

RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-12-126055-12421A

23/01/2013

**Retours d'expérience de méthodes de
traitement de cavités souterraines –
Principes de diagnostic des constructions
maçonnées en carrière souterraine**

INERIS

*maîtriser le risque |
pour un développement durable |*

Retours d'expérience de traitement de cavités souterraines – Principes de diagnostic des constructions maçonnées en carrière souterraine

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

Liste des personnes ayant participé à l'étude :

Marie-Pierre HANESSE, technicien supérieur à l'Unité Risques Géotechniques liés à l'Exploitation du sous-sol

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

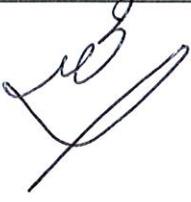
	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	C. LAMBERT et C. DUVAL	J-M. WATELET et M. AL HEIB	M. GHOREYCHI
Qualité	Ingénieurs à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Ingénieurs à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS.....	5
2. TYPES DE CONFORTEMENT MAÇONNE EN CARRIERE SOUTERRAINE.	7
2.1 Soutènement porteur.....	7
2.1.1 Piliers maçonnés	7
2.1.2 Piliers coffrés	9
2.1.3 Empilement de parpaings (cale-à-bras, colonne...).	10
2.2 Maçonnerie reprenant une masse naturelle	10
2.2.1 Confinement de pilier.....	11
2.2.2 Murs.....	12
2.3 Voûtes et piédroits.....	13
3. DEGRADATIONS OBSERVEES.....	15
3.1 Décollement toit - pilier.....	17
3.2 Fissuration.....	17
3.3 Flambement et désaxement.....	18
3.4 Poinçonnement du mur ou du ciel.....	19
3.5 Déformation de la maçonnerie	20
3.6 Ecaillage des parements du confortement	21
3.7 Altération des joints de mortier	21
4. SURVEILLANCE ET SUIVI DES CONFORTEMENTS MAÇONNES	23
5. RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION ET LA CONSTRUCTION DE SOUTÈNEMENT MAÇONNE	25
5.1 Base des prescriptions	25
5.2 Eléments complémentaires	25
5.2.1 Pathologies liées à la conception ou à la construction.....	25
5.2.2 Pathologies liées aux matériaux	27
5.2.3 Pathologies liées à l'environnement du site.....	27
6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	29
7. BIBLIOGRAPHIE	31
8. LISTE DES ANNEXES	33

1. CONTEXTE ET OBJECTIFS

La France dispose d'un nombre important de cavités souterraines abandonnées qui présentent un aléa et un risque vis-à-vis des ouvrages en surface.

Les anciennes exploitations abandonnées sont aujourd'hui dans un état de conservation très variable. En zone urbaine, elles peuvent menacer directement la sécurité des personnes et des biens. Ces exploitations ont parfois été traitées. Il existe en effet une panoplie assez large de méthodes allant du simple confortement local au remblayage intégral (Figure 1). Ces différentes méthodes permettent soit la réduction soit la suppression de l'aléa.

Un guide de mise en sécurité des populations, rédigé par l'INERIS en 2007 [5], présente ces différentes méthodes et techniques de traitement, les conditions et les limites de leur utilisation.

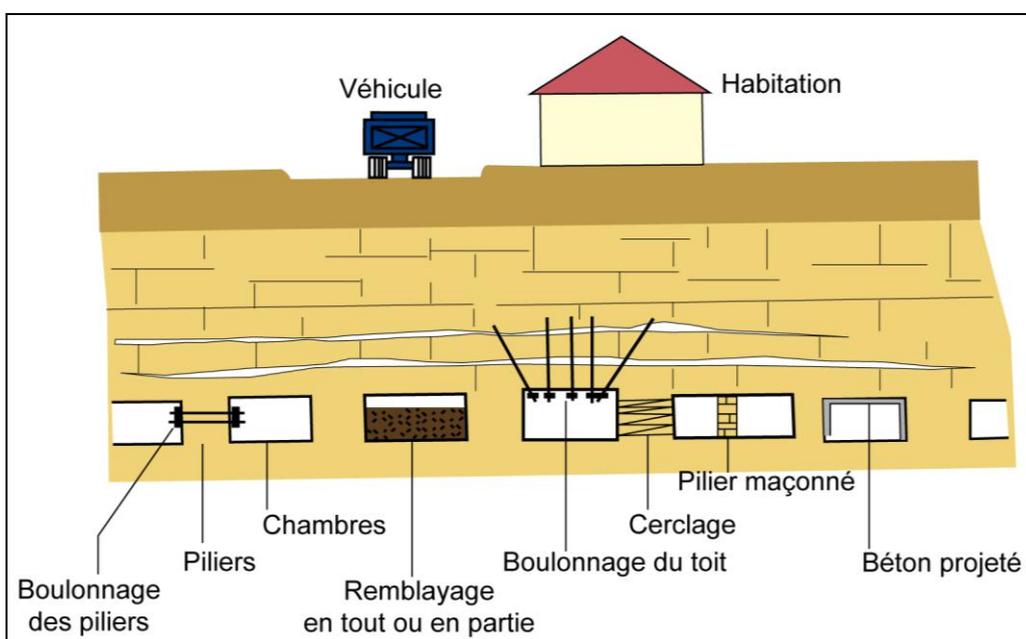


Figure 1 : Principaux types de confortement en souterrain

Parmi toutes ces techniques, d'après les observations sur le terrain, les confortements par des ouvrages maçonnés sont certainement les plus répandus (car les plus anciens et les plus « faciles » à mettre en œuvre) et il n'est donc pas rare de les trouver en cavité anthropique et carrière souterraine. Ces types d'ouvrages ont été construits par les anciens carriers en phase d'exploitation, les différents aménageurs ayant pu leur succéder (armée, champignonnière...) ou par les propriétaires actuels de la surface car ils sont responsables des dégradations et des mouvements induits par ces cavités. Ils ont été réalisés afin de soutenir le toit de la carrière (ciel) aux endroits les plus faibles ou sous les principaux points de surcharge (fondations de bâtiments, passage de métros, de trains...). Les confortements maçonnés ont été utilisés dans les conditions suivantes :

- présence de zones localement dégradées à risque d'évolution ;
- taux de défrètement trop élevé ;
- recherche d'une amélioration de la sécurité dans certains d'ouvrages souterrains devant rester ouverts (ERP, stockages stratégiques, urbanisme souterrain, etc.).

Au moment de la construction, la qualité et l'état de ces ouvrages peuvent varier en fonction de l'objectif de renforcement. Avec le temps et avec l'évolution des conditions du site (présence d'eau, augmentation de la charge, effondrement localisé, etc.), ces ouvrages peuvent présenter des signes de mise en charge ou s'affaisser sous leur propre poids (muraillement en pierres avec remblai à l'intérieur) en perdant tout contact avec le toit de la carrière. Face à ses ouvrages dégradés, il est souvent difficile de diagnostiquer leur utilité effective aujourd'hui.

Dans le cadre du programme d'appui EAT-DRS02 intitulé « Analyse, prévention et maîtrise des risques de mouvements de terrain liés à la présence de cavités souterraines et de versants rocheux instables », le présent document vise à donner quelques principes généraux pour diagnostiquer l'état des ouvrages maçonnés (pilier maçonné, mur...) et des piliers artificiels (cale à bras...) que l'on peut rencontrer dans les anciennes cavités souterraines abandonnées.

Après avoir décrit les différents types de maçonnerie visibles en carrières souterraines, nous répertorierons les principaux désordres observés lors des visites de carrières souterraines de différentes époques et leurs pathologies associées.

Notre analyse des types de confortement et des pathologies associées est basée sur l'expérience de l'INERIS dans les carrières souterraines abandonnées.

Ce travail a permis de mettre au point une fiche-type d'inspection et des fiches synthétiques (en annexes) par type de confortement reprenant l'ensemble des points d'attention à examiner visuellement en présence d'un confortement maçonné. L'utilisation de ce type de fiches permettrait aux gestionnaires de réaliser un diagnostic homogène et constant dans le temps. Elle permettrait également, à terme, de réaliser une base de données des ouvrages maçonnés en milieu souterrain.

2. TYPES DE CONFORTEMENT MAÇONNE EN CARRIERE SOUTERRAINE

En carrières souterraines, il est possible de distinguer plusieurs types de confortements en maçonnerie selon leur(s) fonction(s) et leur mode de construction (type et forme de parpaings¹ et de matériau de remplissage, type de mortier, type de contact avec le massif en place, etc.). Les fonctions d'un soutènement maçonné peuvent être :

- le soutènement porteur : c'est dans la plupart des cas, la fonction première du soutènement maçonné. Il s'agit de soutenir le toit fracturé de la carrière souterraine ou de la cavité, de bloquer une chute de toit ou encore de réduire localement la portée et le taux de défrètement (Figure 2) ;
- le confinement : il s'agit de protéger localement une masse naturelle afin d'éviter les dégradations superficielles, d'augmenter localement la résistance et/ou la portance de la masse naturelle existante (Figure 3).

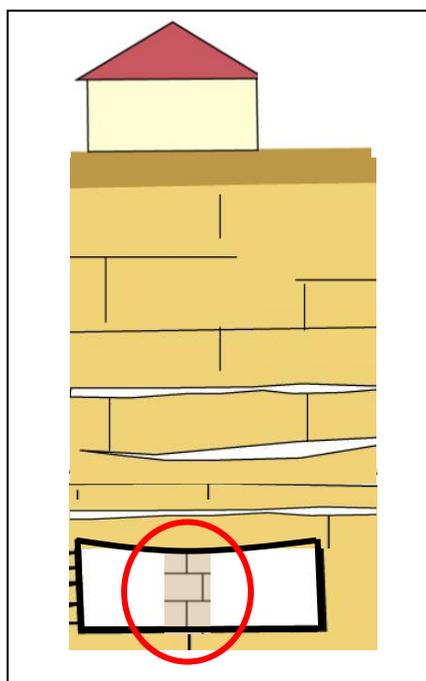


Figure 2 : Soutènement porteur

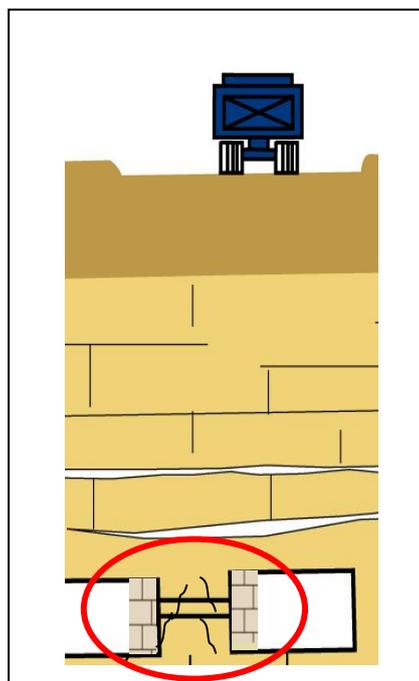


Figure 3 : Confinement

En annexe 1 sont décrits les différents éléments constitutifs d'un confortement en maçonnerie.

2.1 SOUTENEMENT PORTEUR

2.1.1 PILIERS MAÇONNES

Les piliers maçonnés peuvent soit soulager d'anciens piliers dégradés ou rompus, soit diminuer localement un taux de défrètement excessif ou une portée de toit trop importante. Le principe est de transmettre les efforts dus au poids des terrains

¹ au sens premier du terme *parpaings*, c'est-à-dire des blocs de matériau cohérent taillés (moellons, pierres de taille) ou moulés (parpaings de béton, briques).

naturels (éventuellement pour reprendre des surcharges de bâtiments) au mur de la carrière, pour mieux répartir et alléger les sollicitations sur les structures de la cavité.



Photographie 1 : Pilier maçonné en parpaings de béton dans une carrière de tuffeau du Saumurois (49)



Photographie 2 : Pilier maçonné dans une carrière de tuffeau à Saint Avertin (37)



Photographie 3 : Pilier maçonné dans une carrière de calcaire à Saint-Maximin (60)



Photographie 4 : Pilier maçonné dans une carrière de calcaire à Vincennes (source : IGC)

Les photographies 1 à 4 présentent des exemples de piliers maçonnés réalisés dans des carrières souterraines abandonnées.

L'élanement (rapport hauteur/largeur de pilier) est généralement compris entre 1 et 3. Les piliers les plus élancés sont généralement les moins stables.

La technique traditionnelle d'édification de pilier artificiel est celle du pilier maçonné exécuté en moellons hourdis au mortier de ciment.

Cette technique est encore de nos jours très employée à Paris et dans sa proche banlieue pour la consolidation des anciennes carrières souterraines de calcaire grossier dont le recouvrement a été jugé apte, sur le plan géotechnique, à diffuser les charges induites par la construction projetée sous-cavée (Photographie 3 et Photographie 4).

Actuellement, on utilise toujours les moellons, mais aussi d'autres matériaux tels que les briques, les parpaings en aggloméré pleins ou les blocs de béton liés au mortier de ciment.

2.1.2 PILIERS COFFRES

La technique consiste à remplir l'intérieur d'un coffrage réalisé par un muraillement en maçonnerie traditionnelle par un matériau adapté (béton, sable, tout-venant, blocs...).

Le remplissage en couches successives peut être suivi d'une injection de clavage après un certain temps de séchage.

Dans certaines circonstances (faible hauteur de recouvrement), le remblai (souvent du béton) a été injecté par sondages depuis la surface pour obtenir un meilleur clavage au toit.

L'élanement est généralement proche ou légèrement supérieur à 1.



Photographie 5 : Pilier bétonné coffré dans une carrière de calcaire à Jonzac (17)



Photographie 6 : Pilier coffré dans une carrière de sable à Laon (02)

Cette technique est ou a été utilisée dans les carrières de calcaire (Jonzac par exemple) ou encore de sable comme à Laon (Photographie 5 et Photographie 6).

2.1.3 EMPILEMENT DE PARPAINGS (CALE-A-BRAS, COLONNE...)

Les piliers de cette catégorie sont constitués de pierres de taille ou pierres sèches, le plus souvent sans mortier (cale-à-bras). La section du pilier est faible et l'élançement est souvent supérieur à 4.

Ces ouvrages paraissent souvent avoir été mis en œuvre de manière provisoire et adaptés pour bloquer le premier banc rompu du toit immédiat. Par contre, il est classiquement admis que ces piliers d'élançement supérieur à 4 sont peu adaptés pour reprendre l'ensemble des terrains sus-jacents.



Photographie 7 : Cales-à-bras dans une carrière de calcaire à Paris (75)



Photographie 8 : Colonne dans une carrière de sable à Laon (02)

Les Photographie 7 et Photographie 8 reflètent la diversité des piliers en empilements de parpaings observés au sein des carrières souterraines.

Le terme « cale-à-bras » est utilisé dans les carrières de calcaire de Paris (Photographie 7) mais on retrouve ces techniques ailleurs en France et plusieurs types de colonne sont par exemple visibles dans les carrières de Caen ou de Laon (Photographie 8).

2.2 MAÇONNERIE REPRENANT UNE MASSE NATURELLE

Il s'agit d'un type de traitement du massif naturel existant. La maçonnerie intervient alors comme une consolidation et son action peut être :

- une substitution : la maçonnerie est judicieusement utilisée pour palier à une faiblesse du pilier ou un déficit de matériau, par exemple en base de pilier (Photographie 11 et Photographie 12) ;

- un traitement superficiel : il s'agit de protéger le pilier naturel afin qu'il ne se dégrade pas. L'écaillage peut-être mécanique ou provoqué par le gel-dégel, les gradients thermiques, les circulations d'eau, etc. Il ne s'agit donc ici que d'une couche de protection permettant un très léger confinement, sauf si l'on y ajoute des boulons, des cintres ou des injections de résine permettant d'augmenter le renforcement.

2.2.1 CONFINEMENT DE PILIER

Dans certain cas, la reprise par maçonnerie d'un pilier naturel existant peut avoir pour objectif de rétablir ou d'augmenter la résistance d'un pilier jugé trop dégradé ou de section portante insuffisante. Un muraillement en maçonnerie entoure alors l'ensemble du pilier naturel et le vide entre ce muraillement et le pilier naturel est comblé par du remblai ou coulis (béton). Une bonne liaison entre le toit de la carrière et le confortement est alors indispensable.

Parfois, en l'absence de documents, il est difficile de distinguer une masse naturelle reprise par maçonnerie d'un pilier entièrement maçonné. Leur apparence extérieure (pierres appareillées sur toute la hauteur de la carrière) peut être identique (exemples dans les carrières de Laon).

En général, l'élançement de masses naturelles entièrement reprises par maçonnerie est proche ou inférieur à 1.



Photographie 9 : Pilier naturel conforté en maçonnerie sèche dans une carrière de calcaire à Laon (02)



Photographie 10 : Pilier en cours de confortement dans une carrière de calcaire à Vincennes (source : IGC)



Photographie 11 : Pilier naturel conforté en maçonnerie mixte dans une carrière de craie à Lille (59)



Photographie 12 : Pilier naturel conforté dans une carrière de calcaire à Sireuil (16)

2.2.2 MURS

Il s'agit de confortements linéaires ou filants en maçonnerie, avec des joints en mortier dans la plupart des cas.

Sont classés dans cette catégorie, les murs de masque ou hagues (Photographie 13) réalisés dans la hauteur de la carrière, ainsi que des murs de barrage autour des zones de fontis destinées à soutenir le ciel au voisinage de l'accident. Ces murs étaient réalisés en moellons hourdis au mortier dont l'épaisseur atteignait 0,8 à 1 m. Ces murs servaient le cas échéant de coffrage au remblai, appelé « bourrage » dans les carrières parisiennes.



Photographie 13 : Murs de hague dans une carrière de calcaire à Paris (75)



Photographie 14 : Murs de barrage dans une carrière de pierres à ciment à Roquevaire (13)

Cette méthode a été utilisée assez largement dans les carrières de calcaire grossier où de nombreux ouvrages maçonnés ont été exécutés depuis le XIX^{ème} siècle, sous les voies publiques, les voies ferrées ou sous les bâtiments. Elle a été employée jusqu'à très récemment chaque fois que l'état de la carrière le permettait pour éviter à moindre frais l'exécution de fondations profondes.

