélisation numérique par éléments finis (figures 129 et 130) met en évidence le phénomène de soufflage du mur dans un carrière de gypse.

La figure 129 montre, dans un plan méridien (l'axe du pilier est la ligne verticale de gauche), la déformée du maillage après creusement (la forme initiale est en tirets en magenta). Elle fait apparaître une flexion du banc de gypse constituant le plancher de la carrière, qui s'enfonce sous le pilier et se soulève tout autour.

Après une phase de « vieillissement » du gypse, par dégradation de ses propriétés mécaniques, la figure 130 montre des zones plastiques dans le plancher de gypse, qui se concentrent au droit de la face du pilier (cisaillement) et en surface au centre de la galerie (traction liée à la flexion).



Figure 129  
Déformée du maillage dans un pilier (CESAR-LCPC)

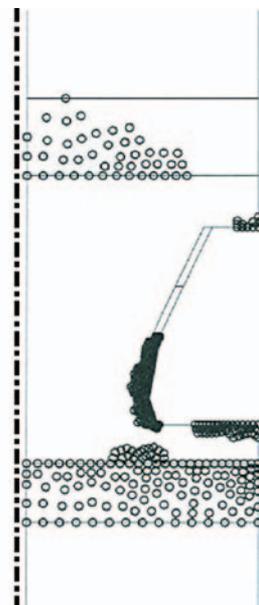


Figure 130  
Points plastiques localisés dans le pilier (CESAR-LCPC)

### 1.5 L'interprétation du suivi d'un site

Le suivi de l'évolution d'un site peut aller d'une démarche simple basée sur des visites régulières jusqu'à une instrumentation à demeure permettant d'acquérir des données en continu. Les deux options présentent des avantages et des inconvénients :

- les visites régulières permettent d'appréhender la pluralité des mécanismes visibles de dégradation possibles mais elles sont soumises à l'expérience propre de l'opérateur ainsi qu'au changement éventuel de celui-ci ;
- l'instrumentation permet une quantification fine mais reste limitée aux mécanismes pré-identifiés et au caractère ponctuel des mesures réalisées.

Dans le premier cas, le suivi sera assorti de prises de mesures diverses dans l'objectif de quantifier l'évolution des désordres prévisibles. Il pourra notamment s'agir :

- d'un relevé de fissuromètres équipant les fractures sensibles ;
- de la comparaison détaillée de photographies ;
- d'une description et d'une estimation des volumes de blocs tombés entre deux visites marqués à la peinture ou sur une bâche préalablement étendue ;
- etc.

L'évolutivité des mécanismes prévisibles peut être mise en évidence en reportant les mesures effectuées en fonction du temps. On raisonnera alors sur des tendances plus que sur l'atteinte de « seuils » chiffrés.

Pour les sites équipés d'une instrumentation à demeure (mesures de convergence, inclinomètres, suivi topographique de surface, etc.), les données sont acquises en continu et peuvent permettre de définir des vitesses d'évolution des mécanismes de dégradation.

Schématiquement, on notera deux types d'évolution des dégradations :

- une accélération des vitesses traduisant une évolution vers la ruine ;
- une décélération des vitesses traduisant une stabilisation temporaire de la zone instrumentée.

À titre d'exemple, on citera les seuils de vitesse de convergence entre le mur et le toit adoptés pour des carrières de craie de la région nord par l'INERIS, à la suite d'un retour d'expérience de plusieurs années d'instrumentation :

- pour  $v < 0,1$  mm/an, aucune évolution n'est prise en compte ;
- pour  $v > 0,3$  mm/an, une évolution vers la ruine est prévisible.

À une autre échelle et dans un autre contexte, l'interprétation de résultats d'essais de fluage (fig.131) sur des matériaux gypseux montre une cinétique d'évolution similaire, la rupture de l'éprouvette (quand elle est obtenue) étant précédée par une accélération préalable du fluage.

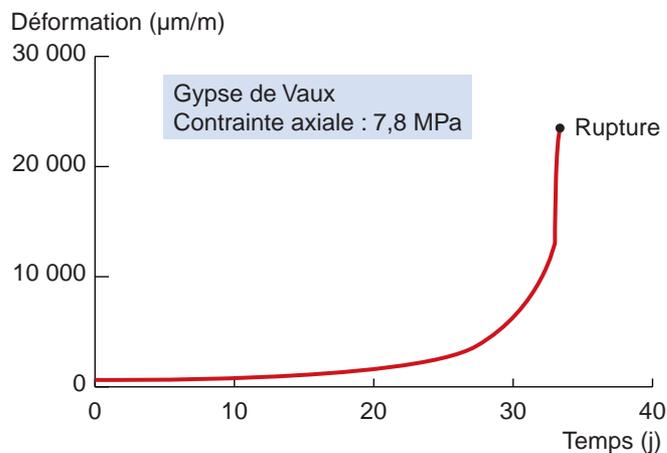


Figure 131  
Courbe de fluage d'une éprouvette de gypse ludien de la région parisienne  
(rupture au bout de 33 jours - contrainte axiale 7,8 MPa)  
(LCPC-INERIS, 2002)

## 2. Exemples d'application

À titre d'exemple, plusieurs diagnostics sont présentés dans ce chapitre permettant d'illustrer les principes établis aux chapitres 3, 4 et 5.

### 2.1 Exemple de diagnostic d'urgence : intervention à la suite d'un effondrement à Mayet (Sarthe)

#### • Contexte du diagnostic

L'intervention à Mayet fait suite à un fontis, survenu en bordure d'une voie communale, dans le jardin d'un particulier (fig.132a). L'effondrement ponctuel date de fin avril 2005, aucun signe précurseur n'a été noté avant sa survenance, les précipitations n'ont pas été plus importantes qu'à la normale. Des fractures concentriques sont visibles sur la voie communale et dans le jardin du riverain (fig. 132b).



Figures 132 a et b  
Vues du fontis selon deux angles

Après élimination d'autres causes d'effondrement possibles (réseaux enterrés par exemple), la présence de carrières souterraines abandonnées (creusées dans des formations du Turonien) est mise en évidence au droit de cette zone dont l'urbanisation est relativement récente (certaines maisons individuelles étaient en construction en 2005).

Le maire de la commune souhaite un avis concernant la voirie communale et la parcelle privée. L'intervention réalisée est un **diagnostic d'urgence**.

#### • Données utilisées

Les données utilisées sont les suivantes :

- données géologiques et hydrogéologiques : étude de la carte géologique d'Ecommoy au 1/50 000 ;
- données historiques : interrogation du maire et des riverains, consultation des archives du CETE d'Angers ;
- données cartographiques : étude de la carte topographique de l'IGN (Scan 25), examen du cadastre de la commune.

#### • Reconnaissances réalisées

- La carrière étant partiellement accessible, deux visites de terrain ont été réalisées. Elles ont permis :
- de définir l'environnement de surface de la carrière, de vérifier les données bibliographiques concernant la géologie et l'hydrogéologie du site ;
  - de relever une géométrie approximative des vides : levé à la boussole et au lasermètre ;
  - de faire un relevé des désordres de surface (fig.133) et un relevé sommaire des désordres en carrière (pour sa partie visitable) par examen visuel (fig.134).

