

Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : Surveillance - Traitement

lire le rapport depuis le début

accès direct — cavités et aléa
maîtriser le risque
surveiller

remédier — consolider
comblé
supprimer les vides
protection passive
critères de choix

utilitaires — liens internet
résumé
fiches de synthèse
glossaire

rechercher (rapport et fiches)



Guide technique

Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique Surveillance - Traitement

Jean-Jacques TRITSCH – Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol (DRS)

Largement réparties sur le territoire national, les cavités souterraines creusées par l'homme, grottes, carrières abandonnées, habitations troglodytiques, refuges souterrains, sapes de guerre, etc., constituent un problème préoccupant pour de nombreuses communes du fait de leur concentration et du caractère inéluctable de leur dégradation. Des accidents ou incidents liés à l'instabilité de ces ouvrages se produisent régulièrement, particulièrement préoccupants lorsqu'ils affectent des zones fortement urbanisées ou à leur périphérie. Les vides du sous-sol constituent donc une source de danger potentiel pour les personnes et pour les biens. Ils peuvent induire des contraintes fortes en termes d'aménagement et de développement urbain.

Il appartient à l'Etat et aux maires des communes, de porter à la connaissance des citoyens l'information sur les risques existants auxquels ils sont soumis dans certaines zones du territoire et sur les mesures de sauvegarde qui les concernent, conformément à l'article L125-2 du Code de l'Environnement. Dans les communes disposant d'un plan de prévention des risques naturels prévisibles (PPRN), le maire informe la population régulièrement sur la nature des risques, les mesures de prévention possibles et les dispositions prises par la commune pour gérer le risque. Cette information est délivrée avec l'aide des services de l'Etat compétents, dans le cadre des mesures prises en application de la loi n° 87-565 du 22 juillet 1987.

Il apparaît, dès lors essentiel de proposer aux collectivités, aux entreprises et aux habitants des méthodes adaptées et économiquement viables, permettant de garantir la sauvegarde des populations menacées par les phénomènes d'instabilité du sol induits par la présence d'anciennes carrières souterraines abandonnées.

Elles reposent sur la meilleure connaissance possible des phénomènes physiques et des techniques disponibles permettant de mettre le site en sécurité, provisoirement ou définitivement.

Afin de préciser les conditions et les limites d'utilisation de ces méthodes, il a paru opportun à la Direction de la prévention des pollutions et des risques (DPPR) du Ministère de l'Ecologie et de Développement et L'Aménagement Durable (MEDA) de confier à l'Institut de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS) la réalisation d'un guide relatif aux méthodes de mise en sécurité des populations face au risque d'effondrement de cavités souterraines. Ceci constitue l'objet du présent guide, réalisé notamment à l'attention des bureaux d'études, des experts, des maîtres d'œuvre ou des gestionnaires d'ouvrages concernés. Il traite plus particulièrement des anciennes carrières souterraines aujourd'hui abandonnées.

En principe limité à la mise en sécurité des personnes et du bâti existant, ce guide fournit également quelques informations utiles visant les constructions nouvelles. En revanche, il ne traite pas des dispositions préventives réglementaires, comme l'interdiction d'accès ou l'évacuation, assorties ou non de mesures d'indemnisation, prises en cas de péril imminent.

Qu'il s'agisse d'inspection, de surveillance, de comblement, d'injection de coulis, ou d'abattage avec suppression des vides, l'analyse comparée des méthodes de traitement présentée dans ce guide repose sur des critères à la fois techniques, pratiques et économiques.

La méthodologie développée dans ce document de synthèse procède d'une démarche qui n'est qu'indicative et qui vise à sensibiliser les personnes, responsables locaux ou membres d'associations, confrontés à ces risques, en leur apportant des connaissances de base relatives aux principes généraux de choix. Elle ne se substitue donc pas aux obligations réglementaires s'appliquant aux pratiques techniques, aux objectifs de sécurité visés, ou à la destination des ouvrages.