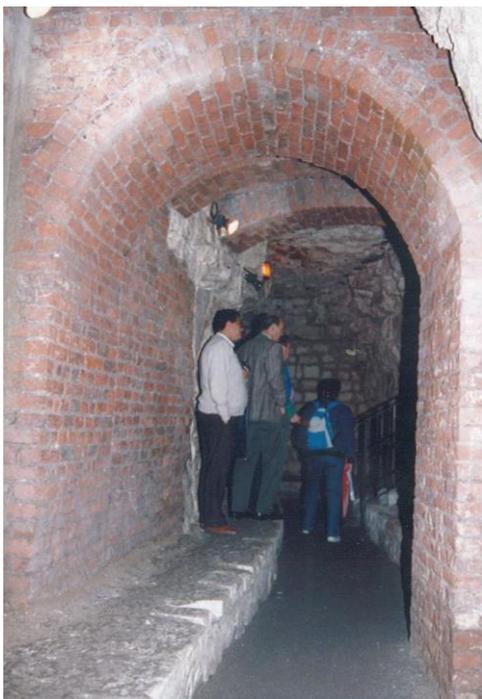
2.3 VOUTES ET PIEDROITS

Les voûtes maçonnées ont pu constituer le soutènement le plus classique là où seule la tenue du toit de la carrière posait des problèmes de stabilité. Les voûtes permettent de transférer les contraintes de traction en contraintes de compression. Les voûtes les plus courantes étaient réalisées sans piédroits en s'ancrant suffisamment en profondeur dans les parements rocheux (Photographie 16). Elles pouvaient être en plein cintre ou déversées.

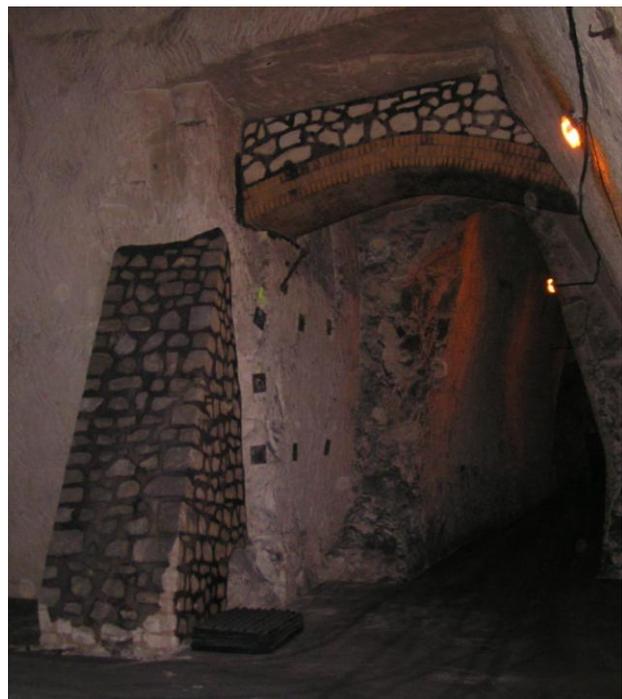
Le muraillement massif en plein cintre s'opérait, lui, par la réalisation de piédroits appareillés en joints horizontaux qui étaient recouverts, à partir d'une hauteur bien définie, d'une voûte en plein cintre.

Ces soutènements porteurs sont mis en place localement dans des conditions difficiles qui nécessitent une reprise totale ou partielle de la charge des terrains de recouvrement : consolidation des galeries d'accès en conditions difficiles, zones affectées de surcharges, galeries stratégiques (Photographie 15), etc.

Plus généralement, on trouve ce type de soutènement dans les secteurs sous faible recouvrement, à la limite des caves et au sein des terrains superficiels non cohérents, altérés, voire localement pour traverser une zone effondrée ou remblayée.



Photographie 15 : Galerie consolidée dans un souterrain d'Arras (62)



Photographie 16 : Voûte dans une crayère de Reims (51)

Pour les voûtes maçonnées, on considérait, dans la pratique, une charge effective de portance de l'ensemble maçonné de l'ordre de 1,2 à 2,4 MPa suivant la qualité des matériaux.

3. DEGRADATIONS OBSERVEES

Les dégradations observées sur les différents types de soutènement-porteur en maçonnerie proviennent :

- d'un défaut de conception ou construction : non prise en compte de la poussée verticale des terrains², malfaçons, mauvaise qualité des matériaux, manque de préparation de surface, dimensions non adaptées... ;
- d'une pathologie liée à l'encaissant ou à l'environnement du site : fracturation, gradients thermiques, circulations d'eau... ;
- d'une pathologie liée au vieillissement (naturel ou accéléré via des facteurs comme l'eau par exemple) des matériaux ;

On peut distinguer deux types de dégradations soit immédiates après la construction de l'ouvrage, soit différées. Le manque de surveillance et de d'entretien peut sans doute accélérer cette dégradation.

Dans la suite de ce chapitre, la ou les pathologie(s) associée(s) à chaque désordre est (sont) précisée(s) dans chaque paragraphe. Un tableau récapitulatif reprend ces éléments (Tableau 1).

² Voire des contraintes horizontales de traction dans le cas d'une voûte.

Tableau 1 : Pathologies des désordres observés en carrières souterraines

Désordre	Type de confortement en maçonnerie						Type de pathologie		
	Pilier maçonné	Pilier coffré	Empilement de parpaings	Maçonnerie de reprise	Mur	Voûte et piédroit	Pathologie liée à l'encaissant ou à l'environnement du site	Défaut de conception et/ou construction	Vieillessement
Décollement toit / pilier	F	F	R		F			X	
Fissuration	F	R	F	R	R	R	surcontraintes	X	X
Flambement			F		F			X	
Desaxement			F		R		sol glissant / déviation du champ de contraintes	X	
Poinçonnement du mur	R	R		R	P	P (piédroit)	argile/ planche insuffisante	X	
Poinçonnement du ciel	R	R		R	R		argile/ planche insuffisante	X	
Déformation de la maçonnerie	P			R	R	P	surcontraintes	X	X
Ecaillage des parements du confortement	P	P	P	P	P	P	gel/dégel		X
Altération des joints en mortier	F	R		R	F	R	eau		X
	R : rare	F : fréquent	P : possible						

3.1 DECOLLEMENT TOIT - PILIER

➡ Défaut de construction

La dégradation la plus fréquente observée sur les piliers maçonnés, les piliers coffrés et autres piliers artificiels est l'absence de contact entre le pilier et le toit de la carrière (Photographie 17). Ce désordre engendre une inefficacité de l'ouvrage de soutènement car il ne permet pas la prise en charge des contraintes verticales ni de réduire la portée. En revanche, il réduit le volume de vide en cas d'un effondrement localisé.



Photographie 17 : Décollement entre le toit et le pilier coffré (carrière de Saumur, 49)

La liaison entre le toit de la carrière et le pilier est rarement homogène : un décollement est souvent visible sur 1, 2 ou 3 faces du pilier.

Un bon « matage » en ciel est très difficile à obtenir surtout en présence de toit très dégradé mais des techniques d'injection, avec ou sans coffrage, permettront d'assurer le meilleur contact possible.

3.2 FISSURATION

➡ Défaut de conception et/ou construction

➡ Vieillissement

La fissuration peut se développer dans les parpaings ou les contourner en restant dans les joints.

Si la fissuration se crée dans les parpaings (Photographie 18), elle est signe d'une forte sollicitation de l'ouvrage de soutènement.

Parfois ces fissures suivent les joints de mortier ce qui leur confère un tracé en « marches d'escalier » (Photographie 19). Le liant sert à créer la continuité entre les éléments de maçonnerie et donc la continuité de la transmission de charge. En conditions normales, il ne devrait pas se développer de contraintes de traction dans les joints mais une répartition non uniforme des charges, la présence de discontinuités et de fracturation, un tassement différentiel du mur, des

élancements importants entraînant un flambage ou désaxement peuvent modifier ces conditions et entraîner des contraintes en cisaillement et en traction.

Dans le cas des voûtes en maçonnerie, les contraintes en traction se développent plus fréquemment dans les ouvrages de grande portée et de petite largeur, entraînant alors l'apparition de fissures entre les parpaings.



Photographie 18 : Fissuration des moellons d'un pilier maçonné (carrière de Laon, 02)



Photographie 19 : Fissuration en « marche d'escalier » d'un pilier maçonné (carrière de Laon, 02)

Les mortiers servent plus de gangue d'enrobage et de répartition des charges que d'éléments de résistance à l'écrasement. En général, avec les pierres calcaires, il est préférable d'utiliser des mortiers à base de chaux. Le mortier de chaux est plus souple et plus déformable que le mortier de ciment, plus rigide et au comportement fragile. Les mortiers de ciment apportent une très grande solidité, notamment en présence d'un environnement humide, mais ils ont l'inconvénient d'être plus durs que les moellons en calcaire qu'ils enveloppent ; on constate souvent des fissures dans les moellons au contact de parties poinçonnantes de mortier de ciment. Par ailleurs, ce dernier a l'inconvénient d'être étanche et d'empêcher les échanges gazeux.

Ce phénomène de fissuration provoque un affaiblissement de la structure maçonnée.

3.3 FLAMBEMENT ET DESAXEMENT

Défaut de conception

Un élancement (rapport de la hauteur à la plus petite largeur de l'ouvrage) trop important d'un pilier artificiel peut faire apparaître un flambement de celui-ci, voire sa rupture. Ce désordre est rare en carrière souterraine sauf pour des piliers de petite section, réalisés en pierres sèches.

Le désaxement (Photographie 20) est la conséquence d'un effort de cisaillement dans le pilier lié à une mauvaise localisation de l'axe du pilier par rapport au champ de contraintes ou encore à une mauvaise fondation (décentrée, sur terrain glissant...).

Ce type désordre entraîne une inefficacité partielle voire totale de l'ouvrage de soutènement.



Photographie 20 : Désaxement de la colonne et écaillage en pied (carrière de Laon, 02)

3.4 POINÇONNEMENT DU MUR OU DU CIEL

➡ Défaut de conception et/ou construction

➡ Pathologie liée à l'environnement du site

En présence d'un « mauvais sol » (remblai ou une couche argileuse/marneuse par exemple), le pilier risque de s'enfoncer. Cette action peut en outre être favorisée par l'effet de l'eau (battement de nappe).

A l'inverse, une raideur trop forte de l'ouvrage artificiel ou une section portante trop faible (même si la résistance du pilier est suffisante par rapport à la charge calculée) peut créer un point dur, qui au lieu de soutenir les épontes (le plus souvent le toit), va les poinçonner.

Ce type désordre entraîne une inefficacité partielle voire totale de l'ouvrage de soutènement. Les conséquences sont visibles au toit de la carrière.

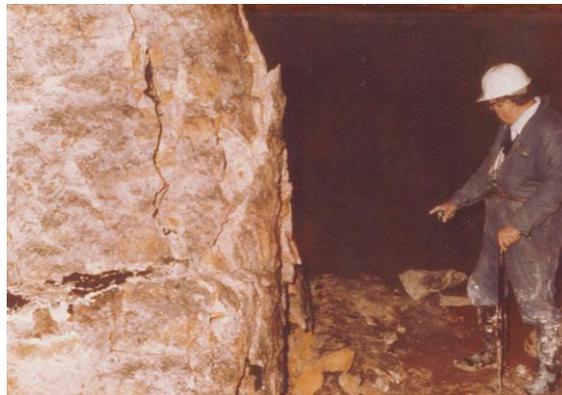
3.5 DEFORMATION DE LA MAÇONNERIE

➡ Défaut de conception et/ou construction

➡ Vieillissement

La rupture de la maçonnerie est souvent précédée par l'apparition d'un ventre³ avec fissures qui s'intensifie au cours du temps (Photographie 21 et Photographie 22). La maçonnerie s'effondre sous son propre poids. L'origine d'un tel désordre réside souvent dans une altération complète des mortiers ou dans la présence de matériaux de remplissage sensibles à l'eau et au gonflement [1]. L'infiltration et la pression interne de l'eau accélèrent ce phénomène.

Certains ventres ne sont liés à aucune poussée du terrain, mais sont dus simplement à une déformation excessive d'un ouvrage de qualité médiocre sous son propre poids, aggravé parfois par une poussée du matériau de remplissage (remblai à l'arrière de la maçonnerie) non lié. Ce désordre est associé à l'altération des mortiers, point faible des maçonneries (§3.7).



Photographie 21 : Ventre puis rupture au droit d'un pilier (carrière de Cruzille, 37)



Photographie 22 : Ventre au droit d'un mur de confortement (carrière de Cruzille, 63)



Photographie 23 : Rupture du confortement en maçonnerie (carrière de Laon, 02)

³ terme utilisé pour désigner un bombement localisé du parement maçonné.

Le phénomène de ventre peut se poursuivre par une décomposition du confortement, une rupture localisée rapide et/ou une chute progressive de parpaings descellés (Photographie 23).

3.6 ECAILLAGE DES PAREMENTS DU CONFORTEMENT

-  Défaut de conception et/ou construction
-  Mauvaise adaptation au site
-  Vieillessement

L'écaillage correspond à la rupture du parpaing (moellon, brique...), formant une écaille centimétrique décollée et prise « en étau » entre les parpaings adjacents (Photographie 20). C'est un désordre de structure indépendant de la qualité des parpaings [1].

La cause de l'écaillage peut être une mise en contrainte du parpaing, entre points durs, excessive vis à vis de ses caractéristiques mécaniques.

L'action chimique de l'eau et l'humidité entraînent également un écaillage. En effet, la cristallisation de sel dans les pores se traduit par une microfissuration et une dégradation de la maçonnerie.

Une autre cause de l'écaillage des parements du pilier, notamment près de la surface et des entrées de galeries, peut être le gel, processus intrinsèque progressant vers l'intérieur du matériau. Sa propagation est conditionnée par la porosité et la saturation en eau du matériau ainsi que par la fréquence et l'intensité des cycles gel-dégel. Le gel se manifeste souvent en surface par des émiettements ou décollements de plaquettes et de petits éléments. Il peut atteindre le cœur du matériau en provoquant des éclatements plus importants ou de la fissuration. Il est admis que ses effets mécaniques visibles sont moins liés à la pression expansive de la glace elle-même qu'aux pressions hydrauliques qui se développent dans les pores les plus fins et non encore gelés et qui vont dépasser la résistance à la traction du matériau, provoquant fissures et éclatement [1].

Ce phénomène entraîne un affaiblissement progressif du confortement en maçonnerie.

3.7 ALTERATION DES JOINTS DE MORTIER

-  Défaut de conception et/ou construction (qualité des matériaux)
-  Vieillessement et dégradation

Le plus souvent, l'altération des mortiers affecte toute l'épaisseur de la maçonnerie et provient du lessivage par les eaux d'infiltration riches en CO₂ ou en sulfates. Le stade ultime est un sable, soit sec et pulvérulent, soit humide et pâteux, et l'appareillage est alors proche de la ruine. Le départ progressif du mortier des joints est un phénomène courant dans les maçonneries : on parle alors de déjointsage (Photographie 24) [1].



*Photographie 24 :
Déjointement d'un pilier
maçonné (carrière de Laon,
02)*



*Photographie 25 : Altération du mortier d'un
pilier maçonné (carrière de Laon, 02)*

L'absence ou la dégradation de mortier se traduit par une distribution non uniforme des contraintes, en particulier de traction, dans les éléments de maçonnerie. Ce désordre progresse beaucoup plus vite si les parpaings sont mal « assisés » et les lits de mortier irréguliers ou trop épais. Parfois aussi, des rejointoiements superficiels peuvent cacher un mortier totalement altéré, voire absent [1].

Il y a risque de chute locale de parpaings, voire de ruine de tout ou d'une partie de la structure maçonnée.

Certains bétons coffrés anciens ont été complètement altérés au bout de quelques décennies. La cause est à rechercher dans la dissolution des liants, mais parfois dans l'emploi de granulats inadaptés ou altérables, contenant des minéraux à risque pour la durabilité des liants (pyrite, sulfates), mais aussi dans des dosages peu précis et irréguliers dans un même ouvrage. Les ciments employés étaient parfois très sensibles aux eaux agressives.

4. SURVEILLANCE ET SUIVI DES CONFORTEMENTS MAÇONNES

La surveillance et le suivi des confortements maçonnés parfois dégradés donnent une indication précieuse sur les conditions de stabilité de la carrière. Pour faciliter et homogénéiser la surveillance de ce type d'ouvrage, une fiche-type d'inspection est proposée en annexe 2. Cette fiche comprend les éléments caractéristiques de l'ouvrage observé visuellement : forme, dimensions, date de construction, nature et épaisseur du mur et du recouvrement, nature et état des matériaux constitutifs du confortement, désordres observés...

Pour exemple, des fiches techniques complétées sont fournies en annexe 3. En effet, en 2012, plusieurs sites ont été visités par des équipes de l'INERIS pour observer les piliers et les ouvrages en maçonnerie : carrières de calcaire et de sable à Laon (02) et Jonzac (17).

Pour chaque type de soutènement en maçonnerie explicité en §2 de ce document et sur la base des retours d'expérience de désordres observées en carrière, des fiches synthétiques ont été réalisées (annexes 4 à 8). Au nombre de 5, elles précisent :

- la géométrie du confortement maçonné ;
- la nature des éléments constitutifs de l'ouvrage (annexe 1) ;
- la ou les fonctions du confortement ;
- l'environnement de l'ouvrage ;
- les principaux désordres observés ;
- des exemples d'utilisation de l'ouvrage ;
- les points simples et visuels à surveiller en priorité pour juger de l'état géotechnique du confortement maçonné.