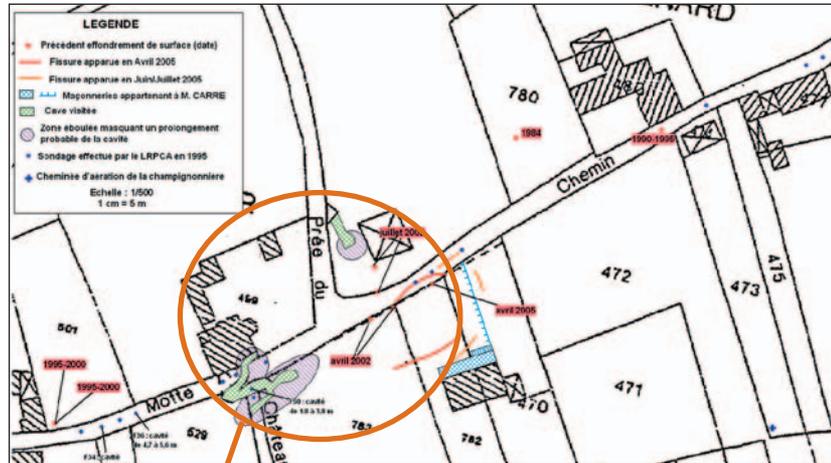


Figure 133  
Relevé des désordres en surface

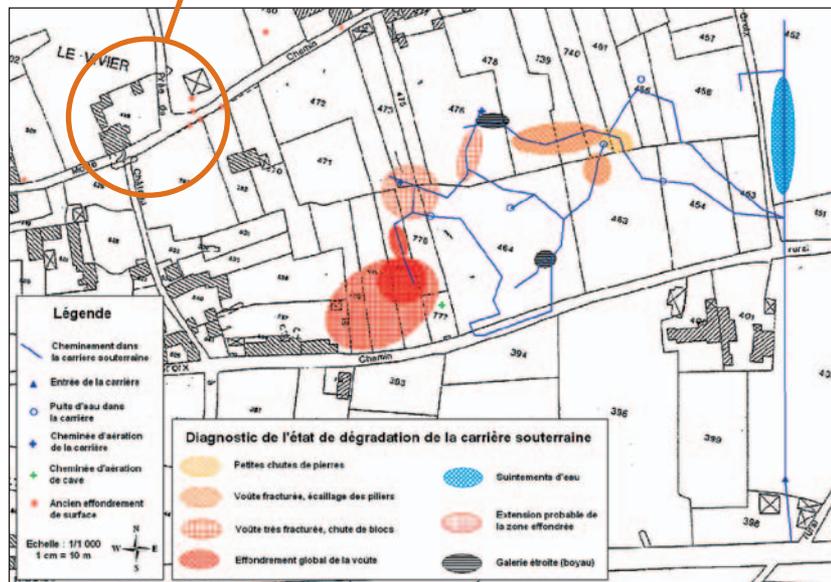


Figure 134  
Relevé des désordres en carrière dans la zone accessible

• **Réalisation du diagnostic**

Le périmètre d'étude considéré est la voirie communale au droit de l'effondrement ainsi que la parcelle privée attenante. Les informations collectées en carrière n'ont pas permis de caractériser l'aléa au droit du périmètre d'étude (la zone étant très dangereuse d'accès).

Toutefois, l'observation des désordres dans la carrière indique que celle-ci est en très mauvais état général à mesure que l'on approche du périmètre d'étude (fléchissement et chutes du toit, écaillage et cisaillement des piliers, etc.). Au droit de la zone effondrée, la carrière est totalement inaccessible.

Le périmètre d'étude est donc soumis à des phénomènes de fontis identiques à celui déjà produit. Les impacts sur la voirie et les constructions peuvent être importants.

• **Conclusions du diagnostic**

Les conclusions du diagnostic ont consisté en :

- une confirmation de l'arrêté municipal d'interdiction de circuler sur la voie communale et d'évacuation du riverain ;
- des préconisations d'études complémentaires.

## 2.2 Exemple de diagnostic de niveau 1 : zonage de l'aléa « cavité » dans le cadre d'un plan de prévention des risques « mouvement de terrain multi-aléa »

### • Contexte de l'étude

Il s'agit d'un plan de prévention des risques naturels « mouvements de terrain » (aléas « cavités et coteau ») établi sur la commune de Parcé-sur-Sarthe (Sarthe). Les études techniques ont été menées de 2008 à 2011.

Le secteur d'étude est constitué par une falaise calcaire du Bajocien de quelques mètres de hauteur, dans laquelle des cavités à usage de dépendances (5 à 10 mètres d'extension) ont été creusées. Il s'agit d'un coteau sous-cavé (fig.135), présentant des instabilités liées à l'évolution de ce coteau et concernant une trentaine de cavités.

La cartographie de l'aléa « cavités » a nécessité de réaliser un **diagnostic de niveau 1**.



Figure 135  
Vue du coteau et des entrées de cavités

### • Données utilisées

Les données utilisées pour ce diagnostic ont été les suivantes (environ trois semaines de collecte et analyse) :

- Données géologiques et hydrogéologiques : étude de la carte géologique La Flèche au 1/50000 (BRGM) ;
- Données historiques : archives départementales et communales, arrêtés de catastrophe naturelle (CatNat), rapports CETE d'Angers, BRGM et bureaux d'études, enquêtes orales auprès des propriétaires des cavités ;
- Données cartographiques : étude de la carte topographique IGN (Scan 25) et des cadastres anciens et récents, avec report des entrées et des enveloppes des caves ;
- Photographies aériennes : étude stéréoscopique et multi-dates de photographies verticales IGN.

### • Reconnaissances réalisées

Les reconnaissances suivantes ont nécessité environ deux semaines de levé de terrain :

- environnement des cavités, facteurs aggravants (climatiques, anthropiques, etc.), géologie-hydrogéologie : examen visuel ;
- géométrie des cavités : levés topographiques à la boussole + lasermètre (précision métrique) ;
- relevé des désordres dans la cavité et en surface : examen visuel + description des désordres.

### • Réalisation du diagnostic

Chaque cavité accessible a fait l'objet lors de la reconnaissance d'un diagnostic établi par un géologue et comprenant les éléments suivants :

- localisation précise et schéma de la cave et de son environnement (report sur plan cadastral) ;
- relevé et caractérisation des instabilités visibles et des phénomènes avérés actuels et anciens ;
- détermination de l'intensité et de l'occurrence des phénomènes potentiels et de l'aléa résultant ;
- calcul d'une zone de recul et d'une marge de sécurité ;
- estimation sommaire du type de confortement ou de traitement à envisager (le cas échéant).

Toutes ces informations ont été reportées sur une fiche de visite établie pour chaque cavité (fig.136).

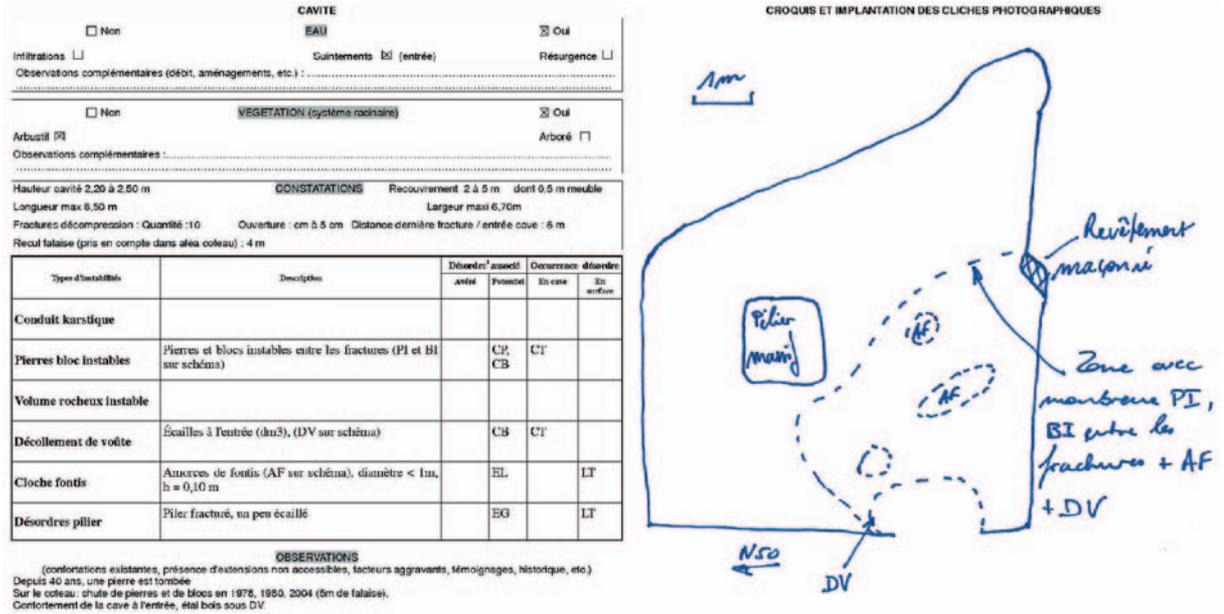


Figure 136  
Extrait d'une fiche de visite de cavité : description des désordres à gauche et schéma de la cavité

• **Utilisation du diagnostic dans le cadre de l'étude**

Les diagnostics réalisés ont été utilisés pour réaliser les cartographies des zonages de l'aléa « cavités ». Une fois les phénomènes potentiels déterminés pour chaque cave, ceux-ci ont été affectés d'une occurrence et d'une intensité.