Le guide est un ouvrage de 120 pages abondamment illustré et complété par 2 annexes. Il rappelle les différents aléas de mouvements des terrains associés aux cavités souterraines. Ensuite, il aborde la maîtrise de risques : reconnaissances et prévention. Une place est réservée aux différents techniques d'auscultation et de surveillance. La partie principale du guide est consacrée aux techniques de consolidation et des comblement (total et partiel) des cavités souterraines. Le guide présente pour chaque méthode de traitement : techniques, principe et rôle, mise en œuvre, performances, domaine d'utilisation, avantages et inconvénients et en fin aspects économiques. 11 fiches synthétiques des principales méthodes de traitement sont également disponibles ainsi qu'un glossaire qui donne les définitions de principaux termes techniques utilisés dans ce guide.

RAPPORT D'ÉTUDE

15/02/2007

INERIS-DRS-07-86042-02484A

**Mise en sécurité des cavités souterraines
d'origine anthropique : Surveillance - traitement**

Guide technique

Programme EAT-DRS-02

Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : Surveillance - traitement

Guide technique

Programme EAT-DRS-02

Ministère de l'Écologie et du Développement Durable

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	J.-J. TRITSCH	C. DIDIER	M. GHOREYCHI
Qualité	Responsable d'études et de Recherches, Délégué Expertise et Appui Technique à l'Administration	Directeur adjoint des Risques du Sol et du Sous-sol, Délégué scientifique	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

TABLE DES MATIERES

1. PRÉFACE	7
2. INTRODUCTION	9
3. CAVITÉS SOUTERRAINES ET ALÉAS	10
3.1 Historique	10
3.2 Les cavités souterraines	11
3.3 Nature et conséquences des accidents	16
4. MAITRISE DU RISQUE	21
4.1 Reconnaissance et évaluation de l'aléa	21
4.2 la prévention	23
5. INSPECTION ET SURVEILLANCE	29
5.1 Les techniques de surveillance : principes et objectifs	29
5.2 L'inspection visuelle	29
5.3 La surveillance instrumentée	31
6. LES TECHNIQUES DE CONSOLIDATION DES CAVITÉS	41
6.1 Généralités	41
6.2 Le boulonnage	42
6.3 Les soutènements porteurs en galeries : maçonneries, cadres et revêtements bétonnés	45
6.4 Armement des piliers par boulons et tirants	50
6.5 Projections de béton ou de résine	52
6.6 Ceinturage - Cerclage des piliers	53
6.7 Edification des piliers artificiels	55
7. LES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE COMBLEMENT DES VIDES	59
7.1 Généralités	59
7.2 Le remblaiement par voie pneumatique (pour mémoire)	64
7.3 Le remblaiement partiel	66
7.4 Remblaiement direct à partir du fond par engins mécanisés	70
7.5 Remblaiement par déversement gravitaire depuis la surface	74
7.6 Remplissage et traitement des terrains par injections	85
7.7 Remplissage par mousses thermodurcissables	96
8. MÉTHODES DE TRAITEMENT PAR SUPPRESSION DES VIDES	101
8.1 La méthode de comblement-terrassement	101
8.2 Les méthodes par foudroyage	104
8.3 Les méthodes par pilonnage intensif	106
9. LES MÉTHODES DE TRAITEMENT PAR PROTECTION PASSIVE	107
9.1 Renforcement de structure et fondations superficielles	107
9.2 Fondations profondes	108
9.3 Renforcement en sous œuvre	109
9.4 Méthodes parachutes	110
9.5 Adaptation des réseaux	112
10. SYNTHÈSE RÉCAPITULATIVE : CRITÈRES DE CHOIX DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE MISE EN SÉCURITÉ	113
10.1 Les objectifs à atteindre	114
10.2 Les domaines d'utilisation	114
10.3 Le niveau de sécurité admissible	115
10.4 Aspects techniques	117
10.5 Aspects économiques	117
11. BIBLIOGRAPHIE	119
12. LISTE DES ANNEXES	123

Avertissement

L'analyse de méthodes de mise en sécurité, développée dans ce document de synthèse, procède d'une démarche purement informative auprès des personnes, des responsables locaux ou des membres d'associations qui, confrontés aux risques d'effondrement d'anciennes carrières souterraines abandonnées recherchent des connaissances de base sur les techniques disponibles et leur choix.