5. RECOMMANDATIONS POUR LA CONCEPTION ET LA CONSTRUCTION DE SOUTÈNEMENT MAÇONNE

5.1 BASE DES PRESCRIPTIONS

La conception et la construction d'ouvrages maçonnés font l'objet d'une notice spécifique rédigée en 2004 par l'Inspection Générale des Carrières de Paris (annexe 9 [4]). Cette notice a été élaborée pour les carrières souterraines de la région parisienne. Ces recommandations peuvent être appliquées dans toute la France dans la mesure où elles seront adaptées en fonction :

1. de l'enjeu à sécuriser :

Un champignoniste ou un aménageur souhaitant mettre en sécurité son exploitation souterraine favorisera les solutions les moins coûteuses ou différentes pour conserver un espace approprié et/ou éventuellement un certain esthétisme. A l'inverse, le propriétaire de la surface qui veut renforcer les fondations de sa maison, privilégiera la portance (gros pilier coffré ou maçonné) à l'esthétique de l'ouvrage maçonné.

2. des matériaux disponibles localement :

Si les déchets de l'exploitation ont été utilisés anciennement pour réaliser les confortements en maçonnerie, il apparaît que les briques sont plus usitées dans le Nord de la France, tandis que les moellons de calcaire sont préférés en région parisienne et à proximité.

3. et du savoir-faire local.

5.2 ELEMENTS COMPLEMENTAIRES

A la notice de l'IGC, on ajoutera également, sur la base de nos observations de terrain, les recommandations suivantes en liaison notamment avec la pathologie redoutée :

5.2.1 PATHOLOGIES LIEES A LA CONCEPTION OU A LA CONSTRUCTION

- avant tout travaux, se demander quelle sera la fonction de la maçonnerie : soutenir le toit, conforter un pilier naturel, ceinturer, combler ou traiter par injection une zone effondrée, bloquer les chutes de ciel... ;
- faire impérativement reposer les maçonneries sur le « bon sol » pour éviter tout risque de poinçonnement. Dans certains cas, il est nécessaire de traiter également le mur de la galerie en réalisant un radier, le plus souvent en forme de voûte très surbaissée ;
- respecter pour le pilier artificiel une déformabilité (module d'élasticité) du même ordre que celle de la masse rocheuse constituant la cavité à conforter. Une raideur trop forte du pilier artificiel peut créer un point dur, qui au lieu de soutenir le toit, va le poinçonner ;

- monter le soutènement porteur en maçonnerie, assise par assise, en respectant les délais de prise et de durcissement des mortiers des assises inférieures, notamment en conditions humides [3] ;
- s'assurer que l'élancement du pilier soit conforme aux règles du DTU 26.1. Il est classiquement admis que les piliers d'élancement supérieur à 1 sont peu adaptés pour reprendre le massif. Néanmoins, les piliers d'élancement inférieur à 3 peuvent contribuer à soulager des piliers voisins en soutenant une partie du premier banc du toit ;
- réaliser un matage, entre la partie supérieure du pilier et le ciel de carrière, aussi parfait que possible, en ne laissant subsister aucun vide entre le parpaing et le ciel sur toute la surface du pilier afin que la transmission des efforts soit totale. Si le matage en ciel n'est pas correctement réalisé lors de la construction du pilier et même si le ciel vient progressivement s'appuyer sur l'ouvrage, il ne faut pas que la déformation du toit nécessaire à la mise en charge du pilier provienne de la rupture d'un pilier voisin ou du lâchage du premier banc du toit ;
- ne pas tailler le côté intérieur des parpaings d'un pilier coffré et favoriser la création de redans pour augmenter la stabilité de l'ouvrage par frottement ;
- éviter d'utiliser un matériau de remplissage non lié pour les piliers coffrés et les masses calcaires reprises en maçonnerie. En effet, ce type de matériau ne reprend pas les efforts du recouvrement ou de toit (sauf si un clavage parfait a été réalisé) mais au contraire, transmet une poussée vers la maçonnerie, déjà sollicitée par le toit de la carrière ;
- éviter d'utiliser un matériau de remplissage très sensible à l'eau (marne, argile...) et/ou gonflant (gypse par exemple) pour les piliers coffrés et les masses calcaires reprises en maçonnerie. Dans le temps, ces matériaux auront tendance à changer de consistance et de comportement selon la teneur en eau et les conditions hydrogéologiques du site ;
- ajouter un chapiteau à la colonne ou au pilier très élancé(e), pour élargir la surface portante en tête (et son assise quand il est réalisé en pied, Photographie 26) et ainsi éviter le poinçonnement du toit et/ou du mur de la carrière.



Photographie 26 : Pilier coffré avec chapiteaux

5.2.2 PATHOLOGIES LIEES AUX MATERIAUX

- prévoir des pierres ayant une résistance à la compression suffisante pour la reprise des sollicitations ;
- privilégier les parpaings pleins résistants aux eaux agressives et séléniteuses avec une résistance à la compression suffisante ;
- privilégier les mortiers à base de chaux qui sont « respirants », « plastiques » et de longue durée [3].

5.2.3 PATHOLOGIES LIEES A L'ENVIRONNEMENT DU SITE

- dimensionner le pilier en fonction de la charge qu'il doit reprendre selon sa fonction ;
- définir la position de la maçonnerie en fonction de l'état géotechnique de la carrière (fractures au toit, cloche de fontis, fracturation des piliers naturels...);
- prévoir les venues d'eau au toit et au mur de la carrière car c'est un facteur important dans le vieillissement des matériaux constitutifs des confortements en maçonnerie.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

L'objectif d'un confortement par maçonnerie est d'éviter une dégradation locale d'une cavité induite par la ruine d'un pilier naturel existant et/ou par une chute du toit. L'édification de piliers artificiels est certainement la méthode la plus simple pour le renforcement ponctuel des ouvrages souterrains accessibles. Elle permet de diminuer localement le taux de vide et d'améliorer la sécurité. En contrepartie, son efficacité reste limitée à une zone donnée et la mise en sécurité de toute une zone d'exploitation supposerait la réalisation d'un certain nombre de piliers dont le coût final en fixerait assez rapidement les limites.

La surveillance et le suivi de ces confortements maçonnés parfois dégradés donnant une indication sur les conditions de stabilité de la carrière, une fiche-type d'inspection est proposée pour juger en première approche de l'état géotechnique d'un pilier ou du confortement maçonné. Des fiches synthétiques ont également été réalisées par type de confortement en maçonnerie, précisant les points simples à examiner visuellement.

Sur la base de retours d'expérience en carrières souterraines, les désordres observés ont été associés à des pathologies particulières: défaut de conception et/ou construction, mauvaise adaptation à l'environnement et vieillissement.

A partir de la notice IGC, des recommandations sont enfin proposées en termes de conception et de construction.

A ce stade, notre analyse a révélé l'importance de connaître la composition du confortement maçonné (constitution du noyau, épaisseur de la maçonnerie...). Pour se faire, un état de l'art des moyens d'auscultation permettant de décrire plus en détail l'ouvrage et sa pathologie serait utile. Citons par exemple le radar, l'endoscopie, les petits forages destructifs...

7. BIBLIOGRAPHIE

- [1] *CETU*, Guide de l'inspection du génie civil des tunnels routiers - Du désordre vers le diagnostic, *Les Guides du CETU*, juillet 2004.
http://www.cetu.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/Guide_inspection_fascicule_cle1c4cf3-1.pdf
- [2] *FINE J.* (juin 1998), Le soutènement des galeries minières, *Ecole des Mines de Paris*.
- [3] *HUMBAIRE J.L.*, Technologie de la maçonnerie, *Dossier Techniques de l'Ingénieur*, C 2102.
- [4] *IGC (15 juillet 2004)*, Notice technique de l'IGC – Travaux de consolidation souterraines exécutées par piliers maçonnés dans les carrières de calcaire grossier situées en région parisienne, *Inspection Générale des Carrières de Paris* :
http://www.igc-versailles.fr/pdf/piliers_maconnes.pdf
- [5] *TRITSCH J.J.* (12 février 2007), Guide technique : Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : surveillance - traitement, rapport *INERIS* référencé *DRS-07-86042-02484* :
www.ineris.fr/centredoc/Guide_carrieres.pdf
- [6] *WOJTKOWIAK F., RAI M.A., BONVALLET J.*, Etudes expérimentales en laboratoire de différentes méthodes de renforcement des petits piliers de mine, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, n°32, Paris, 1985, pages 131-138.

8. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Eléments constitutifs du confortement en maçonnerie	2 A4
Annexe 2	Fiche-type d'inspection d'un ouvrage maçonné	2 A4
Annexe 3	Exemples de fiches d'inspection	1 A4 1 A3
Annexe 4	Fiche synthétique pour le pilier maçonné	1 A4
Annexe 5	Fiche synthétique pour le pilier coffré	1 A4
Annexe 6	Fiche synthétique pour la masse confortée	1 A4
Annexe 7	Fiche synthétique pour la colonne ou cale-à-bras	1 A4
Annexe 8	Fiche synthétique pour les voûtes et muraillement	1 A4
Annexe 9	Notice technique de l'IGC – Travaux de consolidation souterraines exécutées par piliers maçonnés dans les carrières de calcaire grossier situées en région parisienne	24 A4

ANNEXE 1 : ELEMENTS CONSTITUTIFS DU CONFORTEMENT EN MAÇONNERIE

Les ouvrages de soutènement en maçonnerie sont hétérogènes car composés de parpaings jointoyés ou non de mortier. Les matériaux pouvant être utilisés en carrière pour l'édification de maçonneries, sont ceux qui permettent d'obtenir in fine des soutènements capables de supporter une contrainte aussi bien dans le mortier constituant les joints que dans les parpaings (meulières, moellons de calcaire, parpaings pleins en béton, béton...).

1. PARPAING

Dans les ouvrages maçonnés en cavités souterraines, on peut distinguer :

1.1 PIERRES NATURELLES

Les pierres naturelles (moellons, pierres de taille..) sont généralement mises en œuvre sous forme de parallélépipèdes plus ou moins réguliers.

Suivant leurs dimensions, les pierres sont employées sous forme de pierres de taille (qui ne peuvent être maniées sans outils) ou de moellons d'aspect moins soigné et maniables par un seul homme (poids inférieur à 30 ou 40 kg).

Les moellons bruts présentant des faces grossièrement planes et plus ou moins parallèles sont utilisés pour les maçonneries en carrière [3]. Les pierres utilisées pour la fabrication des moellons provenaient dans la mesure du possible de la carrière. Leur qualité mécanique et leur résistance à l'altération étaient très variables.

Les pierres sont choisies en fonction de leur capillarité et de leur résistance à la compression.

Avec certains matériaux, il est possible de monter des ouvrages en maçonnerie sans mortier dits ouvrages de pierres sèches. Les éléments constitutifs de ces ouvrages sont généralement des moellons de pierre calcaire dont les échantillons parallélépipédiques sont assez réguliers pour se juxtaposer très correctement en assurant la stabilité.

1.2 BRIQUES

Quand la pierre faisait défaut, les maçonneries étaient réalisées en briques. Des défauts de cuisson assez fréquents ont entraîné une altération rapide de certaines séries de briques [3].

1.3 PARPAINGS DE BETON PLEINS

Il s'agit de produits obtenus par moulage et compression de bétons fins dans moules métalliques. Ces parpaings, pleins ou creux, ont des dimensions plus grandes que la brique pleine [3].

Utilisés jusqu'aux années 1940, ces éléments ont bien résisté à l'altération, car préfabriqués avec un matériau plus riche en ciment et moins perméable que les bétons coulés du même âge.

2. MORTIER

Les mortiers sont des mélanges pâteux destinés à relier entre eux les matériaux constitutifs des maçonneries : ils sont en général composés de sables, de liants hydrauliques et d'eau [3].

Les mortiers doivent adhérer fortement aux matériaux qu'ils relient, acquérir une dureté et une résistance comparables et résister aux agents atmosphériques comme l'eau [3].

Les liants ont constamment évolué au cours du temps, ainsi que les normes de fabrication des mortiers. Les liants hydrauliques les plus employés sont les chaux et les ciments.

Le sable possède un rôle purement mécanique : il augmente le volume du mortier et réduit son prix de revient, il s'oppose au retrait provenant de la prise des liants, il augmente la résistance du mortier sauf dans le cas de l'emploi du ciment dont la propre dureté est supérieure à celle de tout mélange [3].

Les mortiers les plus anciens encore visibles sont généralement clairs, signe qu'ils ont été confectionnés avec une chaux hydraulique. Les mortiers à base de ciment, plus tardifs, sont généralement plus sombres. La proportion de mortier dans un volume de maçonnerie varie de 8 à 30% selon la qualité de l'appareillage des pierres ; elle est sensiblement égale à 30% avec des briques [1].

L'avantage des mortiers est leur perméabilité plus grande que les pierres ; ils jouent ainsi un rôle « d'éponge » protecteur des pierres car chemin préférentiel des transferts d'humidité et de vapeur d'eau ; à l'inverse, cette perméabilité les rend plus sensibles aux attaques chimiques qui les dégradent au fil du temps.

Les mortiers anciens sont très sensibles aux agressions chimiques et sont le point faible d'une maçonnerie. Ils possèdent une porosité importante mais très fine, introduisant une succion capillaire forte par rapport à celle des moellons adjacents qui ont des pores plus importants. Mais comme leur carbonatation est ancienne et profonde, ils sont très sensibles à toute attaque acide. Contrairement aux bétons, ils n'ont plus de réserve alcaline susceptible de les protéger ce qui explique leur désagrégation parfois complète [1].

3. MATERIAUX DE BOURRAGE

Il s'agit d'un mélange (béton, caillasse et mortier, sable, tout venant, résidus de pierre de taille...) servant au remplissage des confortements en maçonnerie. Ce mélange est alors enfermé entre deux parements de parpaings parallélépipédiques ou entre la masse calcaire et un parement de parpaings.

Le mélange se faisait à la montée de l'ouvrage, en alternant par exemple des pelletées de mortier et de caillasse.

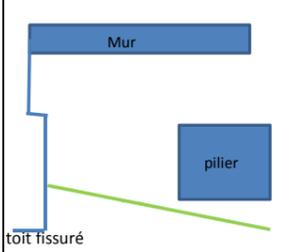
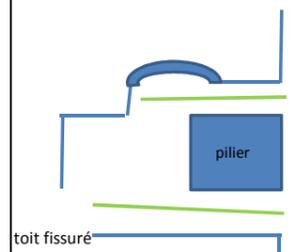
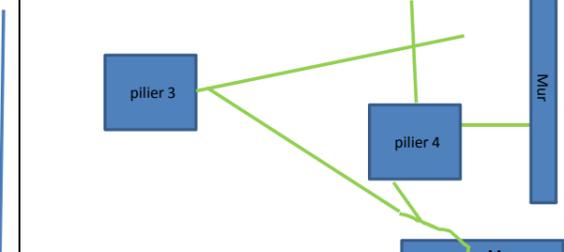
ANNEXE 2 :
FICHE-TYPE D'INSPECTION D'OUVRAGE MAÇONNE

(version actualisée en décembre 2013 suite aux remarques des bureaux d'études et/ou services d'inspection des carrières de Paris (IGC), de Laon, de Gironde et des crayères de Reims)

FICHE DE DIAGNOSTIC VERSION DEFINITIVE (avec intégration des modifications en gras ci-dessous)

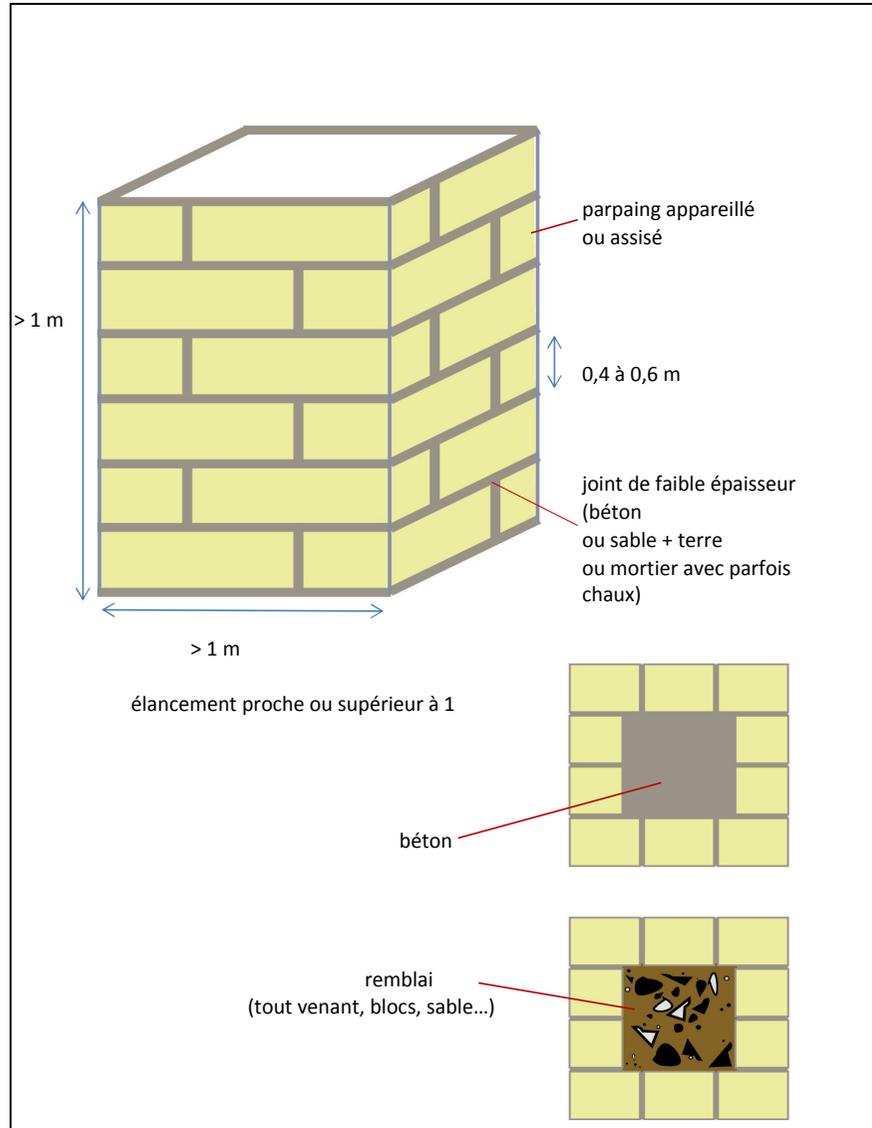
Nom de la carrière - secteur de visite	
Matériau exploité	
Méthode(s) d'exploitation	
Identifiant du pilier (nom carrière/identifiant pilier/date)	
Localisation du pilier (plan et coupe) avec fracturation du toit si possible	
Type de pilier (maçonné, coffré, colonne...)	
Axe du pilier : est-il désaxé ou vertical?	
Hauteur du pilier (m)	
Longueur et largeur du pilier (m), forme de la section	
Epaisseur du recouvrement au droit du pilier (m)	
Date de construction du pilier	
Nature et épaisseur du banc du toit immédiat (m)	
Nature et épaisseur du remblai au sol (m)	
Fonction du pilier (cloche de fontis, portance du toit, fondation...)	
Matériaux constitutifs du pilier	Nature et nombre (horizontaux et verticaux) des éléments extérieurs
	Taille des éléments (appareillés oui/non)
	Etat des éléments
	Nature de la matrice/ des joints
	Epaisseur des joints
	Etat des joints
	Nature du noyau
	Fondation
Nature et état du matage en tête	
Schématisation du pilier	
Dates des visites	
Observateur	
N° photo	
Risques / désordres	Etat du pilier Points de faiblesse Fissurations (schéma si possible, préciser si concerne le bloc ou le joint)
	Quantification des désordres (nombre, ouverture, si flambage, largeur à mi-pilier)
	Traitement - confortation existant (broche, cerclage...)
	Venues d'eau / infiltrations
Remarques / environnement du pilier	