Pour l'occurrence, trois niveaux ont été distingués :

- **O1** : occurrence probable faible - événement à long terme (LT ≥ 100 ans) ;
- **O2** : occurrence probable moyenne - événement à moyen terme (MT quelques décennies) ;
- **O3** : occurrence probable forte - événement à court terme (CT quelques années).

Pour l'intensité, trois niveaux ont été également distingués :

- **I1** : intensité faible - cave sans signe d'instabilité ou signes localisés d'instabilité d'ampleur très réduite (quelques pierres instables, fissure peu active...), avec parade à l'échelle de la parcelle ;
- **I2** : intensité moyenne - cave avec signes d'instabilité de petite ampleur (fissures actives, blocs et pierres instables, etc., volumes concernés inférieurs au m<sup>3</sup>), avec parade à l'échelle de la parcelle ;
- **I3** : intensité forte - cave avec signes d'instabilité révélant un potentiel de destruction partielle ou totale de la cavité (gros blocs découpés par des fractures actives, fontis développé ou sortant, etc., volumes concernés compris entre quelques m<sup>3</sup> et quelques centaines de m<sup>3</sup>), avec parade à l'échelle de quelques parcelles.

L'aléa résultant a été déterminé en combinant l'intensité et l'occurrence (fig.137), puis la zone de recul et la marge de sécurité ont été calculées pour chaque cave, selon le principe suivant :

		Intensité		
		I3 (fort)	I2 (moyen)	I1 (faible)
Occurrence	O3 (CT)	Aléa très fort	Aléa moyen	Aléa faible
	O2 (MT)	Aléa fort	Aléa moyen	Aléa faible
	O1 (LT)	Aléa fort	Aléa faible	Aléa faible

Figure 137  
Matrice d'évaluation de l'aléa résultant (pour le site étudié)

La zone de recul  $r$  (figure 138) prend en compte l'angle de montée de la cloche de fontis au sein du massif calcaire et des terrains de recouvrement. Elle est définie par la formule suivante :  $r = (h + H) \tan(\alpha)$  avec :

$h$  hauteur de la cavité (en mètre) ;

$L$  largeur de la cavité (en mètre) ;

$H$  épaisseur de recouvrement (rocheux + meuble) au-dessus de la cavité (en mètre) ;

$\alpha$  pente naturelle du matériau éboulé, fixé dans le contexte géologique présent (formation rocheuse de hauteur largement supérieure à la formation meuble) à 30 degrés.

La marge de sécurité  $m$  tient compte de l'incertitude sur la valeur. Elle a été fixée à 10 % de  $\tan(\alpha)$  soit :  $m = 0,1 r$

Enfin, le zonage de chaque cave, intégrant son extension, sa zone de recul et sa marge de sécurité, a été cartographié sur fond cadastral (fig.139), puis superposé au zonage de l'aléa coteau (environ deux semaines de travail pour l'aléa « cavité » uniquement). La figure 139 montre un extrait de ce zonage des aléas (cavités et coteau).

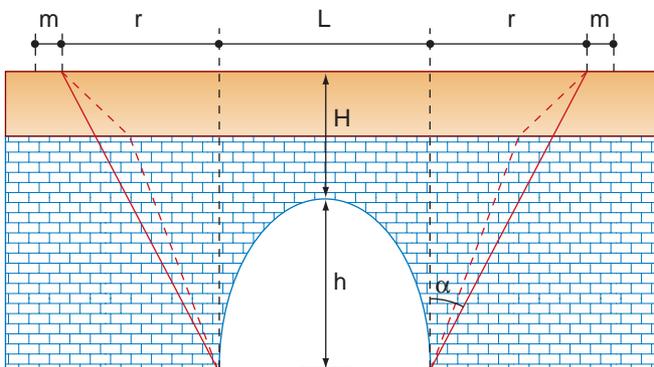


Figure 138  
Schéma explicatif pour la détermination spatiale des zones soumises à l'aléa cavité

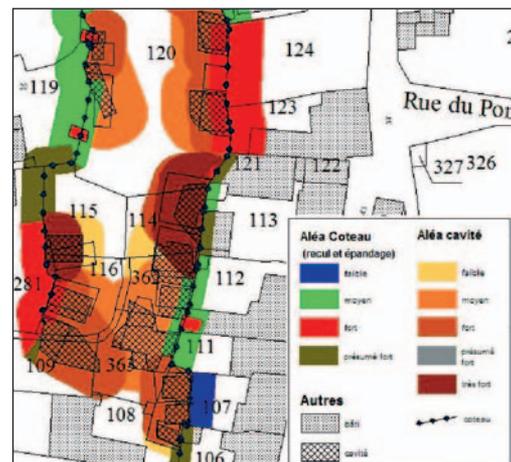


Figure 139  
Extrait du zonage des aléas coteau et cavités (PPR de Parc-sur-Sarthe)

### 2.3 Exemple de diagnostic de niveau 2 : étude de stabilité et préconisation de confortement

#### • Contexte de l'étude

L'étude a été engagée suite une dégradation d'une partie d'une carrière souterraine de gypse ayant entraîné l'apparition d'un fontis en 2005 (fig.140).



Figure 140  
Vue du fontis survenu en 2005

La carrière correspond à une ancienne exploitation de gypse ludien (étage bartonien) aménagée sous le versant de la butte de Montmorency (Val-d'Oise). L'exploitation a été menée sur un schéma de chambres et piliers. Les galeries ont des hauteurs comprises entre 3 et 8 mètres, sous une couverture variant entre 11 et 25 mètres d'épaisseur. Le taux de défrètement moyen est d'environ 80 %. L'analyse de la stabilité de la carrière et la priorisation des actions de confortement ont été établies à l'aide d'un **diagnostic de niveau 2**.

• **Données utilisées**

Le diagnostic, qui a nécessité 6 mois d'étude, s'est appuyé sur les données bibliographiques existantes et notamment :

- les descriptions géologiques générales du site (carte géologiques et sondages proches) ;
- les études antérieures et notamment les analyses lithologiques et coupes géologiques du mur de la carrière ;
- les essais pétrographiques et de caractérisation mécanique de la masse de gypse.

• **Reconnaisances réalisées**

En complément, les investigations ont visé à préciser la géologie des terrains de couverture, la géométrie fine de la carrière et les signes de dégradation. Elles ont comporté :

- un sondage carotté de l'ensemble des terrains de couverture (figure 141) ;
- un relevé topographique de la carrière à 1/500 intégrant les ouvrages de soutènement préexistants ;
- un relevé systématique des désordres en carrière et en surface : examen visuel + description des désordres.