Le caractère général et synthétique du document ne vise pas les aspects spécifiques à quelques régions, départements ou localités qui disposent déjà de documents à caractère réglementaire, telle que, par exemple, la région parisienne ou celle des Yvelines et du Val-d'Oise, dotées d'un service d'Inspection Générale des Carrières. La délivrance d'un permis de construire peut y être beaucoup plus contraignante que dans d'autres régions, avec des obligations concernant les travaux qui découlent de notices techniques spécifiques.

Ce document ne se substitue non plus aux obligations réglementaires ou normatives s'appliquant aux pratiques techniques, aux objectifs de sécurité visés, ou à la destination des ouvrages. Le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre gardent leur entière responsabilité pour ce qui concerne le choix effectif des méthodes et leur mise en œuvre dans l'environnement du site, au sens large. Toutefois, des prescriptions minimales peuvent également être imposées par la puissance publique, notamment dans les zones identifiées dans les PPRN (Plans de Prévention des Risques Naturels) comme pouvant présenter des risques particuliers.

On rappellera, à ce titre, qu'avant d'initier tout chantier de travaux, il est nécessaire de procéder à des études techniques et économiques préliminaires menées par des spécialistes du domaine.

1. PREFACE

Largement réparties sur le territoire national, les cavités souterraines creusées par l'homme, grottes, carrières abandonnées, habitations troglodytiques, refuges souterrains, sapes de guerre, etc., constituent un problème préoccupant pour de nombreuses communes du fait de leur concentration et du caractère inéluctable de leur dégradation. Les accidents ou incidents se produisent régulièrement, en particulier dans les zones fortement urbanisées ou à leur périphérie, par effondrement total ou localisé des ouvrages souterrains. Les vides du sous-sol sont donc une source de danger potentiel pour les personnes et pour les biens, et induisent une contrainte forte en termes d'aménagement et de développement urbain.

Il appartient à l'Etat et aux maires des communes, de porter à la connaissance des citoyens l'information sur les risques existants auxquels ils sont soumis dans certaines zones du territoire et sur les mesures de sauvegarde qui les concernent, conformément à l'article L125-2 du Code de l'Environnement. Dans les communes disposant d'un plan de prévention des risques naturels prévisibles, le maire informe la population régulièrement sur la nature des risques, les mesures de prévention possibles et les dispositions prises par la commune pour gérer le risque. Cette information est délivrée avec l'aide des services de l'Etat compétents, dans le cadre des mesures prises en application de la loi n° 87-565 du 22 juillet 1987.

Face à la sensibilisation sans cesse croissante de la population vis-à-vis des risques naturels au sens large, il est apparu urgent pour l'Administration de prendre des mesures réglementaires en matière de renforcement de la protection de l'environnement. Les mesures concernent plus particulièrement la sauvegarde des populations menacées par les phénomènes d'instabilité du sol induits par la présence d'anciennes carrières souterraines abandonnées.

Indépendamment des dispositions préventives conservatoires comme l'interdiction d'accès assortie ou non de mesures d'indemnisation, des solutions techniques peuvent être mises en œuvre en matière de prévention des risques et de gestion de la sécurité publique, par les autorités compétentes comme par l'ensemble des intervenants dans l'acte d'aménager et de construire. Elles reposent sur la meilleure connaissance possible des phénomènes physiques et des techniques disponibles permettant de mettre le site en sécurité, provisoirement ou définitivement.