ANNEXE 3 : EXEMPLES DE FICHES D'INSPECTION

Date visite	08/03/2012							
Observateurs	D. Montagne, C. Duval, G. Gouillon et C. Lambert							
Nom carrière	carrière de "l'Escale" à Laon							
Matériau exploité	calcaire	calcaire	calcaire	calcaire	calcaire	calcaire	calcaire	calcaire
Méthode d'exploitation	chambres et piliers	chambres et piliers	chambres et piliers	chambres et piliers	chambres et piliers	chambres et piliers	chambres et piliers	chambres et piliers
Identifiant du pilier (nom carrière/identifiant pilier/date)	Escale/1/20120308	Escale/2/20120308	Escale/3/20120308	Escale/4/20120308	Escale/5/20120308	Escale/6/20120308	Escale/7/20120308	Escale/7/20120308
N° photo	2 à 5	6 à 9	10 à 13	14 à 15	16 à 21	22 à 24	25 et 26	25 et 26
Localisation du pilier avec fracturation du toit si possible	 toit fissuré 2ème niveau de sous-sol	 toit fissuré 2ème niveau de sous-sol	 2ème niveau de sous-sol		2ème niveau de sous-sol pilier sur 2 niveaux de carrière	2ème niveau de sous-sol		présence d'un karst à proximité 2ème niveau de sous-sol
Type de pilier (maçonné, coffré, colonne...)	maçonné	maçonné	maçonné	maçonné	coffré	coffré		masse calcaire reprise en maçonnerie
Forme du pilier (desaxé, vertical...)	vertical	vertical	vertical	vertical	vertical	vertical	vertical	vertical
Hauteur du pilier (m)	2,25	2,5	2,2	2,2	1,85	1,95		1,55
Longueur et largeur du pilier (m)	0,75 x 0,75	0,7 x 0,8	0,8 x 0,8	0,8 x 0,8	3,1 x 2,5	0,46 x 0,46		1,7 x 2,1
Elancement	3	3,1	2,8	2,8	0,74	4,2		0,9
Epaisseur du recouvrement au droit du pilier (m)	3,5 à 4	3,5 à 4	< 10 m	< 10 m	< 10 m	< 10 m		< 10 m
Date de construction du pilier	18ème siècle	19ème siècle	époque carolingienne	époque carolingienne	2010	19ème siècle		1970
Nature et épaisseur du banc du toit immédiat (m)	banc calcaire (1 m d'épaisseur)	banc calcaire (1 m d'épaisseur)	banc calcaire (1 m d'épaisseur)	banc calcaire (1 m d'épaisseur)	banc calcaire (1 m d'épaisseur)	banc calcaire (1 m d'épaisseur)		calcaire
Nature et épaisseur du remblai au sol (m)	déchets calcaires	déchets calcaires	déchets calcaires	déchets calcaires	déchets calcaires	déchets calcaires		déchets calcaires
Fonction du pilier (cloche de fontis, portance du toit, fondation...)	fondations pour habitations sus-jacentes	soutenir le 1er banc du toit	soutenir le 1er banc du toit	soutenir le 1er banc du toit	fondations pour habitations sus-jacentes	soutenir le 1er banc du toit		réduire la portée trop grande
Matériaux constitutifs du pilier	Nature et nombre (horizontaux et verticaux) des éléments extérieurs	moellons de grès taillés et appareillés	moellons de calcaire taillés et appareillés	moellons de calcaire taillés et appareillés 8 en vertical et 4 en horizontal	moellons de calcaire taillés et appareillés 8 en vertical et 4 en horizontal	moellons de calcaire taillés et appareillés 7 en vertical	briques + béton	moellons de calcaire
	Taille des éléments	hauteur = 0,3 m	hauteur = 0,25 m largeur = 0,25 m longueur = 0,4 m	hauteur = 0,35 m largeur = 0,35 m longueur = 0,6 m	hauteur = 0,35 m largeur = 0,35 m longueur = 0,6 m	hauteur = 0,25 m largeur = 0,15 m	petit (briques)	hauteur = 0,15 m
	Etat des éléments	bon	bon	bon	bon	bon	bon	bon
	Nature de la matrice/ des joints	mortier	mortier + chaux	sable + terre	sable + terre	sable + ciment	béton	mortier
	Epaisseur des joints		< 2 cm	2 cm	2 cm	5 cm		
	Etat des joints	bon	bon	s'effrite	s'effrite	bon	bon	
	Nature du noyau	moellons de grès	moellons de calcaire	moellons de calcaire ?	moellons de calcaire ?	masse calcaire + remplissage	?	grave ciment déversé depuis la surface + masse calcaire
	Remblai au sol Hauteur en m	oui	oui	oui 10 cm	oui 10 cm	oui 10 cm	oui 10 cm	oui 10 cm
Nature et état du matage en tête		mortier	mortier	mortier	sable + ciment	béton	RAS	
Risques / désordres	Etat du pilier Points de faiblesse Fissurations	 pilier fissuré mortier recouvre tout défaut !	 RAS	 fissures dans les moellons	 fissures dans les joints	 RAS car pilier récent	 décollement du toit	 effondrement du parement en maçonnerie et rupture de l'ouvrage
	Traitement - confortation existant (broche, cerclage...)	RAS	RAS	RAS	RAS	masse calcaire reprise par un parement en maçonnerie et remplissage sur 2 niveaux de carrière	RAS	masse calcaire reprise par un parement en maçonnerie et remplissage
	Venues d'eau / infiltrations	non	non	non	non	oui ancienne	oui ancienne	non
Hypothèses du mécanisme du désordre	convergence du mur par rapport au toit	RAS	convergence du mur par rapport au toit	convergence du mur par rapport au toit	RAS	pilier posé sur le remblai + eau -> désolidarisation du pilier par rapport au sol	poussée du remplissage -> effondrement du parement en maçonnerie -> rupture de l'ouvrage	

ANNEXES 4, 5, 6, 7, 8 :
FICHES-SYNTHETIQUES PAR TYPE D'OUVRAGE MAÇONNE

PILIER COFFRE



Exemples en carrière :

carrières de calcaire de Laon (02)
 carrières de calcaire de Paris (75)
 carrière de calcaire de Jonzac (17)
 carrière de calcaire de Bourges (18)

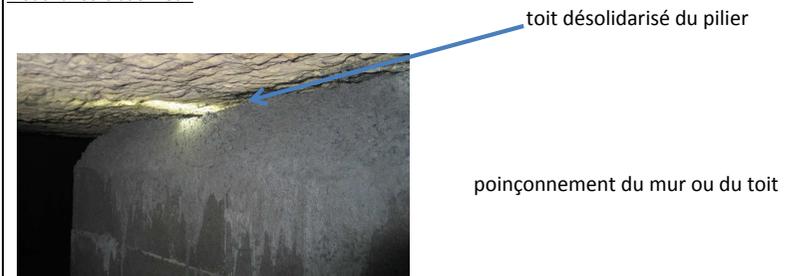
PILIER COFFRE

Fonction de ce type de pilier :
 Soutenir le premier banc du toit fracturé
 Diminuer la portée de la chambre
 Reprendre le poids du recouvrement

Environnement :

Pilier positionné au carrefour de plusieurs fractures du toit
 Remblai en pied

Désordres observés :



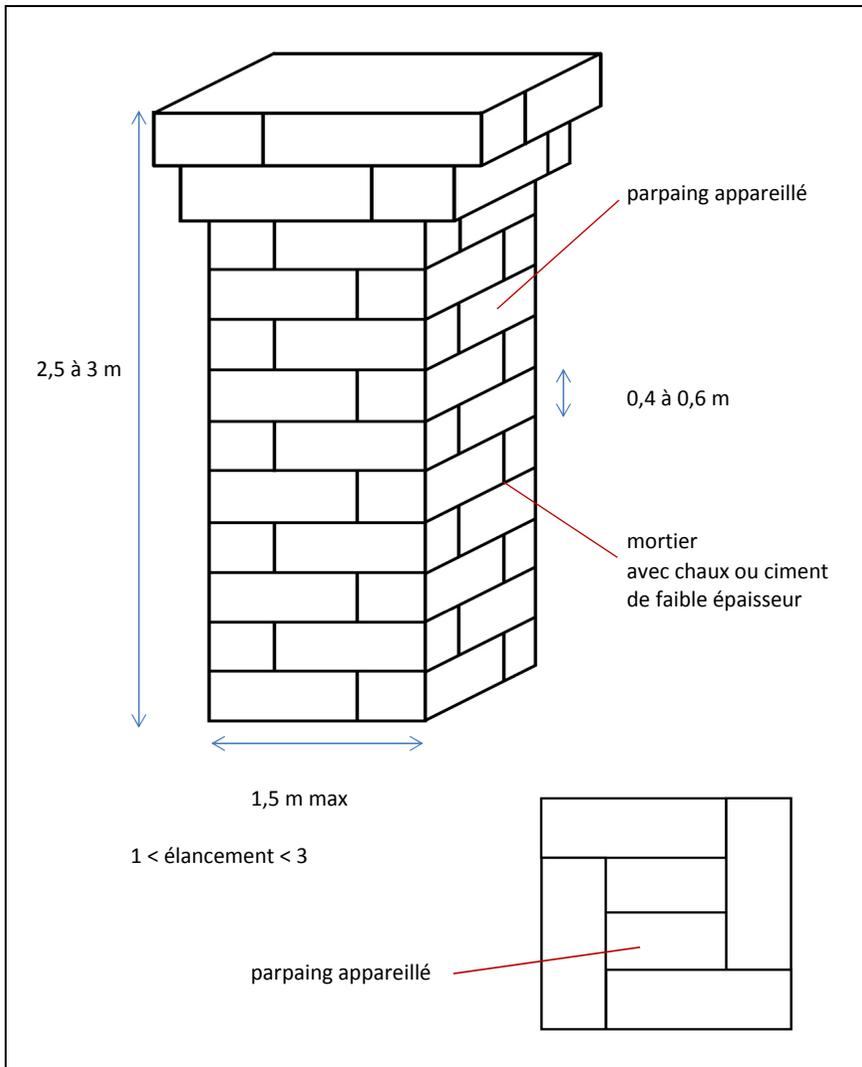
fissures dans les parpaings et/ou les joints



Points d'attention :

Vérifier la liaison au toit
 Définir la véritable nature du noyau du pilier
 Vérifier si les fondations se trouvent sur le vrai sol ou sur du remblai
 Localiser les venues d'eau

PILIER MACONNE



Exemples en carrière :

carrières de calcaire de Laon (02)
carrière de calcaire de Jonzac (17)
carrière de calcaire de St Maximin (60)
carrière de calcaire de Crouzille (63)

PILIER MACONNE

Fonction de ce type de pilier :

Soutenir le premier banc du toit fracturé
Diminuer la portée de la chambre

Environnement :

Pilier positionné au carrefour de plusieurs fractures du toit
Remblai en pied

Désordres observés :



toit désolidarisé partiellement du pilier
ou
poinçonnement du mur ou du toit



altération du
mortier des joints



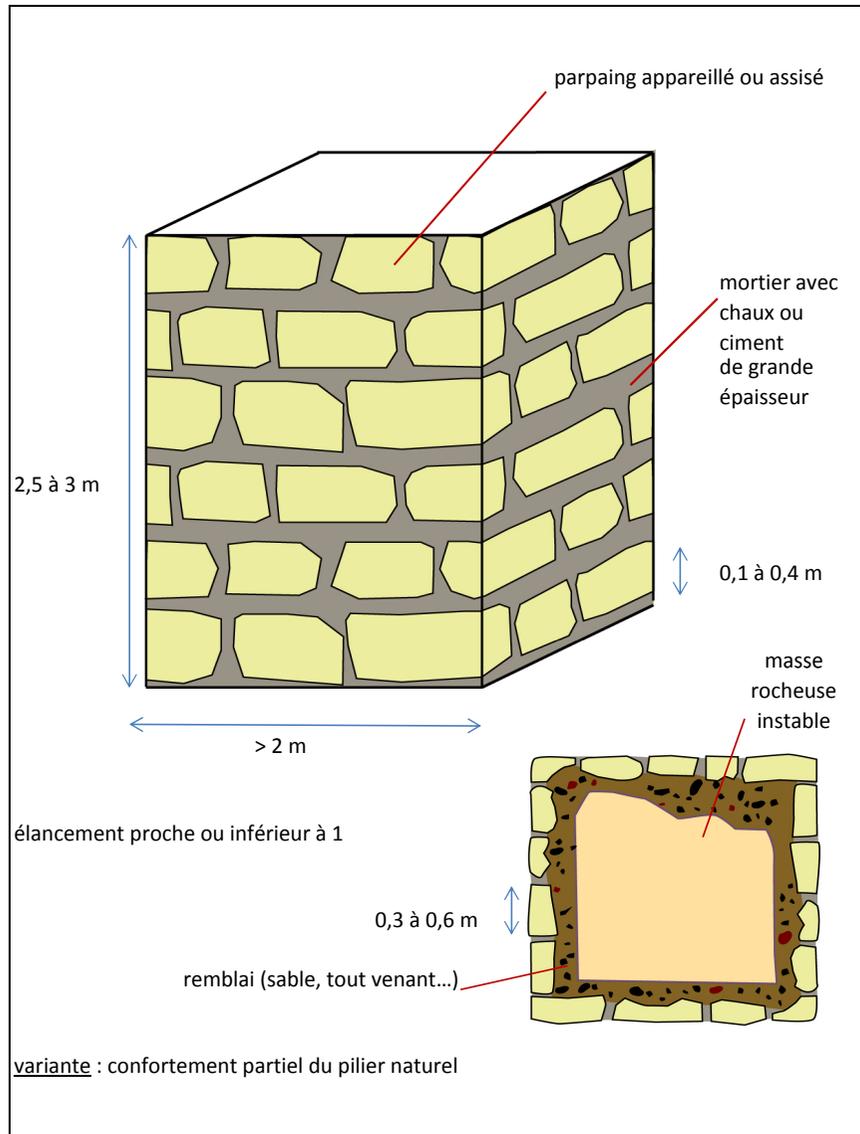
rupture de la maçonnerie

fissures dans les éléments du piliers et/ou les joints

Points d'attention :

Vérifier la liaison au toit
Vérifier l'état/homogénéité du chapiteau
Vérifier l'inclinaison du pilier
Vérifier si les fondations se trouvent sur le vrai sol ou sur du remblai
Localiser les venues d'eau

CONFORTEMENT D'UN PILIER NATUREL



Exemples en carrière :

carrières de calcaire de Laon (02)
 carrière de calcaire de Jonzac (17)
 carrière de craie de Lille (59)
 carrière de calcaire de Sireuil (16)

CONFORTEMENT D'UN PILIER NATUREL

Fonction de ce type de pilier :

Confiner superficiellement le pilier naturel
 Conforter une masse rocheuse (pilier naturel) instable
 Peut éventuellement reprendre une partie du poids du recouvrement si l'épaisseur du confortement est importante

Environnement :

Le pilier naturel original reprenait une partie du poids du recouvrement
 Remblai en pied

Désordres observés :



toit désolidarisé du pilier
 fissures dans les parpaings et/ou les joints
 altération du mortier