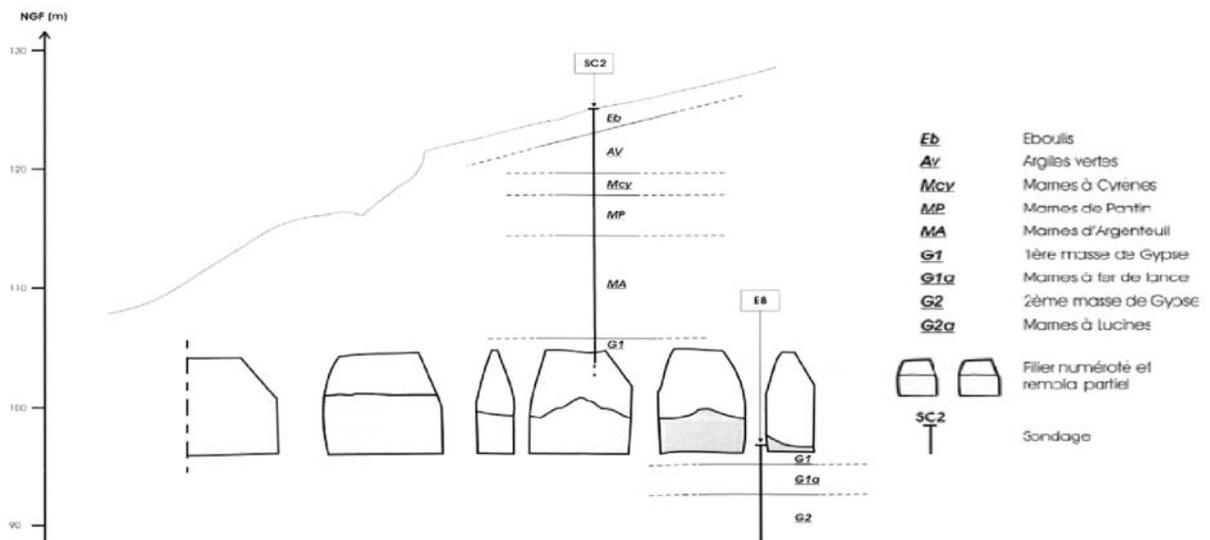


Figure 141  
Profil géologique validé par les sondages

• **Réalisation du diagnostic**

Le diagnostic a été établi en croisant l'analyse visuelle des désordres (approche naturaliste - fig. 142) et une quantification de la probabilité des mécanismes de rupture (calculs analytiques - tableau 5). La probabilité de venue au jour d'un fontis a été calculée, pour les différentes parties de la carrière, à l'aide d'une approche géométrique dont les paramètres ont été rétrocalés relativement au fontis observé.

Tableau 5  
Estimation de la hauteur de monté d'une cloche de fontis (S) selon le modèle de Vachat

Position	<b>h</b> Hauteur de la galerie	<b>R</b> Rayon de la cloche de fontis	<b>H</b> Épaisseur du recouvrement	<b>S</b> Hauteur de montée de fontis
Fontis existant (tennis)	3 m	4 m	≈ 11 m	≈ 22 m
Zone 1	6 m	7 m	≈ 24 m	≈ 47 m
Zone 2	7 m	6 m	≈ 24 m	≈ 66 m
Zone 3	8,3 m	6 m	≈ 20 m	≈ 87 m

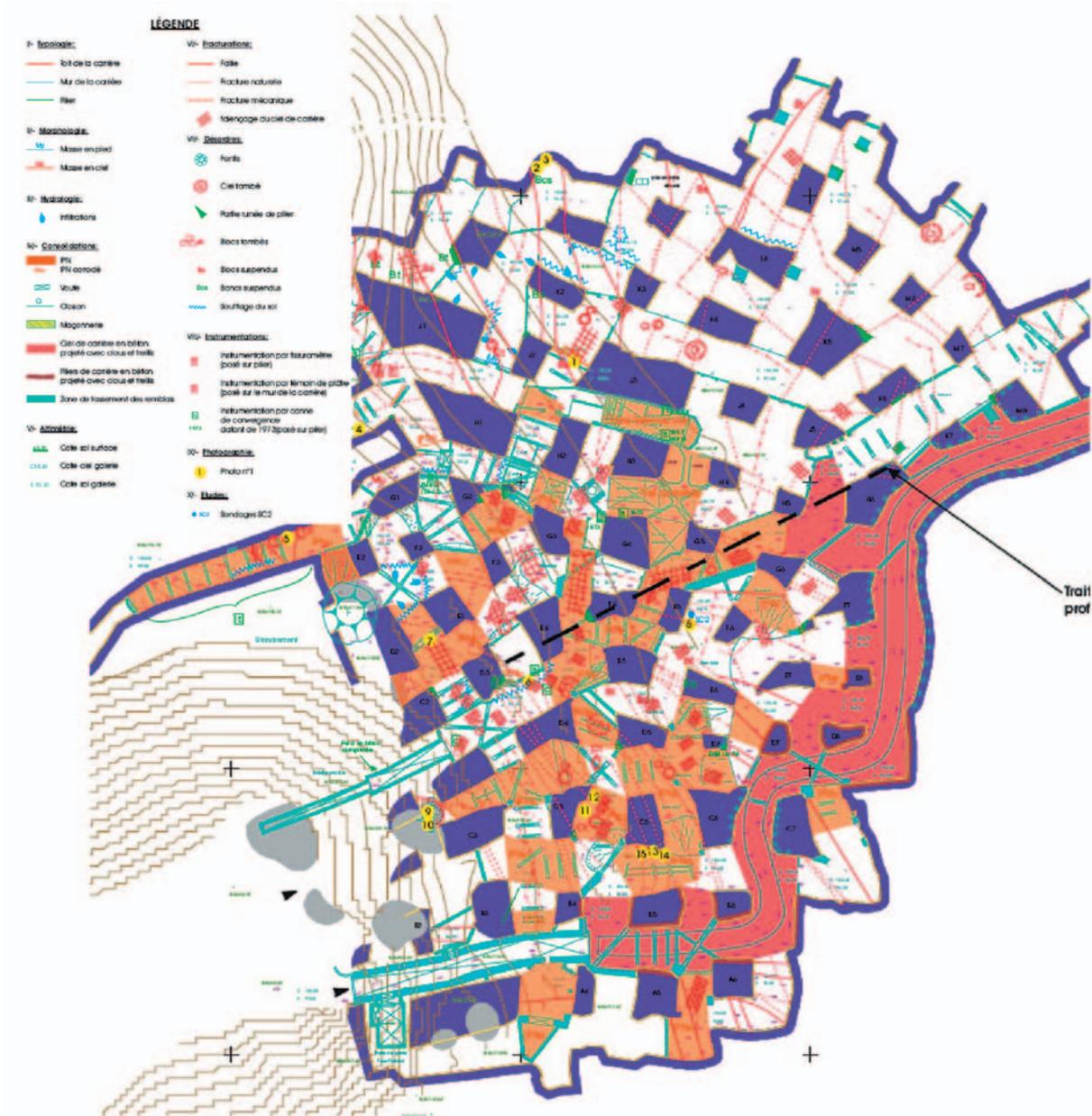


Figure 142  
Relevé des désordres en carrière et en surface

Le calcul montrant qu'en tout point de la carrière les vides peuvent atteindre la surface, les secteurs les plus sensibles ont donc été déterminés en calculant la stabilité mécanique des différentes parties (toit, pilier et mur) et en prenant en considération les indices de dégradation relevés au fond.

Ainsi, la portée maximale admissible du toit a été calculée à l'aide du modèle analytique d'une plaque en flexion décrit au paragraphe 1.3 (modèles locaux de toit). Il ressort du calcul que sous son poids propre, la dalle de toit non fissurée, devrait être stable jusqu'à des portées de 15 mètres.

Compte tenu de la portée entre appuis de la carrière, il a été considéré une voûte de décharge qui s'ajoute au poids propre de la dalle de toit. En conséquence, les portées maximales ont été estimées à environ 7 mètres.

• **Utilisation du diagnostic dans le cadre de l'étude**

Le diagnostic réalisé a été utilisé pour proposer une stratégie de travaux visant à assurer la stabilité de l'ouvrage dans le temps. À proximité du versant, le relevé systématique des désordres a conduit à retenir une zone devant être traitée. Vers l'intérieur du massif où peu d'indices de dégradations ont été observés, les approches analytiques ont permis de cerner les géométries les plus défavorables nécessitant une action ponctuelle (fig. 143).