Afin de préciser les conditions et les limites d'utilisation de ces méthodes, il a paru opportun à la Direction de la prévention des pollutions et des risques (DPPR) de confier à l'Institut de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS) un travail de synthèse documentaire qui fasse le point, dans un document unique, des connaissances actuelles en matière de prévention ou de protection vis-à-vis de l'aléa lié aux cavités souterraines. Tel est l'objet du présent guide, réalisé notamment à l'attention des bureaux d'études, des experts, des maîtres d'œuvre ou des gestionnaires d'ouvrages concernés. Il traite plus particulièrement des anciennes carrières souterraines aujourd'hui abandonnées, mais certaines techniques sont également valables pour les carrières en activité et les mines bien qu'elles relèvent d'un statut juridique différent.

Nous remercions plus particulièrement les différents organismes, tels que l'Inspection Générale des Carrières de Paris (IGC-75) et de Versailles (IGC-78) et le Laboratoire central des Ponts et Chaussées (LCPC) ainsi que tous les bureaux d'études et entreprises qui ont bien voulu valider ce document, participer à son élaboration ou fournir quelques illustrations qu'ils ont bien voulu nous confier.

2. INTRODUCTION

L'exploitation d'anciennes carrières souterraines a souvent accompagné le développement économique et démographique de nombreuses régions ou agglomérations qui ont du faire face dès le XIX^{ème} siècle à une forte croissance de population qui a induit la nécessité de constituer de vastes ensembles urbanisés. Sur l'ensemble du territoire national, de très nombreuses villes et leur périphérie sont désormais sous-minées par des cavités souterraines qui peuvent poser de graves problèmes de sécurité pour les populations et des difficultés de développement pour les constructions futures et les projets d'aménagement.

Les problèmes de sécurité publique en présence de vides souterrains concernent toutes les surfaces sous-minées, qu'elles soient, au sens du P.L.U (ancien P.O.S), des zones dites «naturelles», des zones urbanisées ou des zones urbanisables.

Les risques induits par ces exploitations, bien que connus depuis longtemps, ont commencé à être véritablement pris en compte à la suite de plusieurs accidents graves au cours de la deuxième moitié du XVIII^{ème} siècle. Cette prise de conscience a amené l'Administration à créer l'Inspection Générale des Carrières de Paris en 1777. Ces risques n'ont, en fait, jamais été totalement maîtrisés par souci de préserver le développement industriel ou par l'influence d'une forte pression foncière.

En l'état actuel des choses, la mise en sécurité des personnes et des biens oblige, soit à prendre des mesures préventives de sauvegarde (péril imminent), très souvent mal acceptées par les intéressés, soit au contraire à engager des travaux de protection, dont les coûts peuvent avoir de sérieuses incidences sur le contexte socio-économique de la région affectée. Il s'agit néanmoins d'un investissement souvent nécessaire, voire indispensable, pour assurer une sécurité acceptable des personnes, la pérennité du bâti existant ou le développement de projets d'urbanisation.

Dans chaque cas d'exposition à un risque d'effondrement, le choix de la méthode de traitement adaptée à la situation se pose. Il se pose non seulement sur le plan purement technique où des solutions très diverses sont disponibles, mais aussi sur le plan décisionnel de la maîtrise du risque en définissant clairement les objectifs visés quant à la destination du site et le niveau de protection adapté aux enjeux. Le choix final de la solution retenue repose inévitablement sur des critères techniques et économiques, et ne peut se justifier qu'à partir d'une analyse comparative suffisamment approfondie des méthodes disponibles dont aucune ne présente un caractère suffisamment universel pour couvrir l'ensemble des domaines d'application.