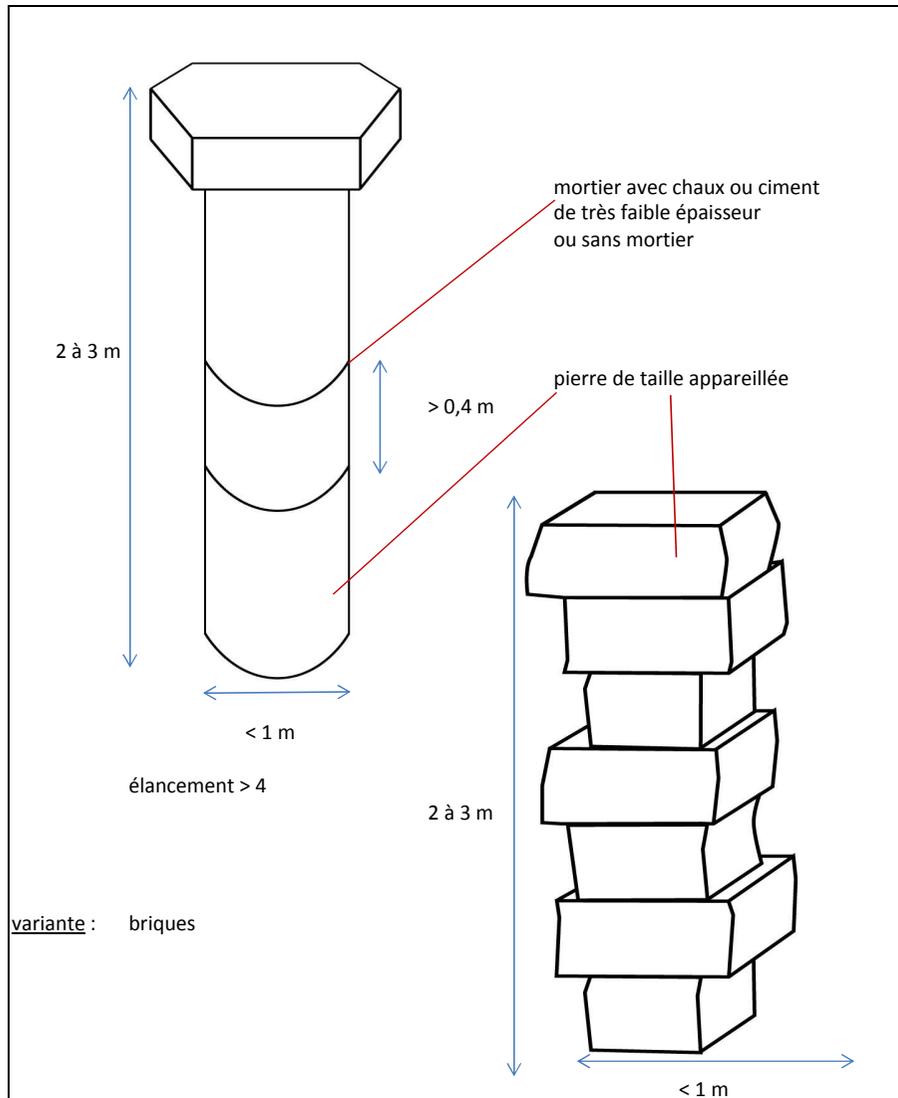
désolidarisation des parpaings et rupture du confortement lié à la poussée du



Points d'attention :

Vérifier la liaison au toit
 Définir la nature et l'épaisseur du plaquage
 Localiser les venues d'eau

COLONNE OU CALE-A-BRAS



Exemples en carrière :

carrières de calcaire de Laon (02)
 carrières de calcaire de Paris (75)
 carrière de calcaire de Caen (14)

COLONNE OU CALE-A-BRAS

Fonction de ce type de pilier :

Soutenir le premier banc du toit fracturé
 Diminuer la portée de la chambre

Environnement :

Au centre de grande chambre
 Remblai en pied
 Positionné au centre de plaques du toit prédécoupées par des fractures

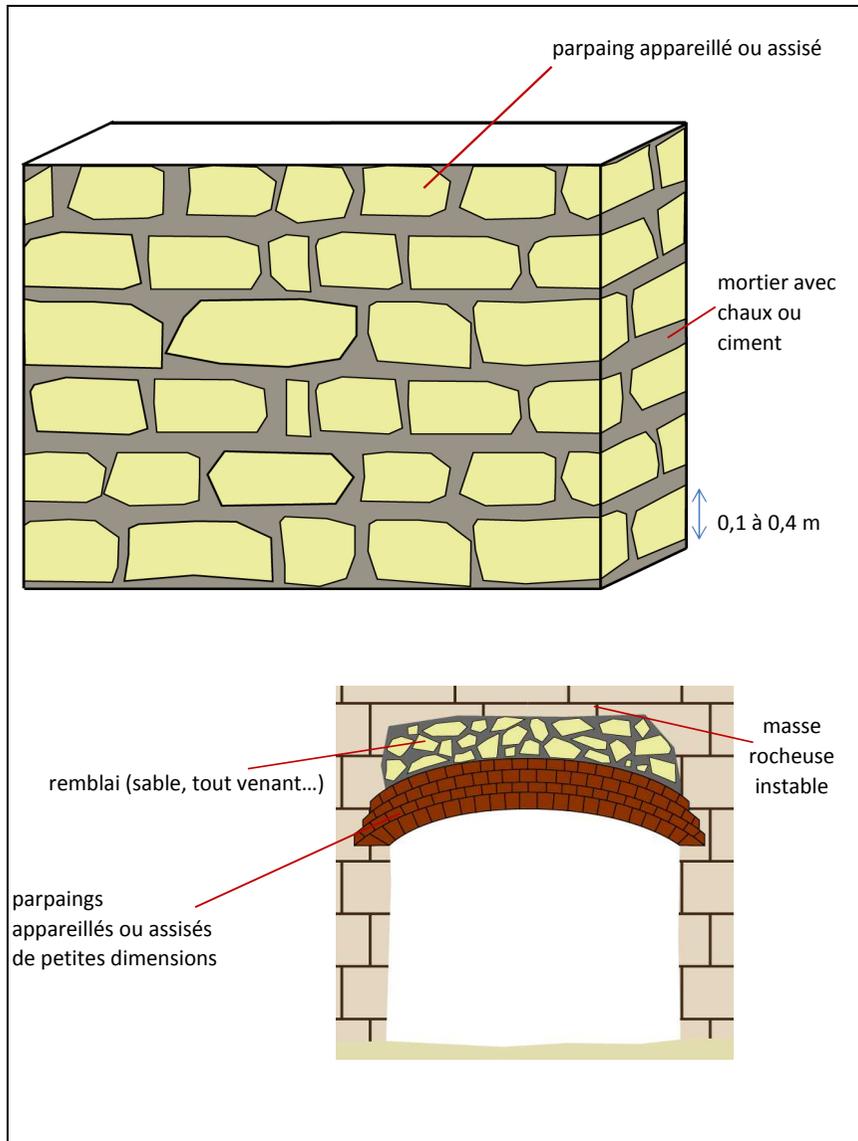
Désordres observés :



Points d'attention :

Vérifier la liaison au toit
 Vérifier la nature et le liaisonnement des éléments
 Vérifier l'inclinaison du pilier
 Vérifier si les fondations se trouvent sur le vrai sol ou sur du remblai
 Localiser les venues d'eau

VOUTE ET MURAILLEMENT



Exemples en carrière :
carrières de calcaire de Laon (02)
carrières de craie de Reims (51)
carrière de calcaire de Cruzille (63)

VOUTE ET MURAILLEMENT

Fonction de ce type de confortement :

Conforter une masse rocheuse instable
Soutenir le premier banc du toit fracturé
Reprendre une partie du poids du recouvrement

Environnement :

Conditions difficiles et/ou stratégiques nécessitant la reprise totale ou partielle de la charge du recouvrement

Remblai en pied

Désordres observés :



ventre puis rupture de la maçonnerie

fissuration des parpaings et/ou des joints
et altération des joints



Points d'attention :

Vérifier si les fondations se trouvent sur le vrai sol ou sur du remblai
Définir l'épaisseur de la maçonnerie
Définir la nature et l'épaisseur du remplissage
Localiser les venues d'eau

**ANNEXE 9 : NOTICE TECHNIQUE DE L'IGC
TRAVAUX DE CONSOLIDATION SOUTERRAINES EXECUTEES PAR
PILIER MAÇONNES DANS LES CARRIERES DE CALCAIRE
GROSSIER SITUEES EN REGION PARISIENNE**



INSPECTION GÉNÉRALE DES CARRIÈRES

NOTICE TECHNIQUE

du 15 juillet 2004

**Travaux de consolidations souterraines
exécutées par piliers maçonnés
dans les carrières de calcaire grossier situées en région
parisienne.**

SOMMAIRE

PRÉAMBULE.....	3
1. PRINCIPES GÉNÉRAUX DE LA CONSOLIDATION PAR PILIERS MAÇONNÉS.....	4
1.1. DÉFINITION ET CONTEXTE DES CONSOLIDATIONS	4
1.2. RÔLES DES INTERVENANTS	4
1.3. RESPONSABILITÉS.....	5
1.4. PROCÉDURE PRÉALABLE À L'EXÉCUTION D'UNE CONSOLIDATION PAR PILIERS MAÇONNÉS	5
1.5. DISPOSITIONS SPÉCIFIQUES À LA NATURE DES CONSTRUCTIONS OU DE LA PARCELLE.....	6
1.5.1. <i>Constructions individuelles</i>	6
1.5.2. <i>Immeubles</i>	6
1.5.3. <i>Faible recouvrement</i>	6
2. RECONNAISSANCE DE SOL PRÉALABLE	7
2.1. PRINCIPE GÉNÉRAL	7
2.2. OBJECTIFS DE LA RECONNAISSANCE DE SOLS	7
2.3. MODES ET MOYENS D'INVESTIGATION.....	7
2.3.1. <i>Moyens d'investigation in situ</i>	7
2.3.2. <i>Nombre de forages pour reconnaître la carrière</i>	8
2.3.3. <i>Autres moyens d'investigation</i>	8
2.4. CONTENU DU RAPPORT D'ÉTUDE GÉOTECHNIQUE.....	8
3. DIMENSIONNEMENT	8
3.1. PRINCIPE DE DIMENSIONNEMENT.....	8
3.2. SURFACE DES PILIERS SC	9
3.3. ESPACEMENT DES PILIERS.....	10
3.4. NON POINÇONNEMENT DU CIEL ET DU SOL.....	11
3.5. NON FLAMBEMENT DU PILIER	11
3.6. MATÉRIAUX DU PILIER	12
3.6.1. <i>Pierres naturelles : moellons de calcaire, meulières, ...</i>	12
3.6.2. <i>Joints</i>	12
3.6.3. <i>Parpaings pleins</i>	13
3.6.4. <i>Béton</i>	13
3.7. AUTRES TYPES DE CONSOLIDATIONS MAÇONNÉES.....	13
3.7.1. <i>Consolidation par voûtes maçonnées ou par ossature béton armé</i>	13
3.7.2. <i>Dérogation à l'uniforme répartition des piliers</i>	13
4. MISE EN ŒUVRE	13
4.1. GÉNÉRALITÉS	13
4.2. CAS DE REMBLAIS IMPORTANT EN PIED DE CARRIÈRE	14
4.3. CONSTITUTION DES PILIERS MAÇONNÉS.....	14
4.4. BOURRAGE DES VIDES	15
4.5. FONTIS, CIELS TOMBÉS, ANCIENS PUIITS	15
4.6. FOUILLE DESCENDUE EN PIED DE CARRIÈRE	15
4.7. PUIITS	16
4.7.1. <i>Puits d'accès ou de service</i>	16
4.7.2. <i>Sécurité des puits</i>	19
4.7.3. <i>Descente par les puits</i>	19
4.8. CHRONOLOGIE DES TRAVAUX.....	20
5. CONSTAT DE BONNE FIN DE TRAVAUX	21
5.1. RESPONSABILITÉS.....	21
5.2. RELEVÉ DES TRAVAUX EXÉCUTÉS – PLAN DE RÉCOLEMENT.....	21
5.3. OPÉRATIONS DE CONTRÔLE	21
5.4. DOSSIER DE RÉCOLEMENT DES TRAVAUX	22
6. CHANGEMENT DE PRESCRIPTION	22

Préambule

En application de l'**article 552 du Code Civil**, le propriétaire du sol est également propriétaire du sous sol. Il est donc **responsable** des dommages que celui ci peut causer. De ce fait, la responsabilité et la charge financière des travaux de mise en sécurité de sa propriété vis-à-vis des risques liés au sous-sol lui incombent, même si ces travaux sont prescrits par l'autorité administrative compétente dans la délivrance d'une autorisation administrative de construire.

La présente notice est rédigée à l'usage des maîtres d'ouvrage, maîtres d'œuvre, bureaux d'études et bureaux de contrôle qui doivent, à l'occasion d'un projet de construction situé au-dessus d'anciennes carrières souterraines de calcaire grossier, faire exécuter par une entreprise spécialisée des travaux de consolidations souterraines par piliers maçonnés, prescrits ou recommandés par l'Inspection générale des carrières de Paris à l'occasion d'une demande de permis de construire.

Cette notice fixe les **prescriptions** et les **règles de l'art minimales** exigées par l'IGC lors de cette demande. Elles doivent être respectées au cours des opérations de consolidations souterraines par piliers maçonnés. Son rôle consiste essentiellement à définir les **objectifs** pour garantir la fiabilité de la consolidation souterraine et à indiquer des moyens nécessaires à mettre en œuvre. Elle fournit, à cet égard, le cadre du contrôle général des travaux à exécuter mais, en aucun cas, elle ne saurait définir ce qu'il est suffisant de mettre en œuvre pour obtenir la consolidation effective. Cette responsabilité relève entièrement des intervenants à l'acte de construction : maître d'ouvrage, maître d'œuvre, bureau de contrôle technique, géotechnicien et entreprise chargée de l'exécution des travaux.

En particulier, il appartient au maître d'ouvrage, au maître d'œuvre et au bureau de contrôle technique, en fonction des contraintes particulières, de prendre des mesures plus contraignantes si la situation l'exige. La présente notice précise aussi des limites d'application de cette méthode de consolidation souterraine en fonction des caractéristiques de la parcelle, de la carrière et de la construction.

Elle définit les conditions spécifiques autorisant éventuellement un changement de prescription de cette technique de consolidation de la parcelle qui permet la mise en œuvre de fondations superficielles, en une technique de consolidation par injection conformément aux règles minimales définies par la notice IGC du 15 janvier 2003.

Par ailleurs l'Inspection générale des carrières n'ayant pas compétence en matière d'hygiène et de sécurité du travail, les prescriptions de cette notice se rapportant à ce domaine ne sauraient être considérées comme prenant en compte l'ensemble des prescriptions applicables en la matière. Elles ne sont édictées qu'en vue d'assurer la sécurité des agents de l'Inspection générale des carrières lors des contrôles. Il appartient donc à la personne responsable de l'hygiène et de la sécurité du chantier de consolidation de faire appliquer l'ensemble des mesures prescrites par le code du travail en vigueur.

La présente notice a été élaborée dans le cadre d'un **groupe de travail** formé à l'initiative de l'Inspection générale des carrières et constitué d'un ensemble de membres représentatifs de la profession comportant notamment le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, l'Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, l'Agence Qualité Construction, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, des organismes agréés de contrôle technique, des géotechniciens, des experts judiciaires, des maîtres d'œuvre et des entreprises spécialisées. La liste des membres du groupe de travail est donnée en annexe.

1. Principes généraux de la consolidation par piliers maçonnés

1.1. Définition et contexte des consolidations

Les consolidations souterraines, objet de la présente notice, concernent les carrières souterraines de calcaire grossier dont le recouvrement a été jugé apte, sur le plan géotechnique, à diffuser les charges induites par la construction projetée sous-minée. Le résultat consiste :

- à soutenir le toit de la carrière, banc de calcaire laissé en place par le carrier appelé « ciel de carrière », par des piliers en maçonnerie, exécutés sous la construction projetée, dans la hauteur de la carrière et reposant sur le bon sol,
- à ceinturer, à combler et à traiter par injection les fontis, conformément aux règles minimales définies par la notice IGC du 15 janvier 2003 relative aux travaux de consolidation par injection,
- à ceinturer les anciens puits,
- à bloquer les ciels tombés rencontrés.

La réalisation de consolidation par piliers maçonnés est possible **quelle que soit la hauteur du recouvrement** (cf. notamment §1.5.3) et quelle que soit la nature des immeubles ou des bâtiments à construire ou à modifier (extension ou réhabilitation). Un **dossier technique justificatif du dimensionnement** des piliers maçonnés et des ouvrages à réaliser constituant la consolidation souterraine, sera établi au préalable par les acteurs à la construction et transmis à l'Inspection générale des carrières avec le dossier de récolement des ouvrages exécutés.

1.2. Rôles des intervenants

On trouvera ci-après les définitions et les rôles des intervenants. Ces définitions font référence pour le texte de la notice :

- **Maître d'ouvrage** : personne physique ou morale, représentée ou non par un mandataire, pour le compte de qui les travaux sont réalisés.
- **Maître d'œuvre** : personne physique ou morale, responsable de la conception et du dimensionnement de l'ouvrage et / ou qui assure le contrôle et le suivi de son exécution. Le maître d'œuvre peut être un géotechnicien dans le cadre des missions G2 et G4 (NFP 94 500).
- **Constructeur ou locateur d'ouvrage** : maître d'œuvre, bureau d'études techniques, architecte, entrepreneur, technicien ou toute autre personne liée au maître d'ouvrage par un contrat de louage d'ouvrage.
- **Géotechnicien** : personne physique ou morale qui réalise des missions géotechniques de type G12 (NFP 94 500) sur ordre du maître d'ouvrage, du maître d'œuvre ou de l'entreprise.
- **Entreprise** : personne physique ou morale qui réalise les travaux, à partir des préconisations du cahier des charges établi par le maître d'œuvre, et sous sa direction.
- **Bureau de contrôle technique** : personne physique ou morale agréée par le Ministre de la Construction après avis d'une commission. L'activité de contrôle technique de la construction est exercée en conformité avec la norme NFP 03 100 relative aux critères généraux pour la contribution du contrôle technique à la prévention des aléas techniques dans le domaine de la construction. La mission type de contrôle technique comporte les phases suivantes concrétisées par :

- le rapport initial de contrôle technique, après examen des documents de conception relatifs aux travaux de consolidation,
 - la formulation d'avis initial, après examen du dossier d'exécution comportant notamment la note de dimensionnement des piliers et les plans d'exécution correspondants ; cet avis devant être émis avant exécution sous forme d'avis favorable, suspendu ou défavorable,
 - la formulation d'avis intermédiaire, après examen sur le chantier des ouvrages et des éléments d'équipement soumis à son contrôle,
 - le rapport final de contrôle technique, avant la réception des travaux de consolidation.
- **Inspection générale des carrières** : la mission de contrôle exercée par l'Inspection générale des carrières, en tant que conseil et expert technique au service du Maire ayant autorité pour la délivrance du permis de construire, se limite à s'assurer du respect de l'application effective de la prescription qui constitue un des supports du permis de construire formant un tout indivisible.