Figure 143  
Conclusions techniques de l'étude (préconisation de travaux par zone)

## Annexe

# Exemples de calculs numériques

## Modélisation globale

**Exemple\*** : Mise en évidence d'un angle d'influence  $\alpha$  d'une carrière souterraine

Le calcul par éléments finis est réalisé à l'aide de CESAR-LCPC. Le maillage représente une portion de terrain, de surface horizontale, contenant la moitié de la carrière, compte tenu de la symétrie du problème. Le modèle est large de 440 mètres (880 mètres au total, compte tenu de la symétrie) et haut de 307 mètres. Il comprend 8633 nœuds et 2806 éléments. La carrière a une extension  $Q$  de 100 mètres (la largeur du modèle est donc de 50 mètres). L'épaisseur des terrains de recouvrement est  $H = 30$  mètres.

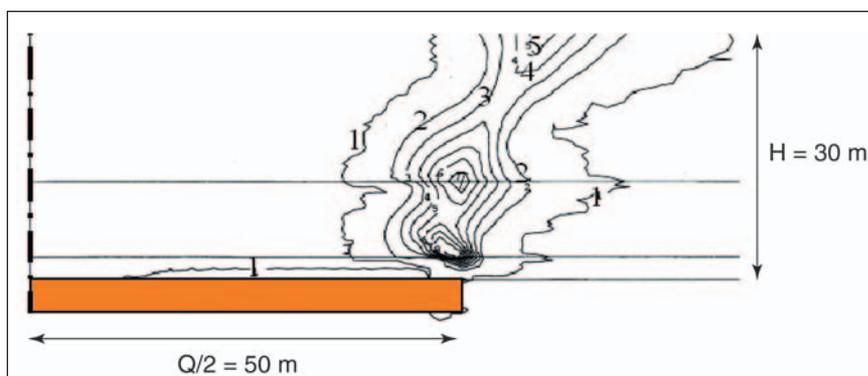
Pour simuler l'état après exploitation et les conséquences d'une défaillance des piliers, la zone de la carrière se voit attribuer des caractéristiques élastiques dégradées qui tiennent compte du taux de défrusement et d'un endommagement des piliers :  $E_{\infty} = 25$  MPa et  $\nu_{\infty} = 0,1$ . Les terrains sus-jacents ont un comportement élasto-plastique associé, avec un critère de Mohr-Coulomb.

Les calculs ont été conduits de façon à simuler le creusement, par la technique dite de l'effet différé :

- un premier calcul est réalisé dans le massif vierge, la future zone excavée étant pourvue des caractéristiques de la couche environnante : le résultat représente l'état initial avant creusement ;

- un deuxième calcul est ensuite réalisé, dans lequel des caractéristiques élastiques réduites sont affectées à la zone exploitée.

La figure suivante présente les courbes d'égale déformation plastique au sein des terrains de couverture. On peut observer l'amorce d'une rupture partant du front de masse de la carrière vers la surface, préfigurant un effondrement généralisé, et, corrélativement, la faible sollicitation du toit sur l'axe de symétrie, qui reste dans le domaine élastique.



Courbes d'égale déformation plastique dans l'encaissant

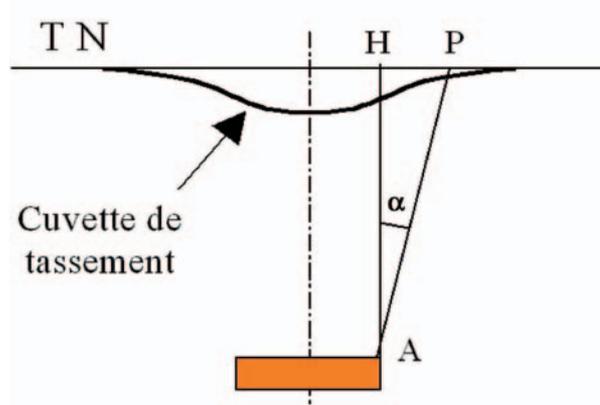
Courbe 1 :  $3,2 \cdot 10^{-6}$  m

Courbe 7 :  $2,1 \cdot 10^{-3}$  m

Modèle avec zone exploitée « homogénéisée » (en couleur). Axe de symétrie vertical à gauche.  
(CESAR-LCPC)

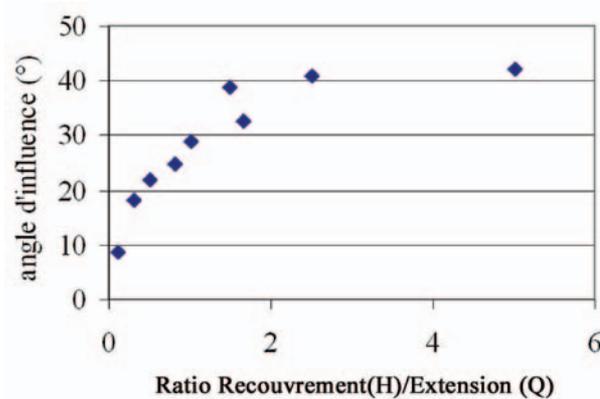
\* Tritsch J.-J., Durville J.-L., Pothérat P. (2004). Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines : un guide technique. C.R. des Journées nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur, Lille (28-30 juin), pp. 493-502.

Quand on fait varier les paramètres H et Q de ce modèle, on observe des comportements qui dépendent en première approximation du rapport H/Q, mais aussi des caractéristiques des terrains de recouvrement et de la raideur moyenne de la zone exploitée. Les déformations au-dessus de la carrière sont très dépendantes de la configuration géométrique. A titre d'exemple, définissons conventionnellement l'angle d'influence de la façon suivante : si P est le point où le tassement est égal à 10 % du tassement maximal (au centre de la cuvette),  $\alpha$  est l'angle (AH, AP).



Définition de l'angle d'influence  $\alpha$ .

Le graphique de la figure suivante donne les valeurs de l'angle  $\alpha$  pour quelques configurations étudiées. On constate que l'angle  $\alpha$  atteint 40 - 42° lorsque le rapport H/Q dépasse 2, c'est-à-dire dans le cas de carrière profonde et/ou peu étendue, et qu'il décroît jusque vers 10° lorsque H/Q diminue. Ces valeurs n'ont cependant pas de caractère général, puisqu'elles dépendent des caractéristiques mécaniques du recouvrement.



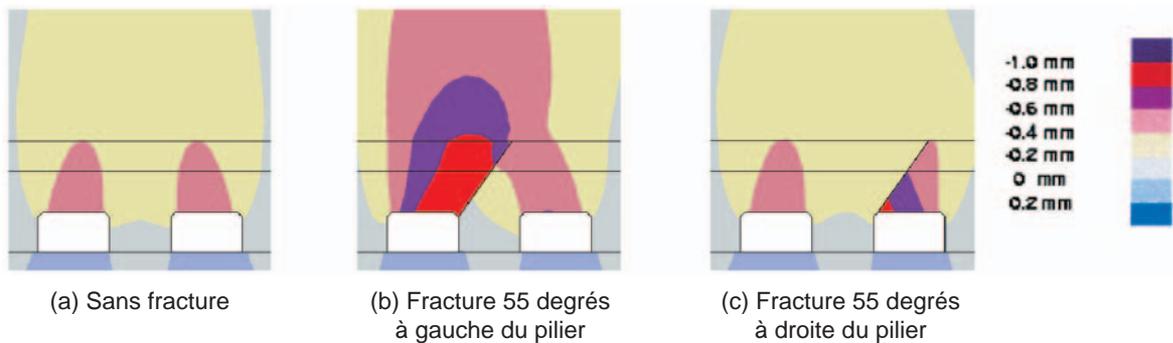
Variation de l'angle d'influence avec le rapport H/Q