Le présent guide a été rédigé dans cette optique, avec pour objectif principal de mieux faire connaître ces techniques auprès d'un large public directement concerné par les problèmes relatifs aux cavités souterraines abandonnées : responsables de collectivités locales, services techniques spécialisés, bureaux d'études, maîtres d'œuvre, entreprises, gestionnaires d'ouvrages, géotechniciens, etc. En principe limité à la mise en sécurité des personnes et du bâti existant, ce guide fournit également des renseignements complémentaires utiles visant les constructions nouvelles. Par contre, il ne traite pas des dispositions préventives réglementaires, comme l'interdiction d'accès ou l'évacuation, assorties ou non de mesures d'indemnisation, prises en cas de péril imminent.

Qu'il s'agisse d'inspection, de surveillance, de comblement, d'injection de coulis, ou d'abattage avec suppression des vides, l'analyse comparée des méthodes de traitement présentée dans ce guide, repose sur des critères à la fois techniques, pratiques et économiques sous-tendus par l'objectif essentiel qui est de mieux en faire comprendre les opportunités respectives afin d'en faciliter le choix.

3. CAVITES SOUTERRAINES ET ALEAS

3.1 HISTORIQUE

Sur l'ensemble du territoire français, les surfaces sous-minées par d'anciennes carrières souterraines abandonnées représentent plusieurs dizaines de milliers d'hectares. Il s'agit le plus souvent d'exploitations de calcaire, de marne ou de gypse, mais aussi de marbre, d'ardoise ou d'argile, matériaux essentiellement utilisés pour la construction, soit directement, soit après transformation.

La plupart de ces carrières sont très anciennes : certaines remonteraient au VII^{ème} siècle (banlieue lilloise), d'autres des XI^{ème}, XIV^{ème}, XV^{ème} siècle (Caen, Paris, Picardie). Le développement de l'exploitation en souterrain a toutefois eu son apogée entre le XVII^{ème} et le XIX^{ème} siècle.



Figure 1 : Ancienne carrière de calcaire de La Maladrerie (près de Caen, Calvados)

Souvent creusées à la périphérie d'agglomérations importantes, voire sous les villes elles-mêmes, et rapidement gagnées puis dépassées par la croissance de l'urbanisation, les anciennes exploitations, souvent négligées, furent à l'origine de nombreux accidents liés essentiellement à leur dégradation progressive sous l'effet des facteurs d'altération dont le temps n'est pas le moindre.

Pendant de nombreux siècles, les carrières ouvertes sans autorisation ni soumises à aucune surveillance particulière ou réglementaire furent exploitées un peu n'importe où, sans souci des limites et abandonnées à elles-mêmes, devenant ainsi rapidement oubliées et/ou inaccessibles.

Il ne semble pas que le problème de la stabilité des carrières souterraines ait été l'objet de quelque souci ou préoccupation avant une succession de graves effondrements meurtriers à la fin du XVIII^{ème} siècle. Celui de la route de Paris à Orléans, en 1774, fut à l'origine de la création par le Roi Louis XVI d'un service spécial d'ingénieurs, future Inspection Générale des Carrières en 1777. Sa première mission, exécutée quelques jours après, fut de prendre les mesures de sauvegarde d'un immeuble en partie effondré dans une excavation de 20 m de profondeur et menacé de la ruine totale.

Les mesures de contrôle et de sauvegarde adoptées tant par le Service des Mines, devenu Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement du Ministère de l'Industrie, pour les carrières en activité, que par les Services Publics d'Inspection des Carrières rattachées à un département ou à une région, pour les carrières abandonnées, permirent de réduire au minimum le nombre des catastrophes par effondrement du sous-sol depuis le XIX^{ème} siècle.

3.2 LES CAVITES SOUTERRAINES

Répartition sur le territoire national

La concentration des anciennes carrières souterraines est impressionnante dans certains départements, lorsque les conditions d'exploitation ou la qualité du matériau y étaient particulièrement favorables. Les régions les plus touchées par la présence des carrières sont assez bien connues grâce aux services d'inspection spécialisés qui ont en charge ce problème. Il s'agit de la région Nord-Pas-de-Calais, de la région parisienne, de la Haute et Basse-Normandie, des Pays de la Loire, de l'Aquitaine et la région Poitou-Charentes et, à moindre titre, des Pyrénées, de la Provence, du Lyonnais, du Jura et de la Bourgogne.