Il s'ensuit que le contrôle exercé par l'Inspection générale des carrières, ne constitue en aucun cas un acte de maîtrise d'œuvre. Son rôle se limite à constater in fine la réalisation de la prescription, attestée par la remise du dossier de récolement des travaux exécutés. L'Inspection générale des carrières délivre le récépissé de dépôt de plan nécessaire à l'obtention de la conformité au permis de construire.

Il n'entre pas dans le rôle de l'Inspection générale des carrières d'émettre un quelconque visa sur le dossier technique justificatif. Son rôle se limite à s'assurer que la mise en œuvre des piliers maçonnés par les acteurs à la construction s'effectue sur la base d'un dimensionnement validé des ouvrages.

C'est dans ce contexte qu'en cours d'exécution des travaux, des passages inopinés des contrôleurs réglementaires de l'Inspection générale des carrières permettent de contrôler la mise en application de la prescription et la conformité des travaux aux règles minimales de la présente notice technique.

A cet égard, l'article L 460-I du Code de l'Urbanisme prévoit un droit de visite sur le chantier à tout moment et même deux ans après l'achèvement des travaux.

1.3. Responsabilités

La responsabilité du constat de bonne fin des travaux et du contrôle de la qualité d'exécution des travaux relève entièrement et uniquement de la maîtrise d'œuvre, d'un bureau de contrôle technique s'il est missionné dans l'opération et de l'entreprise. La présente notice définit les règles de l'art minimales nécessaires pour exécuter la consolidation de la parcelle sous-minée autorisant la mise en œuvre de fondations superficielles pour la construction, objet du permis de construire, dont la conformité est subordonnée à la mise en œuvre de la prescription de consolidation souterraine par la technique des piliers maçonnés.

1.4. Procédure préalable à l'exécution d'une consolidation par piliers maçonnés

Pour pouvoir être soutenu, il faut que le "ciel de la carrière" soit suffisamment épais et en bon état sur l'ensemble de la carrière. Si le terrain est en fontis ou avec un ciel très bouleversé, il est évident que des piliers de soutènement sont inefficaces ou difficilement réalisables.

A cet égard, il appartient au maître d'ouvrage de confier à un géotechnicien une mission de faisabilité géotechnique de type G12. Cette mission doit être réalisée avant travaux. Le géotechnicien missionné établit un rapport dans lequel il se prononce sur la faisabilité de la solution et donne

obligatoirement les paramètres nécessaires à son dimensionnement, il précise les possibilités de renforcement là où l'état de fracturation les justifie.

Le maître d'œuvre établit obligatoirement et au préalable le dossier technique justificatif du dimensionnement (cf. § 3) dans le cadre de sa mission de conception et de suivi de l'exécution des travaux.

En outre, l'exécution de ces travaux suppose la carrière accessible par l'intermédiaire de puits existants ou à créer, ou d'entrées en cavage.

Dans le cas d'une prescription au permis de construire de consolidation par piliers maçonnés, un plan prévisionnel de ces travaux est transmis, avant l'exécution des travaux prescrits, à l'Inspection générale des carrières par le maître d'ouvrage.

1.5. Dispositions spécifiques à la nature des constructions ou de la parcelle

1.5.1. Constructions individuelles

Pour les constructions individuelles uni familiales (i.e. celles pour lesquelles le Code de l'urbanisme n'impose pas le recours à un architecte), il pourra être dérogé à l'obligation de justification du dimensionnement dès lors qu'un **ratio minimal** de surface portante des piliers supérieur ou égal à **20%** sera adopté par les acteurs à la construction.

En effet, l'expérience et l'usage ont communément admis que, pour la majorité des carrières souterraines de calcaire grossier de la région parisienne, les hauteurs de recouvrement permettent d'envisager, en général, pour ce type de construction, un ratio minimal de surface portante des piliers de 20%. L'utilisation de ce ratio, déterminé à partir de la surface du projet de construction, de laquelle peut être déduite la surface des étaux de masse ou des piliers existants lorsqu'ils sont en bon état, suppose une implantation uniformément répartie des piliers.

L'adoption de ce ratio demeure alors de la seule et entière responsabilité des acteurs à la construction qui doivent toujours s'assurer que ce ratio minimum garantit la fiabilité de la consolidation souterraine de la carrière.

1.5.2. Immeubles

On entend ici par immeuble tout ouvrage ne correspondant pas à la définition de construction individuelle (cf. § 1.5.1). Pour la construction de tels immeubles, on impose le recours à un **bureau de contrôle technique agréé** qui visera le dossier technique justificatif obligatoire comprenant les notes de dimensionnement établies par le maître d'œuvre. Ces visas devront obligatoirement être fournis dans le dossier final de récolement à remettre à l'Inspection Générale des Carrières en vue de l'obtention de la conformité (cf. §5.4).

1.5.3. Faible recouvrement

Pour des valeurs du recouvrement résiduel inférieures à 10 m, le dossier technique obligatoire justifiant le dimensionnement des ouvrages à réaliser devra être transmis à l'Inspection générale des carrières **avant exécution des travaux** avec le visa favorable d'un bureau de contrôle technique agréé. Ce dossier technique ne fera pas l'objet d'un visa de la part de l'Inspection générale des carrières.

2. Reconnaissance de sol préalable

2.1. Principe général

Une reconnaissance de sol doit obligatoirement être réalisée au droit du projet dans les limites de la parcelle en prenant en compte les éventuelles cartes des carrières souterraines.

Cette reconnaissance est effectuée par un géotechnicien missionné par le maître d'ouvrage. L'intervention du géotechnicien doit s'inscrire dans le cadre de la norme NFP 94 500 classifiant les missions géotechniques.

2.2. Objectifs de la reconnaissance de sols

La reconnaissance de sols a pour objet de préciser les points suivants :

- Caractéristiques des sols et de la nappe :
 - qualité des terrains de recouvrement (nature, caractéristiques mécaniques, épaisseur et qualité du ciel des carrières),
 - hauteur du recouvrement,
 - qualité du sol sous-jacent aux exploitations (nature et caractéristiques mécaniques),
 - niveaux piézométriques.
- Caractéristiques de la carrière :
 - extension géographique,
 - nombre d'étages exploités et épaisseurs des bancs séparatifs,
 - hauteur exploitée,
 - état et hauteur du remblaiement de la carrière,
 - présence éventuelle de fontis, ciels tombés, anciens puits...

2.3. Modes et moyens d'investigation

2.3.1. Moyens d'investigation in situ

La reconnaissance géotechnique en milieu sous miné par des carrières souterraines fait appel aux moyens d'investigation suivants :

- sondages destructifs avec enregistrement des paramètres de forage,
- sondages destructifs avec essais pressiométriques et enregistrement des paramètres de forage (NFP 94 110-1),
- sondages carottés.

Les enregistrements de paramètres de forage comprennent au minimum :

- la vitesse d'avancement de l'outil de forage,
- la pression sur l'outil de forage,
- la pression du fluide d'injection,
- le couple de rotation pourra éventuellement être fourni

Pour une bonne interprétation de ces enregistrements :

- la pression sur l'outil sera toujours réglée à une valeur constante,
- des tests de chute libre de l'outil de forage à différentes profondeurs seront obligatoirement réalisés.

2.3.2. Nombre de forages pour reconnaître la carrière

Le nombre de sondages à prévoir prend en compte les caractéristiques connues, ou à reconnaître, des carrières sous la parcelle. Ce nombre ne peut jamais être inférieur à 2.

Pour les parcelles de plus de 200 m², les sondages sont répartis comme suit :

- 1 tous les 200 m² au droit des constructions et voiries,
- 1 tous les 400 m² au droit des espaces verts non construits.

Les sondages doivent être en nombre suffisant pour permettre au géotechnicien de se prononcer sur l'ensemble des objectifs de la reconnaissance de sols (cf. §2.2) permettant ainsi le dimensionnement de l'ouvrage.

2.3.3. Autres moyens d'investigation

Les carrières accessibles doivent faire l'objet d'une visite par le géotechnicien dans le cadre de sa mission. Dans certains cas, une inspection vidéo peut compléter les informations recueillies par les sondages.

Il est de la responsabilité du géotechnicien de demander ces investigations complémentaires s'il les juge nécessaires.

2.4. Contenu du rapport d'étude géotechnique

Les investigations géotechniques font l'objet d'un rapport d'études rédigé par un géotechnicien dans le cadre d'une mission G12 selon la norme NFP 94 500.

Ce rapport constitue un des éléments obligatoires et indissociables constituant le dossier technique justificatif. Il se prononce notamment sur les solutions envisageables pour la consolidation des carrières souterraines et, en particulier, établit la faisabilité d'une solution de fondations superficielles associée à une consolidation des carrières souterraines par piliers maçonnés.

Ce rapport comprend notamment les emplacements des sondages (sur un plan de masse sur lequel figurent les constructions projetées), les coupes géologiques et les diagraphies des sondages réalisés, la description du matériel utilisé, la valeur de la vitesse à partir de laquelle un vide franc est décelé.

3. Dimensionnement

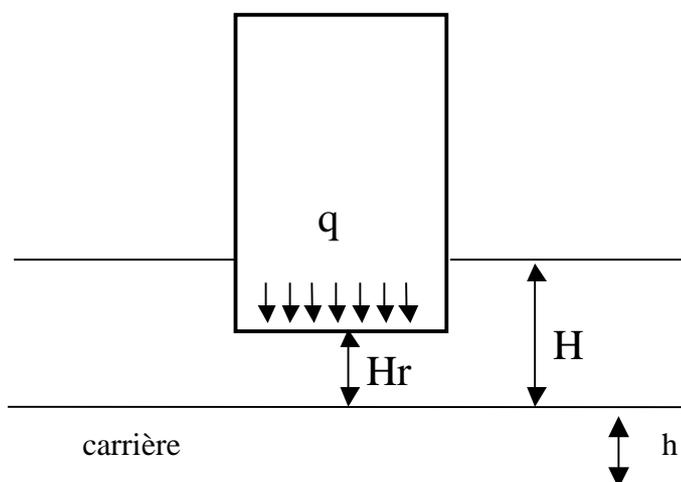
Le dossier technique justificatif du dimensionnement sera réalisé par un maître d'œuvre ayant une compétence géotechnique sur la base des données et hypothèses du rapport de sol (mission G2 ou équivalent). Ce calcul est de la responsabilité des acteurs à la construction et ne fera pas l'objet d'un visa de l'Inspection générale des carrières.

3.1. Principe de dimensionnement

Le dossier technique doit justifier le transfert de la totalité des charges sus-jacentes à la carrière au sol de cette carrière.

Dans les charges, on prend en compte la valeur σ_p la plus forte parmi :

- le poids des terrains de recouvrement avant tout terrassement $\gamma.H$
- le poids de l'ouvrage à construire et du recouvrement résiduel après terrassement ($\gamma.H_r + q$).



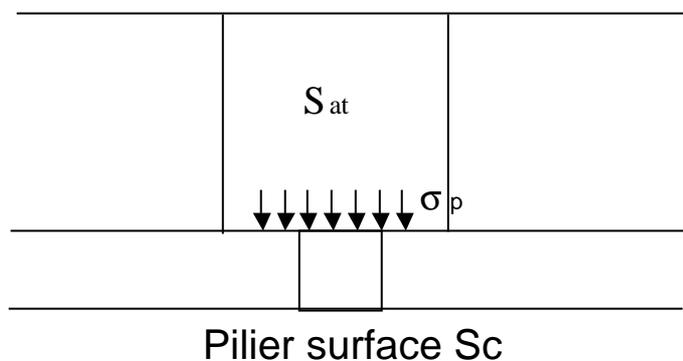
Le transfert de ces charges verticales est assuré par des piliers de consolidation régulièrement répartis selon le dimensionnement préalable. Ils sont exécutés dans un matériau adéquat sur la hauteur des carrières. La répartition des charges sur ces piliers doit être justifiée ainsi que l'absence de poinçonnement du ciel et du sol.

3.2. Surface des piliers S_c

Le calcul de la surface S_c de pilier doit prendre en compte :

- les charges verticales (voir ci-dessus),
- la contrainte admissible σ_c , contrainte de calcul issue de la résistance du matériau constituant le pilier ($R_c \times$ coefficient de sécurité). Ce paramètre sera défini au paragraphe 3.6

$$S_c = S_{at} \frac{\sigma_p}{\sigma_c}$$

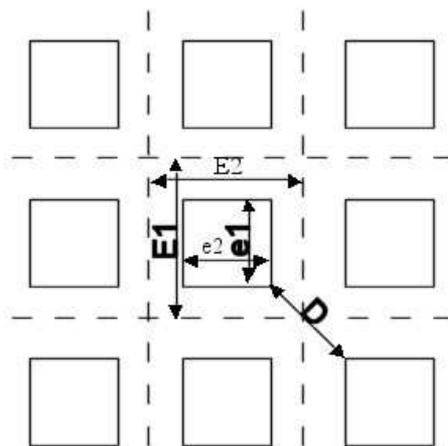


Cette modélisation correspond à la méthode dite de l'aire tributaire applicable dans l'hypothèse d'une carrière d'extension horizontale importante au regard du recouvrement et de la superficie du projet.

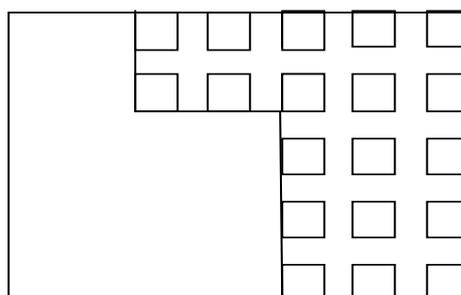
Aire tributaire S_{at} : $S_{at} = E_1 \times E_2$

Surface des piliers S_c : $S_c = e_1 \times e_2$

On notera que les piliers tournés induisent une diminution de l'aire tributaire et ne comptent pas dans la surface des piliers S_c .



En outre, les dimensions et l'implantation des piliers sont adaptées de façon que le nu extérieur des piliers inscrits dans la surface à consolider (= surface de l'ouvrage à construire) coïncide avec les limites de cet ouvrage.

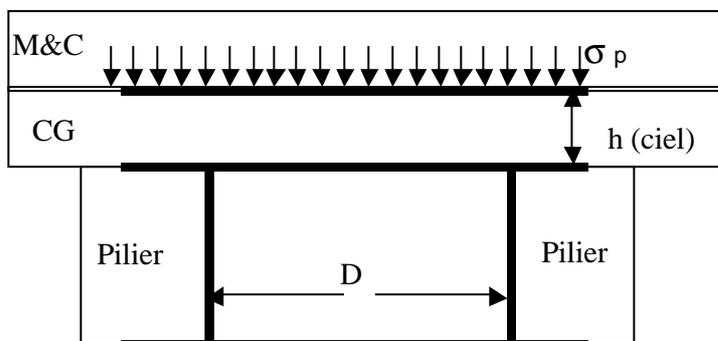


Le rapport surface totale des piliers / surface de l'ouvrage est appelé taux de consolidation.

3.3. Espacement des piliers

L'implantation et l'espacement des piliers doivent permettre de justifier le rôle de dalle de répartition des charges assuré par le ciel de la carrière de calcaire grossier. L'espacement, soit la diagonale D entre deux piliers, est déterminé par les caractéristiques de la dalle reposant sur les piliers qui reprennent la totalité des charges. Ce dimensionnement est établi par le maître d'œuvre à partir de l'hypothèse d'un fonctionnement mécanique du ciel, intermédiaire entre une voûte entre piliers et une plaque en flexion entre piliers.

Il convient de prendre en compte dans les hypothèses adoptées pour ces justifications le caractère en général discontinu et souvent fracturé du massif.

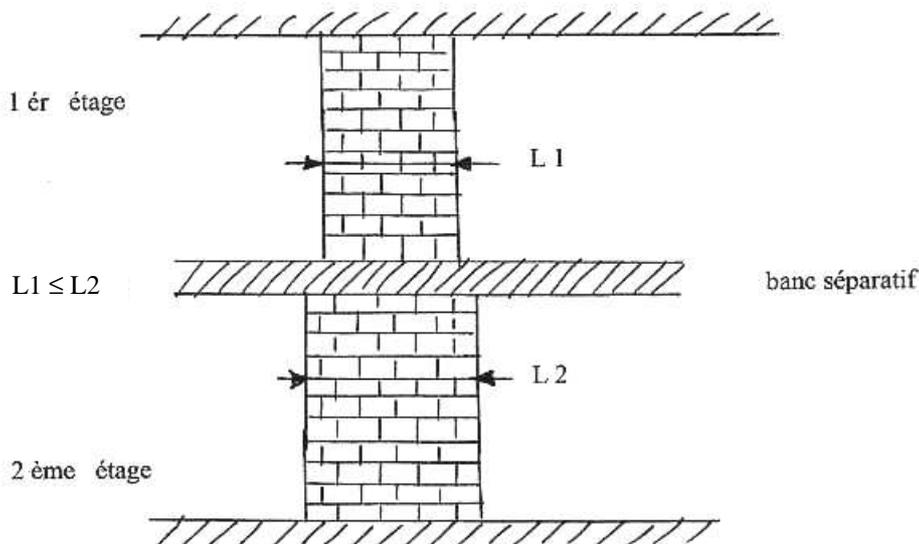


De manière usuelle, l'espacement D , soit la diagonale entre deux piliers, était au maximum de 4,50m. L'adoption de cette valeur est de la responsabilité du maître d'œuvre qui doit vérifier par le calcul qu'elle garantit l'efficacité de la consolidation.

3.4. Non poinçonnement du ciel et du sol

La section des piliers et les caractéristiques mécaniques du calcaire en place doivent permettre de justifier le non poinçonnement du ciel et du sol.