## Modélisation locale

**Exemple 1 :** position d'une discontinuité au toit d'une carrière souterraine

La modélisation locale suivante a été réalisée grâce au logiciel UDEC selon la méthode des éléments distincts. Elle concerne deux galeries de 7 mètres de large, situées à 24 mètres de profondeur. L'impact de la présence d'une fracturation orientée à 55° dans le toit de celles-ci est étudié. Trois cas de figure sont considérés :

- un cas initial (fig. a) dans lequel aucune discontinuité n'est reportée. Le calcul montre alors que les vides entraînent une faible déformation des terrains situés juste au-dessus de la voûte (de l'ordre de 0,4 mm) et un léger gonflement du mur des galeries.
- Un cas où la discontinuité se situe dans la galerie de gauche (fig. b). Le calcul montre alors une perturbation des déformations du recouvrement jusqu'à la surface. Plus précisément, le toit de la galerie de gauche se déforme de 0,8 mm et la cavité de droite est également touchée par les déformations. Cette configuration peut aboutir à une rupture du toit et au développement d'une cloche de fontis accompagné d'un éventuel tassement de surface.
- Dans le dernier cas, la discontinuité se situe dans la galerie de droite (fig c). Le calcul montre une perturbation des déformations dans la galerie de droite par rapport au cas a. Cette perturbation n'est pas aussi importante que dans le cas b mais peut générer une chute ponctuelle du toit de la galerie sans affecter la surface dans un premier temps.

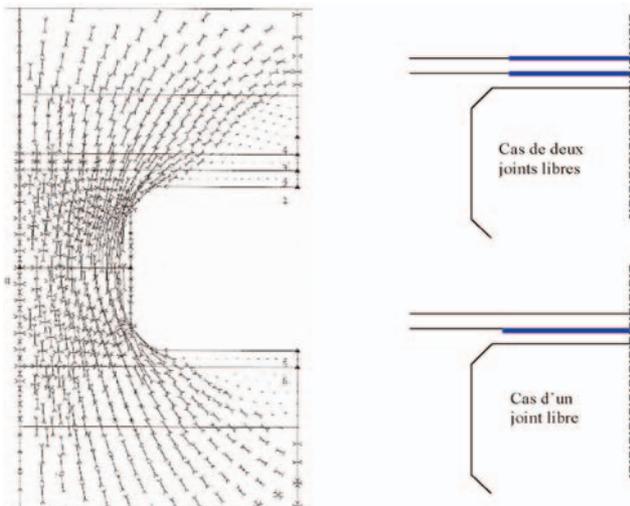


Relevés des déformations verticales des trois modèles locaux réalisés à l'aide du Code UDEC

**Exemple 2** : mise en évidence de l'effet de voûte au toit d'une carrière

La modélisation suivante met en évidence l'effet de voûte par un calcul aux éléments finis (Logiciel CESAR-LCPC). La figure montre que le creusement de la galerie induit une redistribution des contraintes à son voisinage ; en particulier, la contrainte verticale au toit, supposé horizontal, est nulle. Ceci induit une faible sollicitation des bancs du bas-toit, bénéficiant d'un effet de voûte au-dessus de la galerie et non chargés par les bancs qui les surmontent.

On explique ainsi l'efficacité de piliers à bras de faible résistance, qui suffisent à bloquer le processus de décollement-chute. La flexion des bancs de toit est donc principalement liée au poids propre de ces bancs. Le décollement de bancs que l'on observe fréquemment exprime cette absence de chargement vertical ; il est lié à la résistance quasi-nulle des joints à la traction.



Calcul par éléments finis représentant sur un modèle à 1/2 pilier et 1/2 galerie d'une hauteur de 3 mètres, les répartitions des contraintes principales autour d'une galerie (à gauche) et des points décollés le long des joints délimitant les bancs de toit (à droite) (CESAR LCPC)

## Modélisation d'un élément

### Exemple 1 : soufflage du mur d'une carrière de gypse

Le premier modèle montre un début de soufflage dans un pilier de forme axisymétrique (simulation tri-dimensionnelle) ; sa hauteur est de 7,6 mètres. La figure a montre, dans un plan méridien (l'axe du pilier est à gauche), la déformée du maillage après creusement (la forme initiale est en tiretés en magenta) : elle fait apparaître une flexion du banc de gypse constituant le plancher de la carrière, qui s'enfonce sous le pilier et se soulève tout autour.

Après une phase de « vieillissement » du gypse, par dégradation de ses propriétés mécaniques, la figure b montre les zones plastiques dans ce plancher de gypse, qui se concentrent au droit de la face du pilier (cisaillement) et en surface au centre de la galerie (traction liée à la flexion) ; les marnes sous-jacentes sont largement plastifiées, mais leur déformation est encore contenue ; par ailleurs, le pilier montre des points plastiques en surface dans sa partie inférieure (écaillage).

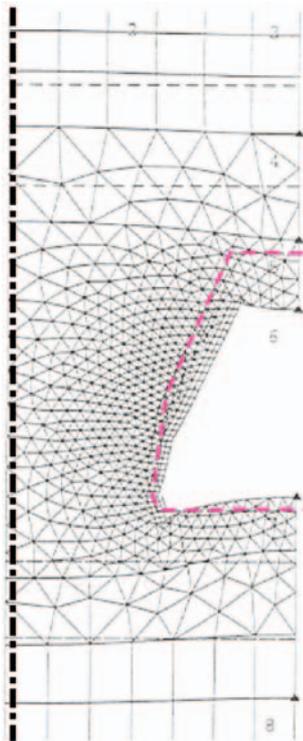


Figure a  
Déformée du maillage  
(CESAR LCPC)

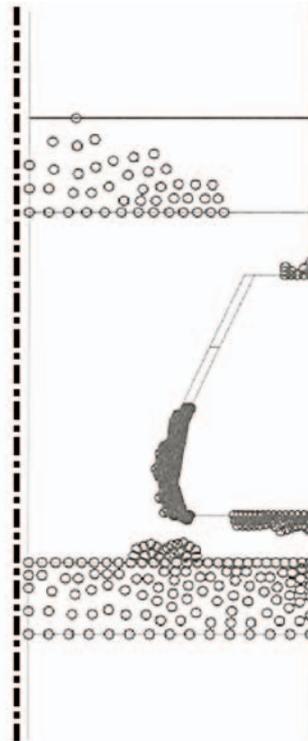


Figure b  
Points plastiques  
(CESAR LCPC)

**Exemple 2** : soufflage du mur d'une carrière de gypse - influence de l'épaisseur du mur

Dans un second exemple, une galerie trapézoïdale, haute de 17 mètres, est représentée en 2D. La configuration géologique est la même que précédemment. Le rôle de l'épaisseur du mur (la planche de gypse) est mis en évidence dans les figures c et d qui représentent la partie basse d'un demi-pilier et d'une demi-galerie avec les courbes d'égale déformation plastique dans le gypse :

- planche épaisse (2 mètres) : flexion n'atteignant pas la rupture (enfoncement du pilier : 0,19 mètre) ;
- cas d'une planche mince (1 mètre) : amorce de poinçonnement par cisaillement au droit de la face du pilier (enfoncement du pilier : 0,28 mètre), et corrélativement décharge au centre de la galerie.