Dans le cas d'étages superposés, les piliers sont à l'aplomb l'un de l'autre et les dimensions du pilier de l'étage inférieur seront supérieures à celles du pilier de l'étage supérieur.



3.5. Non flambement du pilier

La section des piliers doit permettre de justifier le non flambement des piliers (vérification à l'élancement conformément aux règles du DTU 26.1. maçonnerie, notamment pour les carrières de grande hauteur).

Ainsi, de manière usuelle, le pilier a une dimension $e_1 \times e_2$ telle que :

- $e_1 > 1,20$ m et $e_2 > 1,20$ m
- $e_1 > h/3$ et $e_2 > h/3$ h est la hauteur de l'exploitation

L'adoption de ces valeurs est de la responsabilité du maître d'œuvre qui doit s'assurer que ces valeurs minimum garantissent l'efficacité de la consolidation.

3.6. Matériaux du pilier

Les matériaux pouvant être utilisés en carrière pour l'édification de maçonneries, sont ceux qui permettent d'obtenir in fine des soutènements capables de supporter une contrainte aussi bien dans le mortier constituant les joints que pour les pierres appareillées (meulières, moellons de calcaire, parpaings pleins en béton, béton).

3.6.1. Pierres naturelles : moellons de calcaire, meulières, ...

Les pierres employées pour la réalisation des piliers maçonnés devront avoir une résistance suffisante à la compression pour la reprise des sollicitations.

Cette résistance R (résistance en compression uniaxiale en valeur moyenne) sera déterminée en respectant les exigences et les conditions d'essais de la norme NFEN 1926 (méthode d'essai pour pierres naturelles qui remplace la norme NF 10-509) ou de la norme NFP 94420 de décembre 2000 (mécanique des roches). Le choix de l'une ou l'autre de ces normes d'essais est de la responsabilité du maître d'œuvre et devra dépendre notamment des conditions de saturation en eau de la carrière et des piliers maçonnés.

La contrainte admissible à long terme dans les pierres naturelles aura la valeur suivante : $\sigma_c \leq R/3$; R étant obtenue sur la base d'un échantillon d'au moins 6 éprouvettes, sous la responsabilité du maître d'œuvre.

On note que la valeur inférieure de la résistance à la compression des moellons devra être supérieure à 6 MPa.. $R \geq 6$ MPa

3.6.2. Joints

Le mortier utilisé pour les joints devra présenter une résistance à la compression supérieure à celle des moellons : $R_{\text{mortier}} > R_{\text{moellons}}$

Cette résistance est obtenue sur un échantillon de 6 éprouvettes.

Par analogie avec les dispositions pour les moellons, il s'ensuit :

$$R_{\text{mortier}} \geq 6 \text{ MPa et } \sigma_{\text{mortier}} \geq 2 \text{ MPa}$$

L'épaisseur des joints réalisés avec un tel mortier ne pourra être supérieure à 4 cm en moyenne avec une valeur maximale de 6 cm.

Le matage en ciel devra faire l'objet d'une note technique d'exécution validée par le Bureau de contrôle.

3.6.3. Parpaings pleins

Les parpaings pleins réalisés avec un ciment normalisé résistant aux eaux agressives et séléniteuses seront admis. Un justificatif des résistances à la compression émis par un laboratoire d'essais des matériaux agréé COFRAC, sera produit par l'entreprise.

Le mortier des joints respectera la même règle que pour les pierres naturelles :
 $R_{\text{mortier}} \geq R_{\text{parpaings}} \geq 6 \text{ MPa}$

3.6.4. Béton

Bien que peu courante en carrière, cette solution justifiée par une note de calcul précisera la mise en charge au niveau du ciel. Le montage du pilier et le matage en ciel devront faire l'objet d'une note technique d'exécution validée par le bureau de contrôle.

On appliquera les règles du DTU 13-1 (et BAEL 91 quand le béton sera armé)

Les carrières protégées au titre des monuments historiques imposent pour les piliers en parpaings et en béton un habillage de pierres calcaires toute hauteur.

3.7. Autres types de consolidations maçonnées

3.7.1. Consolidation par voûtes maçonnées ou par ossature béton armé

Pour certaines carrières de très grande hauteur, il peut être plus intéressant d'envisager la consolidation au moyen de voûtes maçonnées ou de portiques en béton armé.

Dans ce cas, le Maître d'œuvre établit dans le cadre du dossier technique justificatif une étude détaillée comprenant une note de calcul complète de dimensionnement des ouvrages et les plans d'exécution correspondants établis par l'entreprise.

Cette technique particulière doit garantir le même niveau de consolidation que la technique de base. Un dossier technique justificatif établi par le Maître d'œuvre est obligatoirement remis à l'Inspection générale des Carrières avant exécution des travaux et comporte la note de calcul justificative visée par le bureau de contrôle technique agréé s'il est missionné à cet effet.

3.7.2. Dérogation à l'uniforme répartition des piliers

Lorsque la construction projetée se situe en partie sur la masse, il pourra être proposé une répartition différente des piliers prenant en compte cet aspect particulier. Dans ce cas, le dossier technique justificatif doit fournir un plan d'implantation spécifique visé par le maître d'œuvre.

4. Mise en œuvre

4.1. Généralités

Toutes les consolidations doivent toujours être fondées sur le calcaire sain et d'une manière générale au bon sol.

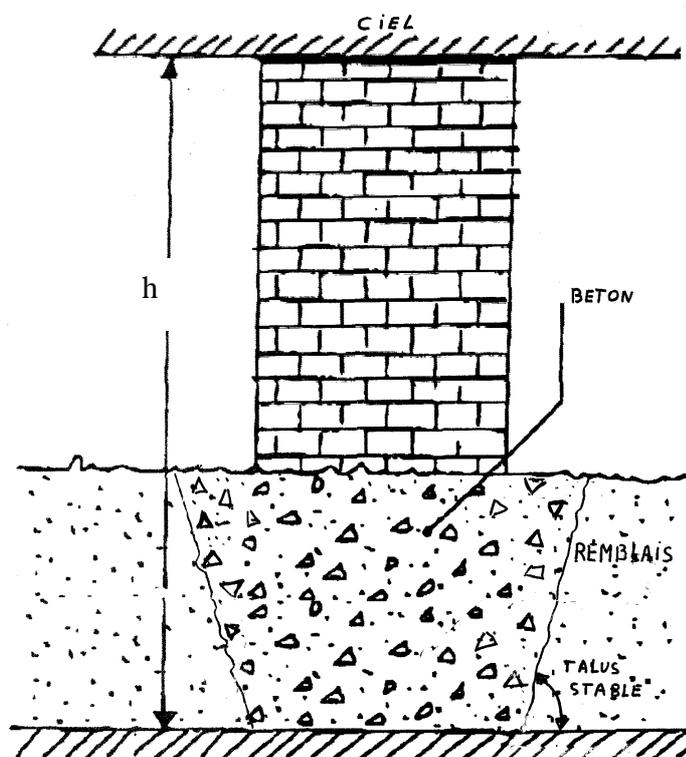
Si la Maîtrise d'Oeuvre en fait la demande, il appartiendra au Géotechnicien de fournir un avis sur l'assise du pilier en pied de carrière, dans le cadre de sa mission normalisée.

En particulier, toute présence de bourrage de « bousin » ou de coulis parasité (filet tendre marneux ou argileux de 0,10 à 0,50 m d'épaisseur situé entre deux bancs calcaires) doit être impérativement éliminée à l'emplacement de l'édification des consolidations.

Dans tous les cas, la résistance du sol et du ciel de carrière doit être caractérisée ; si l'on doute que sa résistance atteigne la valeur requise, des prélèvements suivis d'essais en laboratoire doivent être réalisés ; si la résistance du sol ou du ciel est inférieure à la valeur requise, les valeurs minimales doivent être modifiées en conséquence.

4.2. Cas de remblais important en pied de carrière

Dans le cas d'une hauteur de remblais importante en pied de carrière (3 à 4 m pour une hauteur d'exploitation de 8 m par exemple), une solution mixte est admise. Elle consiste à creuser les remblais selon la forme des piliers à édifier jusqu'au calcaire, à bétonner cette fouille ainsi créée, puis à élever le reste en maçonnerie jusqu'au ciel de la carrière. Dans ce cas, la partie bétonnée est, et doit restée, frettée par les bourrages sauf justification au flambement de cette structure mixte.



4.3. Constitution des piliers maçonnés

Les piliers doivent être soigneusement appareillés sur toute leur section, en particulier le remplissage du centre du pilier avec des moellons en vrac est strictement interdit.

Les moellons sont hourdés au mortier de ciment, résistant aux eaux séléniteuses. Le dosage du mortier doit garantir la résistance minimale exigée au §3.6.2.

Le matage entre la partie supérieure des piliers et le ciel doit être réalisé correctement.

Une attention toute particulière doit être exercée par l'entrepreneur qui exécute ce travail pour que le matage soit aussi parfait que possible, en ne laissant subsister aucun vide entre le moellon et le ciel de la carrière sur toute la surface du pilier afin que la transmission des efforts soit totale.

4.4. Bourrage des vides

En règle générale, le bourrage entre les piliers (en terre ou en sablon) est facultatif. Il n'est normalement pas nécessaire dès lors que le dimensionnement des consolidations maçonnées (section et espacement) est correctement effectué.

4.5. Fontis, ciels tombés, anciens puits

Les fontis (effondrement des terrains sus-jacents à la carrière), et les ciels tombés existant sous la propriété à consolider doivent être bloqués et ceinturés.

La ceinture de maçonnerie doit suivre autant que possible le contour du désordre visible en carrière et doit avoir une épaisseur égale au minimum au 1/3 de la hauteur d'exploitation avec un minimum de 0,50 m.

Les matériaux et éboulis des fontis sont consolidés, conformément aux règles minimales de la notice technique de consolidation par injection du 15 janvier 2003.

L'ensemble de ces opérations s'effectue à partir de forages réalisés depuis la surface. Les mortiers et coulis doivent être parfaitement homogènes et ne contenir que la quantité d'eau strictement nécessaire.

Les anciens puits d'extraction ou les anciens puits de service rencontrés dans les travaux sous la partie bâtie ainsi que les « puits servant de fondations profondes », en traversant la hauteur de la carrière, sont ceinturés en maçonnerie avec les mêmes règles d'épaisseur que pour les puits d'accès créés ou que pour les fontis et ciels tombés décrits plus haut.

4.6. Fouille descendue en pied de carrière

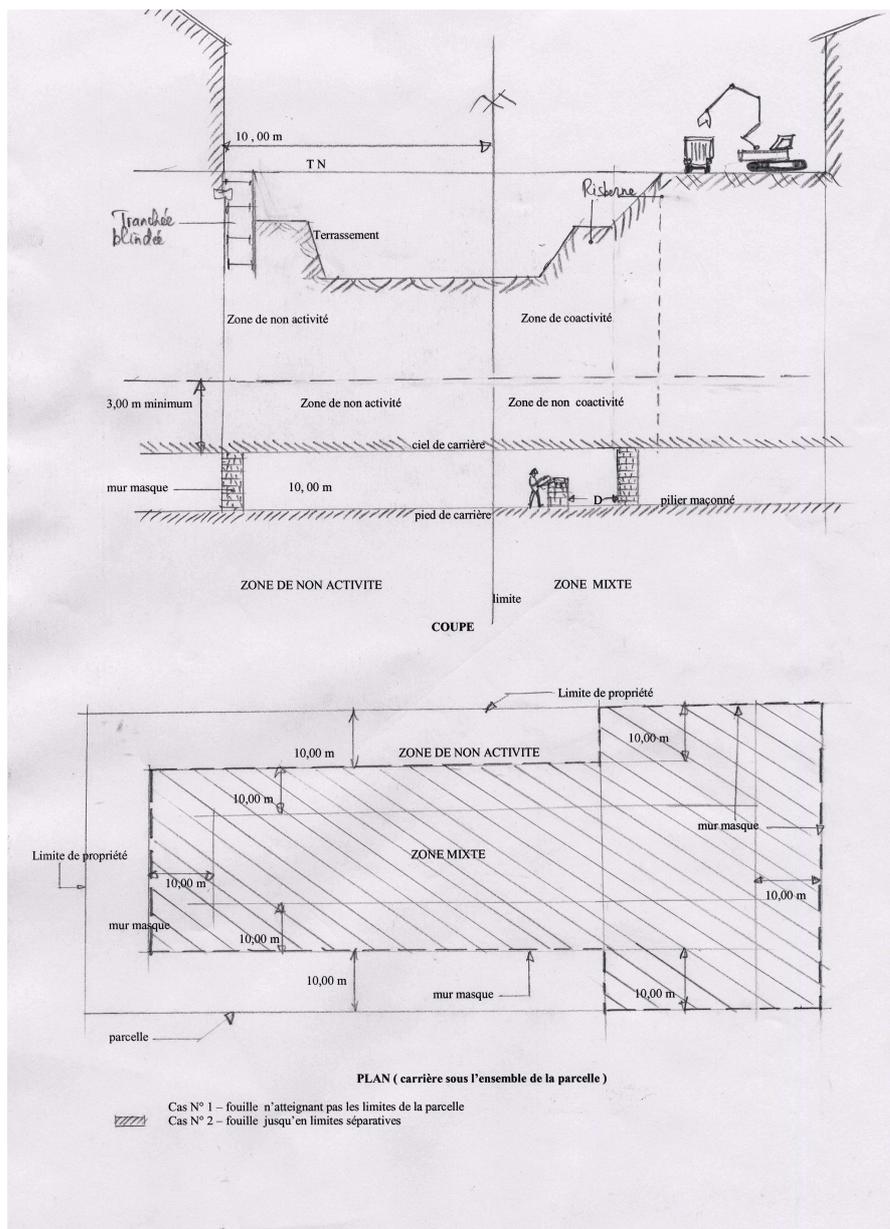
Dans certains cas, les sous-sols de bâtiment peuvent atteindre le sol de la carrière (pied) ; ainsi, le bâtiment est fondé sur le calcaire en place.

Dans le cas où la fouille descend jusqu'au pied de carrière, le ciel de celle-ci doit être soutenu, en périphérie, par un épaulement maçonné appelé, « mur-masque » exécuté avec les matériaux mentionnés au chapitre précédent, dont l'épaisseur est égale au minimum au 1/3 de la hauteur d'exploitation, avec un minimum de 0,50 m.

La réalisation d'un « mur-masque » en béton résistant aux eaux séléniteuses peut être autorisée par l'Inspection générale des Carrières, sur le vu d'une note de calculs et avec l'accord d'un Bureau de contrôle si il est mandaté pour le chantier.

Le « mur-masque » doit être obligatoirement désolidarisé du voile de l'ouvrage à construire et parfaitement maté au ciel de carrière.

Le mur masque qui soutient les terrains de la propriété voisine, doit être réalisé avant que les terrassements n'atteignent les 3 mètres au-dessus du ciel de carrière reconnu.



En particulier, si un ciel effondré s'appuie sur les bourrages rendant dans ce cas le terrassement dangereux, l'épaulement peut éventuellement ne pas être réalisé pour des raisons de sécurité pour les ouvriers. Ce secteur est alors conforté par tout autre moyen adéquat : injection sous pression selon la notice de l'IGC en date du 15 janvier 2003 relative aux consolidations souterraines ou autres dispositions à soumettre à l'agrément du Maître d'œuvre.

4.7. Puits

4.7.1. Puits d'accès ou de service

Pour accéder au niveau des vides de carrière à consolider, et à défaut d'entrée en cavage, un certain nombre de puits de service doit être foncé permettant la descente du personnel, du matériel et des matériaux servant à la consolidation.

Lorsqu'un puits doit être réalisé en bordure de masse répertoriée sur la carte des carrières, il est recommandé d'exécuter au préalable un forage de reconnaissance afin d'optimiser l'implantation du puits pour atteindre et reconnaître la carrière. En cas de résultat contradictoire par rapport aux informations fournies par la carte, il convient de réimplanter un forage destructif complémentaire permettant de confirmer les caractéristiques exactes de la carrière.

Pour une construction individuelle à consolider, le fonçage d'un seul puits d'accès est en général suffisant.

Pour une construction collective, deux puits, voire plus, sont bien souvent nécessaires. Leur espacement est habituellement de 40 mètres environ, de façon à limiter les roulages souterrains de terre et matériels à 20 mètres maximum, sauf en cas d'utilisation de wagonnets.

Les puits d'accès sont souvent circulaires de 1,30 m à 1,60 m de diamètre, parfois de grande section rectangulaire pour faciliter le passage de bennes de capacité importante et de matériel encombrant.

L'implantation des puits tient compte des renseignements déjà connus (carrières cartographiées sur l'Atlas au 1/1000^{ème} de l'Inspection Générale des Carrières) ou des présomptions en ce qui concerne la présence de galeries vides.

Les puits de service sont normalement exécutés à la main par des ouvriers qualifiés afin de ne pas créer de désordre dans la carrière sous-jacente au fonçage.

Les puits sont blindés en planches jointives sur toute leur hauteur, maintenues par des cerces métalliques serrées à force à l'aide de coins.

Des précautions particulières doivent être prises, lors du fonçage et notamment lors du percement dans la carrière, pour vérifier l'éventuelle présence de gaz nocifs, et s'en affranchir.

Il n'est cependant pas exclu que les puits puissent être forés avec des foreuses à pieux permettant la réalisation de forages en gros diamètres ; dans ce cas, le blindage s'effectue à l'aide de tubages métalliques suffisamment résistants pour s'opposer à la pression des terrains. Le forage doit impérativement être arrêté au-dessus du ciel de la carrière ; la fin du puits étant réalisée à la main pour préserver l'état du ciel.

Afin de préserver l'intégrité de la carrière, elle devra être correctement étayée aux abords des débouchés des puits dès la fin du perçage.

A la fin des travaux de consolidation les puits de service doivent être ceinturés et comblés.