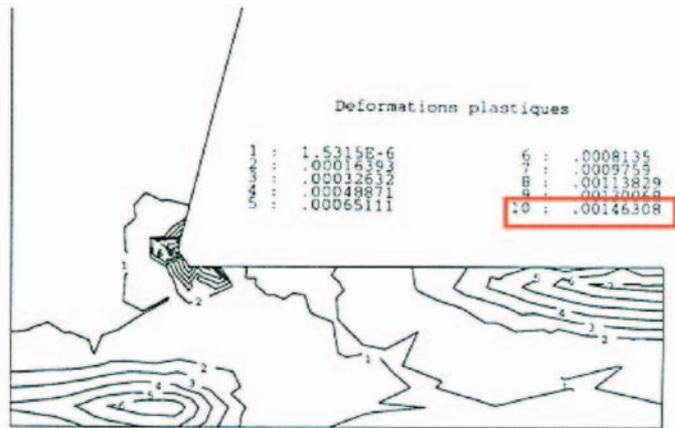


Figure c  
Cas de la planche épaisse  
(CESAR LCPC)

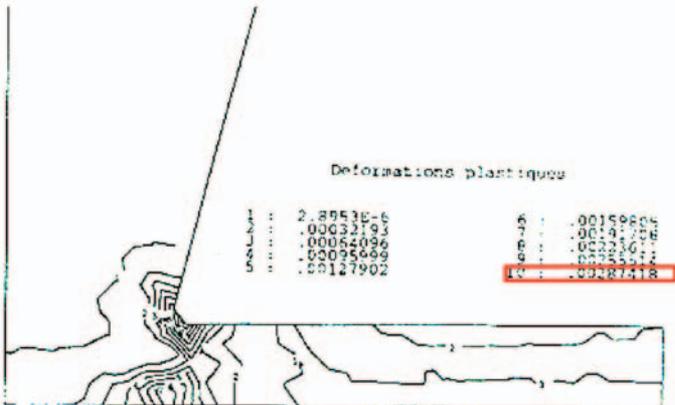


Figure d  
Cas de la planche mince  
(CESAR LCPC)



# Références bibliographiques

**AFNOR** (2000). NF P94-420 : Roches - Détermination de la résistance à la compression uniaxiale.

**AFNOR** (2001). NF P94-422 : Roches - Détermination de la résistance à la traction - Méthode indirecte - Essai brésilien

**AFNOR** (2007). NF EN 12372 : Méthodes d'essai pour pierres naturelles - Détermination de la résistance à la flexion sous charge centrée.

**AFNOR** (2007). NF EN 1997-2 : Eurocode 7 : calcul géotechnique - Partie 2 : reconnaissance des terrains et essais. Indice de classement : P94-252.

**AGAP** (1992). Code de bonne pratique en géophysique appliquée - 75 fiches et guide d'application. AGAP Qualité.

**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.

Document des ardoisières de Rimogne (08).

**FAUCHARD C., POTHERAT P.** (2004). Détection de cavités souterraines par méthodes géophysiques. Projet National CriTerre, Co-édition LCPC. 170 pages.

**GOULET J., BOUTIN J.-P.** (1996), Résistance des matériaux, [7e éd.]. Paris. Dunod. 263 pages. [coll. Aide-mémoire de].

**INERIS - LCPC** (2005). Évaluation et gestion des risques liés aux carrières souterraines abandonnées. Séminaire de restitution et de valorisation des travaux INERIS - Réseau des LPC. Actes des journées scientifiques du LCPC. ENPC, Paris, 11 mai 2005. 303 pages

**INERIS** (2007). Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : surveillance, traitement. Guide technique. 151 pages.

**Inspection générale des carrières** (2003). Injection gravitaire, clavage et traitement des fontis, préalables à la mise en œuvre de fondations profondes de type pieux ou micropieux de type supérieur ou égal à II, en zone sous-minée par d'anciennes carrières souterraines ou à ciel ouvert. 13 pages.

**Inspection générale des carrières** (2004). Travaux de consolidations souterraines exécutées par piliers maçonnés dans les carrières de calcaire grossier situées en région parisienne. 23 pages.

**LCPC** (1999). Utilisation de la photo-interprétation dans l'établissement des plans de prévention des risques liés aux mouvements de terrain. Guide technique. 132 pages.

**LCPC** (2002). Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines. Guide technique, Collection Environnement Risques naturels, 130 pages.

**LCPC** (2008). Les marnières de Haute-Normandie, Méthodologie d'étude et de prévention. Guide technique. 112 pages

**LCPC** (2010). Paramètres de forage en géotechnique. Méthode d'Essai n°79. 54 pages.

**LCPC - Scétauroute** (2001). Commande et contrôle des reconnaissances géotechniques de tracés. Guide technique. Collection Techniques et Méthodes des LPC. 147 pages.

**LRPC Blois** Rapport d'étude sur le PPR de la ville de Vendôme.

**LRPC de Lyon** (2003). Carrières souterraines abandonnées : rapport de synthèse. 125 pages.

**MABRUT J.-P., VERDIER J.-P.** (1987). Mineur en argile : contribution à l'étude historique, technique et sociologique de l'extraction de l'argile dans le bassin de Provins-Villenauxe. Provins. Commune libre de la Ville-Haute de Provins. 240 pages.

**MOIRIAT D.** (2001). Evolution des désordres dans les carrières souterraines abandonnées. Thèse, Université Paris XI, UFR scientifique d'Orsay, 393 pages.

**PEGORIER A. et al.** (2006). Les noms de lieux en France. Glossaires de termes dialectaux. Edition IGN, commission de toponymie. 518 pages

**SAFEGE** (1999). Dossier de demande d'autorisation d'exploitation de la carrière de Montmorency de Lafarge. Etude d'impact Lafarge. Rapport d'étude de juin 1999.

**SEISM** documents internes

**TOULHOAT P., GOMBERT P., THORAVAL A., CHARMOILLE A. et al.** (2009). Long term safety issues in geological storage of CO<sub>2</sub>, International Conference Deep saline aquifers for geological storage of CO<sub>2</sub> and energy (Rencontres scientifiques de l'IFP), Rueil-Malmaison, France.

**TRITSCH J.-J., DURVILLE J.-L., POTERAT P.** (2004). Évaluation des aléas liés aux cavités souterraines : un guide technique. C.R. des Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Lille (28-20 juin). pp.493-502.

**VACHAT J.-C.** (1982). Les désordres survenant dans les carrières de la région parisienne : étude théorique et pratique de l'évolution des fontis. Mémoire de diplôme d'ingénieur : Géologie. CNAM Paris. 276 pages.

# Lexique

## **Aérage**

Ventilation des carrières par circulation libre ou forcée de l'air grâce un dispositif d'aération.

## **Aération**

Dispositifs mis en place pour réaliser l'aérage (puits, trappes, conduits, ventilateurs...).

## **Affaissement**

Dépression topographique en forme de cuvette consécutive à l'effondrement partiel ou total d'une carrière souterraine.

## **Aléa**

Probabilité d'apparition d'un phénomène naturel d'occurrence et d'intensité données.

## **Banc**

Couche de roche se terminant au-dessus et au-dessous par une séparation lithostratigraphique nette. C'est la plus petite subdivision du terrain. Son épaisseur varie du décimètre à plusieurs mètres.

## **Banc intercalaire** (ou *niveau intercalaire* ou *niveau séparatif*)

Niveau rocheux séparant deux niveaux d'extraction superposés.

## **Bourrage**

Remblai de carrière occultant, partiellement ou non, une galerie. Ce remblai est souvent associé à des hagues.

## **Cale à bras**

Pilier monté manuellement, formé d'un empilement de pierres sèches.

## **Chambre**

Partie excavée dans les creusements souterrains : la forme et les dimensions varient selon les types d'exploitation et la nature du massif encaissant.

## **Ciel**

Banc rocheux visible laissé en toit de la carrière et formant son plafond.

## **Compétence**

Aptitude d'une roche qui, dans des conditions données, est plus apte à se rompre qu'à se déformer.

## **Coteau**

Escarpement rocheux (ou petite falaise) de hauteur variable correspondant généralement à une morphologie de type « cuesta ».

## **Décollement de banc**

Flexion du banc situé au toit de la carrière, celui-ci se déplace par gravité et se désolidarise du banc supérieur au niveau du joint de stratification.

## **Décompression**

Phénomène tectonique de redistribution des contraintes à la suite de l'effacement d'un massif (par érosion par exemple). Phénomène répandu en contexte de vallées creusées dans des roches tendres.

## **Dépilage**

Reprise d'extraction d'un pilier de masse, soit en vue d'un foudroyage, soit en vue d'une extraction partielle ou complète, à ciel ouvert, d'une ancienne carrière souterraine.

## **Descenderie**

Accès à une carrière souterraine par un plan incliné creusé depuis la surface.