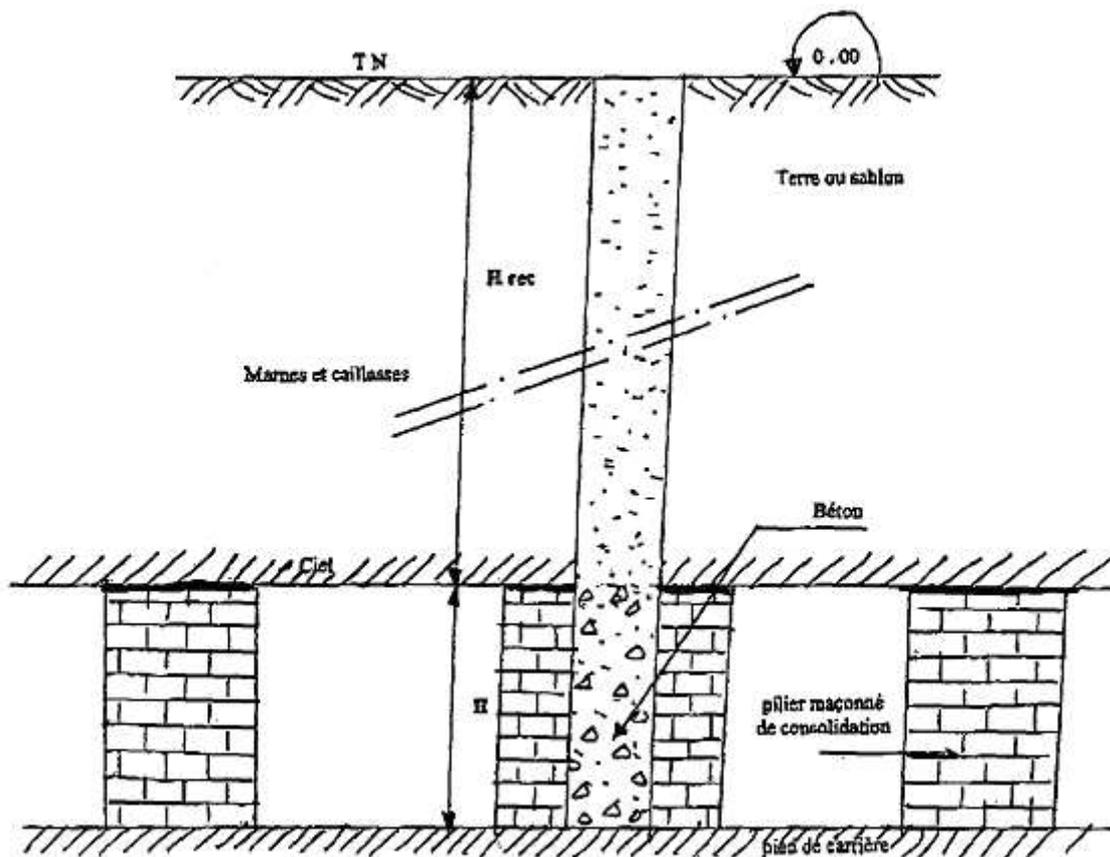
Cette ceinture réalisée en maçonnerie est fondée sur le bon sol (calcaire) et son épaisseur est égale au minimum au 1/3 de la hauteur de la galerie où est érigé cet ouvrage avec un minimum de 0,50 m d'épaisseur.

Cette ceinture a pour but d'épauler la découpe du ciel de carrière effectuée lors du fonçage du puits et doit résister à la pression du remblai de comblement du puits.

Après un temps de prise suffisant de la ceinture, le puits est comblé en terre exempte de débris végétaux ou organiques, ou en sablon, (par passes de 0,50 m compactés à la main ou par engin de damage, ou de façon hydraulique), ou en béton maigre au dosage de 150 kg de ciment résistant aux eaux séléniteuses, par mètre cube de granulats mis en place par tous moyens évitant la ségrégation des granulats, ou par toute autre méthode donnant des résultats équivalents.

On peut adopter parfois une solution mixte : béton maigre jusqu'au ciel de carrière, puis terre ou sablon, mais jamais l'inverse, pour ne pas créer de bouchon suspendu.

Si un puits est situé dans l'emprise de la zone à construire, il sera ceinturé, comblé, éventuellement traité. Les fondations superficielles seront adaptées à la présence de puits en réalisant un pontage.



4.7.2. Sécurité des puits

D'une manière générale, la réalisation des puits doit être conforme en tous points à la législation du Code du travail en vigueur et relative à la sécurité des personnes (protection, élinguage, double sécurité des treuils, acheminement des matériaux et descente des ouvriers, etc. ...).

Les acteurs à la construction se reporteront en particulier au décret du 8/01/1965 — titre 5 — article 43 (et 44 abrogé par l'arrêté 98-1084 du 2/12/2002 N° 2002 / 1404).

Il appartient à l'Entreprise d'effectuer toutes les démarches et actions nécessaires auprès des autorités compétentes pour obtenir les autorisations nécessaires et garantir la sécurité des personnes.

Les recommandations énoncées ci-après ne sauraient être considérées comme des règles minimales suffisantes. Le caractère non exhaustif de cette énonciation entraîne de fait, qu'en aucun cas, l'Entreprise ne saurait s'exonérer de ses responsabilités vis-à-vis de la sécurité des biens et des personnes.

Un garde-corps rigide doit être installé par l'Entreprise exécutant les travaux souterrains autour de chaque puits de service pour éviter les chutes accidentelles de toute personne présente sur le chantier

Ce garde-corps doit répondre aux règles de sécurité en vigueur prévues par le code du travail avec présence d'une lisse et d'une sous-lisse ainsi que d'une plinthe de 0,15 m minimum située au-dessus du sol et pouvant être constituée par les planches de blindage, cette dernière ayant pour rôle d'éviter les chutes d'objets dans les puits.

Les recettes autour des puits doivent être aménagées de telle sorte que les ouvriers préposés aux opérations de chargement et de déchargement ne soient pas obligés, pour tirer la charge, de se pencher au-dessus du vide.

La descente en carrière au moyen d'un seau est rigoureusement interdite. Les dispositions de l'arrêté du 2 décembre 1998 fixant les conditions auxquelles doivent satisfaire les équipements de levage de charge pour pouvoir être utilisés pour le levage de personnes doivent être strictement respectées par l'entreprise.

De plus, l'éclairage électrique utilisé en carrière doit être conforme à celui permis par la réglementation du travail pour l'utilisation en milieux humides. Un éclairage de secours doit être prévu (lampes portatives électriques ou à acétylène par exemple).

4.7.3. Descente par les puits

Les dispositions des articles 44 et 45 du décret n° 65-48 du 8 janvier 1965, portant règlement d'administration publique pour l'exécution des dispositions du livre II du code de travail doivent être respectées.

Pour les descentes en carrière par les agents de l'Inspection Générale des Carrières devant inspecter les travaux de consolidations souterraines durant le chantier, la nacelle conforme doit être mise à disposition par l'Entreprise effectuant les travaux souterrains. Cette nacelle doit être accessible depuis le niveau TN sans dénivellation.

D'une manière générale, il est de la responsabilité de l'Entreprise de mettre à disposition des agents de l'Inspection Générale des Carrières tous matériels conformes aux normes de sécurité en vigueur, leur assurant toutes les conditions de sécurité indispensables à l'exercice de leur mission de contrôle du respect de la mise en application de la prescription de consolidation du Permis de Construire.

Une personne de l'Entreprise doit être constamment présente en surface pour la manœuvre du treuil mû mécaniquement tant qu'il y a des personnes dans les galeries souterraines ou au fond d'un puits (cf. Code du travail).

L'Inspection Générale des Carrières recommande vivement aux Entreprises effectuant ces travaux, d'installer un moyen de communication mobile (type généphone par exemple) entre le personnel travaillant en carrière et celui qui reste en surface.

L'Inspection Générale des Carrières rappelle que conformément au code du travail, le matériel - et plus particulièrement les treuils - les engins, les installations et les dispositifs de protection de toute nature utilisés sur un chantier (stop chutes, etc. ...) doivent, avant leur mise ou remise en service, être examinés ou vérifiés par les soins d'un organisme de contrôle agréé.

Les résultats sont consignés sur un registre dit « registre de sécurité » qui doit être conservé sur le chantier ou en cas d'impossibilité au siège de l'entreprise.

En cas de doute sur l'état d'un treuil et ses accessoires avant la descente, tout locateur de l'ouvrage ou l'agent de l'Inspection Générale des Carrières peut demander à l'Entreprise à consulter ce registre qui prouve que le treuil est en bon état de marche et conforme aux décrets en vigueur sur les vérifications réglementaires.

En cas de panne prolongée du treuil principal, l'Entreprise doit pouvoir assurer la remontée du personnel encore en carrière à l'aide d'un débrayage en mode manuel ou d'un treuil de secours.

4.8. Chronologie des travaux

Les travaux de consolidation précèdent toujours les travaux de superstructure, et la co-activité verticale avec un recul minimum de 10 à 15 m sur la parcelle, au droit des travaux prévus, est strictement encadrée et régie par les dépositions de la loi N° 14-18 du 02 décembre 1993 relative à la Sécurité Santé SPS. Cette disposition peut permettre un phasage des travaux de consolidation du sous-sol et d'activité en surface dans le cas de grande parcelle.

Lors d'opération de construction comportant des travaux d'infrastructure pour la réalisation de sous-sols, la consolidation préalable de la carrière souterraine doit obligatoirement être effectuée avant la réalisation des parois de soutènement.

Quand l'infrastructure traverse la carrière et nécessite la mise en œuvre de murs masque, la confortation devra se faire avant tout terrassement. Dans l'éventualité où l'étude géotechnique montre le bon état de la carrière, les travaux de terrassement pourront être engagés avec une planche résiduelle dont l'épaisseur sera déterminée par le Géotechnicien pour un minimum de 3 m sans co-activité verticale sur un recul de 10 m.

De même, la consolidation préalable de la carrière souterraine doit être effectuée avant démarrage de tous travaux de démolition sur la parcelle au droit du projet à consolider sauf si la mission géotechnique préalable a conclu à la possibilité de déroger à cette règle générale.

Toute dérogation à ces règles générales devra être soumise pour accord préalable au coordonnateur SPS.

5. Constat de bonne fin de travaux

L'efficacité des travaux prescrits et exécutés doit être garantie et vérifiée par des opérations de contrôle rigoureuses.

5.1. Responsabilités

La responsabilité du constat de bonne fin des travaux et du contrôle de la qualité d'exécution des travaux relève entièrement et uniquement de la maîtrise d'œuvre, de l'entreprise réalisant les travaux, du géotechnicien et, le cas échéant, d'un bureau de contrôle technique. Dans certains cas, il pourra s'avérer nécessaire de confier au géotechnicien une mission de suivi d'exécution de type G4 conforme à la norme NFP 94 – 500.

La mission de contrôle exercée par l'Inspection générale des Carrières, en tant que conseil et expert technique au service du Maire ayant autorité pour la délivrance du Permis de Construire, se limite à s'assurer du respect de l'application effective de la prescription qui constitue un des supports du Permis de Construire formant un tout indivisible.

Il s'en suit que le contrôle exercé par l'Inspection générale des Carrières, ne constitue en aucun cas un acte de maîtrise d'œuvre. Son rôle se limite à constater in fine la réalisation de la prescription, attestée par la remise du dossier de récolement des travaux exécutés.

C'est dans ce contexte qu'en cours d'exécution des travaux, des passages inopinés des contrôleurs réglementaires de l'IGC permettent de contrôler la mise en application de la prescription et la conformité des travaux aux règles minimales de la présente notice technique.

5.2. Relevé des travaux exécutés – Plan de récolement

Le relevé obligatoire des piliers de consolidation et de la carrière sous le projet doit se faire au fur et à mesure de l'avancement du chantier par un levé topographique effectué par l'Entreprise si cette dernière possède un personnel qualifié à cet effet ou par un géomètre DPLG ou similaire.

Le relevé réalisé à la planchette et à l'alidade est considéré comme levé topographique.

Le relevé est exécuté en carrière et porté sur une minute d'avancement. Le contrôleur réglementaire de l'Inspection Générale des Carrières peut exiger à tout moment la production de la minute d'avancement.

La minute d'avancement établie par l'Entreprise ou le géomètre est validée au fur et à mesure par le Maître d'Ouvrage, l'Architecte et/ou le Bureau de Contrôle suivant les missions confiées aux intervenants ci-dessus par le Maître de l'Ouvrage.

5.3. Opérations de contrôle

Dans le cadre de sa mission, le maître d'œuvre est responsable du contrôle de la bonne exécution des travaux et notamment du respect des règles minimales de la notice. Il devra donc attester, par un certificat qui sera obligatoirement inséré dans le dossier de récolement (cf. §5.4), qu'il a procédé aux opérations de contrôle garantissant la bonne exécution des travaux et l'efficacité de la consolidation.

Si, à l'occasion d'un passage sur le chantier, un contrôleur réglementaire de l'IGC constate un problème, l'IGC prévient alors le maître d'œuvre dans un délai de 2 jours ouvrés sur la base d'un procès verbal qu'elle établit, avec copie pour information au maître d'ouvrage.

Si le maître d'œuvre ne prend pas les dispositions immédiates pour faire corriger l'anomalie constatée dans un délai de 8 jours ouvrés, l'Inspection générale des carrières peut demander des contrôles complémentaires dont l'organisation, la gestion et la responsabilité incombera au maître d'œuvre.

Le maître d'œuvre informera alors l'Inspection générale des carrières de la correction effectuée qui aura fait l'objet d'un procès verbal contradictoire établi et signé par le maître d'œuvre, l'entreprise, le bureau de contrôle technique s'il est missionné dans l'opération, en présence éventuelle de l'Inspection générale des carrières.

L'Inspection générale des carrières informera alors le maître d'ouvrage du respect de la prescription en conformité avec les règles minimales de la notice.

L'ensemble de cette procédure de contrôle complémentaire sera insérée dans le dossier de récolement.

5.4. Dossier de récolement des travaux

Le dossier de récolement comprend les plans exacts d'implantation et les travaux confortatifs exécutés aux échelles de 1/200^{ème}, 1/100^{ème}, ou 1/50^{ème} auxquels sont annexés la coupe géologique des puits avec cotes d'altitude ainsi que tous renseignements utiles où sont repérés sans ambiguïté les rues et/ou immeubles voisins. La minute d'avancement mise à jour en fin de travaux est également jointe au dossier de récolement. Ces documents sont datés, signés et certifiés conformes par l'Entreprise responsable des travaux et visés par le Contrôleur Technique, l'Architecte ou le Maître d'œuvre suivant les missions confiées à ces intervenants.

Le dossier de récolement comprend également les éléments suivants :

- dossier technique justificatif du dimensionnement de la consolidation maçonnée,
- résultats des essais d'écrasement des pierres et mortier d'assemblage employés sur le chantier (voir chapitre correspondant),
- constats, compte-rendu de visite et reportage photographique éventuels,
- certificat du maître d'œuvre garantissant l'effectivité des opérations de contrôle (cf. § 5.3),
- le cas échéant, procédure de contrôle complémentaire (cf. § 5.3).

Le dossier complet est adressé par le maître d'œuvre au maître d'ouvrage ou son représentant. En tant que titulaire du permis de construire, c'est ensuite essentiellement au maître d'ouvrage ou son représentant qu'il appartient d'adresser le dossier de récolement à l'Inspection générale des Carrières.

Suite à ce dépôt, l'Inspection générale des Carrières délivre au maître d'ouvrage ou son représentant bénéficiaire du permis de construire assorti de la prescription obligatoire de consolidation souterraine par piliers maçonnés, un « récépissé de dépôt de dossier de récolement » lui permettant d'obtenir la conformité du Permis de Construire ; une copie sera adressée à l'entreprise.

6. Changement de prescription

Après la prescription par l'IGC de consolidations souterraines par piliers maçonnés, des éléments nouveaux peuvent être découverts par les acteurs à la construction, en particulier lors du

forage du puits d'accès ou lors de l'accès à la carrière souterraine. Si ces éléments nouveaux d'information n'avaient pas pu être pris en compte par l'IGC lors de l'établissement de sa prescription, il est possible de proposer une technique de consolidation de la parcelle par injection conformément à la notice IGC du 15 janvier 2003. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de produire de dossier technique de changement de prescription à transmettre au service instructeur de la Mairie sous forme de recours gracieux ou de demande de permis modificatif.

Les conditions spécifiques suffisantes pour permettre de substituer la consolidation par injection à la consolidation par piliers maçonnés sont les suivantes :

- épaisseur du ciel de la carrière trop faible par rapport à l'épaisseur présumée initialement
- déflexion caractérisée du ciel de la carrière
- nombreux effondrements localisés du ciel
- fracturation très importante du ciel
- nombreux fontis non répertoriés initialement
- galeries initialement présumées vides qui s'avèrent remblayées sur toute hauteur
- hauteur de la carrière inférieure à 1,20 m.
- présence d'eau en quantité telle que la mise en œuvre des piliers est impossible
- présence de gaz nocifs
- état de consolidation des remblaiements existants très élevé imposant leur enlèvement au marteau piqueur, confirmé par des sondages pressiométriques attestant de la surconsolidation ($P_i \geq 0,6 \text{ Mpa}$)

Il appartient aux acteurs à la construction de faire constater au moins un de ces cas dans les meilleurs délais par l'Inspection générale des Carrières pour l'informer de l'existence de cet élément nouveau justifiant de substituer la consolidation par injection à la consolidation par piliers maçonnés. D'autres cas non répertoriés dans cette liste pourront éventuellement justifier une saisine de l'Inspection générale des Carrières.

L'Inspection générale des Carrières procède alors à un constat contradictoire sur place en présence obligatoire du maître d'œuvre et d'un bureau de contrôle technique missionné spécifiquement par le maître d'ouvrage pour émettre un avis sur cette demande de changement de prescription. Un procès verbal contradictoire est alors établi, signé par le maître d'ouvrage, le maître d'œuvre, le bureau de contrôle technique et l'Inspection générale des Carrières. Il vaut accord sur le changement de la prescription qui est alors notifié par l'Inspection générale des Carrières au maître d'ouvrage et au service instructeur de la Mairie.