## **Diaclase**

Fine fracture tectonique du massif rocheux généralement perpendiculaire aux surfaces stratigraphiques et ne présentant pas de déplacement entre les compartiments.

### **Écaillage**

Dégradation d'un pilier ou d'une paroi par éclat ou décollement au niveau de sa face.

### **Effondrement généralisé**

Abaissement topographique se manifestant sous la forme d'un cratère, d'étendue et de profondeur plus ou moins importantes, limité par des fractures nettes de rupture. La zone effondrée peut correspondre soit à une partie de l'exploitation sous-jacente soit à sa totalité.

### **Épaufrure**

Petit écaillage.

### **Étau de masse**

Masse importante non exploitée conservée dans la carrière à des fins de soutènement.

### **Faille**

Fracture naturelle d'origine tectonique qui traverse le massif rocheux, éventuellement en décalant les couches (rejet).

### **Faux-ciel**

Surface stratigraphique observable après un phénomène de ciel tombé.

### **Fissure**

Cassure fine de la roche provoquée par l'extraction présentant parfois un mouvement relatif (rejet).

### **Fontis**

Cratère conique formé en surface par l'effondrement soudain des terrains à l'arrivée au jour d'une cloche de fontis.

### **Foisonnement**

Capacité d'un sol ou d'une roche à augmenter de volume lors du déplacement du matériau (exemple : un effondrement).

### **Foudroyage**

Rupture brutale d'un pilier d'une carrière déclenchée soit par une opération de minage (cas de l'affaissement dirigé) soit par la rupture d'un autre pilier à proximité entraînant une augmentation brutale des contraintes.

### **Fracture mécanique**

Discontinuité rocheuse dont l'origine est liée au creusement de la carrière.

### **Fracture tectonique**

Discontinuité rocheuse dont l'origine est liée à l'histoire tectonique du massif rocheux (ex : failles, fractures de décompression, etc.)

### **Frettage**

Action de ceinturage (ou de blocage latéral) des piliers pour les consolider et prévenir leur éclatement.

### **Front de masse (ou front de taille)**

Limite de l'extension de la carrière constituée par le matériau intact.

### **Galerie**

Voie d'accès ou d'exploitation en souterrain. Les dimensions, très variables, sont déterminées par la hauteur des bancs à extraire, la circulation pour l'évacuation des blocs, la solidité du ciel. Synonymes : « rues ». Les « allées » ou « recoupes » sont perpendiculaires aux rues.

### **Gisement (ou masse)**

Ensemble de la couche rocheuse exploitable.

### **Hague**

Mur en pierres sèches retenant les bourrages.

### **Joint de stratification**

Discontinuité naturelle présente entre deux bancs de roche.

**Karstification**

Phénomène de dissolution naturelle de la roche (calcaire, craie, gypse) par l'eau souterraine provoquant l'apparition de vides. Ces vides sont parfois bouchés par des matériaux de remplissage sablo-argileux selon le contexte géologique.

**Lithologie**

Nature des roches composant une couche donnée.

**Masse (ou gisement)**

Ensemble de la couche rocheuse exploitable. Également appelé gisement.

**Moellon**

Parallélépipède de calcaire taillé dans un bloc extrait.

**Mur**

Partie de la masse rocheuse située sous la carrière.

**Nappe phréatique**

Masse d'eau contenue dans les interstices entre les grains solides du sol (l'aquifère). Elle est généralement accessible par un puits ou un forage

**Pilier tourné**

Pilier constitué par la masse laissée en place par le carrier lors de l'extraction.

**Portée**

Distance comprise entre deux éléments porteurs d'une dalle de voûte (exemple deux piliers).

**Recouvrement**

Ensemble des terrains présents au-dessus d'une carrière jusqu'à la surface.

**Rejet**

Mouvement relatif visible entre deux compartiments d'une discontinuité rocheuse.

**Sonnage**

Action de frapper la roche à l'aide d'un marteau de géologue pour constater une éventuelle résonance. « Sonne creux ».

**Soufflage**

Soulèvement topographique du mur d'une carrière consécutif au poinçonnement des piliers dans le sol du gisement.

**Taux de défrusement**

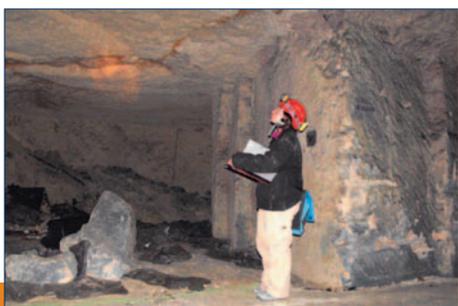
Rapport, pris dans le plan horizontal, de la superficie exploitée sur la superficie totale (exprimé en pourcentage).

**Toit**

Partie de la masse rocheuse située au-dessus de la carrière.







Le risque lié aux cavités souterraines est un risque avéré dans de nombreuses régions de France. Le Plan National Cavité démarré en 2011 a pour objectifs de sensibiliser les acteurs à ces problématiques, souvent ignorées du grand public. Les cavités pouvant évoluer par manque d'entretien ou tout simplement par vieillissement, il est utile de savoir poser un diagnostic sur leur stabilité et leur éventuelle évolution.

Le présent guide propose ainsi aux bureaux d'études, un ensemble de recommandations et de méthodes permettant le diagnostic de stabilité interne des cavités souterraines.

Après les deux premiers chapitres rappelant le vocabulaire ainsi que les descriptions des cavités et leurs mécanismes d'évolution, le chapitre trois décrit en quoi consiste exactement un diagnostic de stabilité (différent d'une étude géotechnique standard) et comment définir son contenu, utile en cas de sous-traitance et de commande. Le quatrième et le cinquième chapitre s'adressent principalement aux techniciens qui établiront un diagnostic de stabilité. Dans le chapitre quatre, les différents éléments nécessaires au diagnostic sont recensés et expliqués. Le chapitre cinq propose enfin des éléments clés permettant l'évaluation de la stabilité. Des exemples de diagnostic menés selon les 4 niveaux d'études (détaillés dans le chap.3) sont illustrés dans ce guide afin d'aider à la bonne prise en main de la méthode.

Dans une certaine mesure, ce guide peut constituer un des éléments permettant de dresser une cartographie d'aléa de surface dans le cadre d'un plan de prévention des risques mais ce n'est pas l'objectif de ce document. Les techniques de traitement de cavité font également l'objet d'autres documents méthodologiques qui compléteront utilement la lecture de ce document.

The risk associated with cavities, especially when it comes from abandoned quarries (very present in urban and peri-urban areas) is a proven risk in many parts of France. The National Plan Cavity started in 2011 in France, aims to raise awareness for these issues, often unknown to the general public. The cavities may change due to lack of maintenance or simply aging, that's why it is important to propose diagnosis of their stability.

This guide offers consultants, a set of recommendations and methods for the diagnosis of internal stability.

After the first two chapters recalling the vocabulary and descriptions of the cavities and their mechanisms of evolution, Chapter Three describes what is a stability diagnosis (which is different from a standard geotechnical study) and how to define its content. This chapter is useful in case of contracting a diagnostic. The fourth and the fifth chapter are primarily intended for technicians who will establish a diagnostic of stability. In Chapter Four, the different elements required for analyses are listed and explained. Chapter Five provides key elements for assessing stability. Examples of diagnostic conducted according to the fourth levels of studies (see Chapter Three) are given in this guide to explain the method.

This guide can be one of the elements that can establish a map for preventing risks, but it is not the purpose of this document. Other guides usefully complete this document for this subject and also when reinforcement or filling of underground cavities are considered.

ISSN 1240-0769

ISBN 978-2-7208-2617-7

Réf. : DIAGCAR

Prix : 36 euros HT



ISO 9001:2008

Système de  
management de la qualité  
certifié sous le n° 22230 - 3  
pour les sites  
de Marne la Vallée,  
Nantes, Satory (LIVIC)  
et Villeneuve d'Ascq