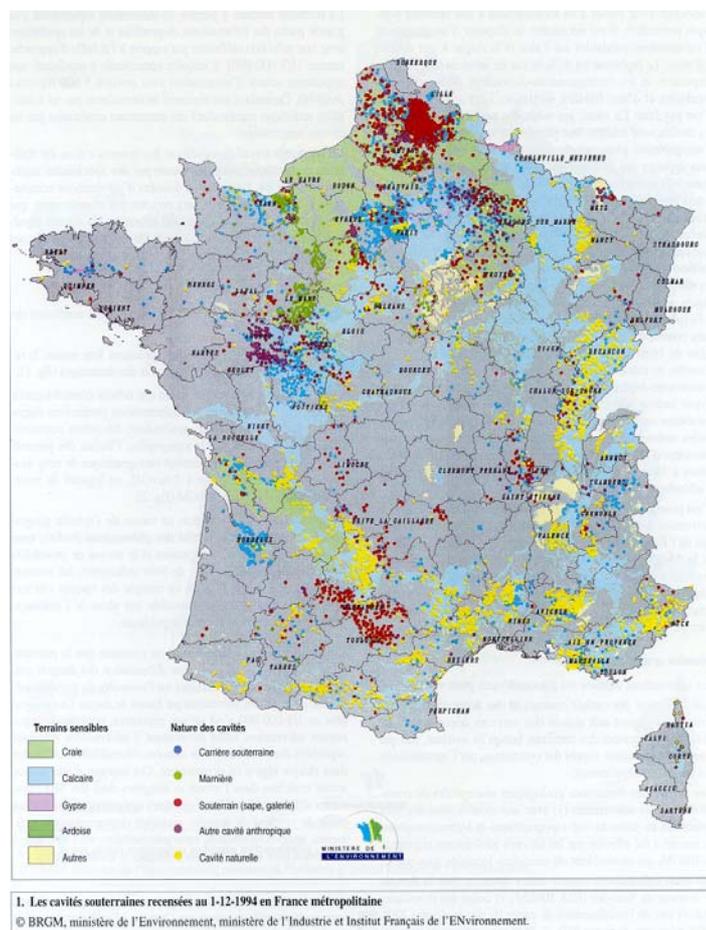


Figure 2 : Carte des cavités souterraines recensées en 1994, en France métropolitaine (d'après l'inventaire du BRGM, effectué pour le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement)

En dehors des régions très marquées, les anciennes exploitations de matériaux divers en souterrain ont laissé de nombreuses cavités disséminées sur le territoire national : pierre de l'Oise, calcaire de l'Aisne, de la Champagne, des Ardennes, de la Lorraine ou de la Côte d'Or, gypse du Bassin Parisien, du Jura, des Pyrénées Atlantiques ou de Provence, pierre à ciment de l'Isère, etc. Dans ces dernières régions, les carrières souterraines abandonnées sont beaucoup moins bien connues et leur existence parfois complètement ignorée.

En outre, il faut aussi y ajouter les vides laissés par les activités humaines les plus diverses tels que les sapes de guerre, les habitations et caves troglodytiques.

Typologie et schéma d'exploitation des carrières

Les carrières souterraines sont accessibles, soit par un puits ou une descenderie dans le cas des carrières implantées sur un plateau, soit par une entrée à flanc de coteau, appelée entrée en « cavage ».



Figure 3 : Entrée en cavage dans la carrière de gypse de Gagny (Est de Paris), photo LCPC

La profondeur habituelle des exploitations est comprise entre 5 et 50 m, parfois inférieure à 5 m, comme en Gironde. Plus rarement, elle peut atteindre 60 à 70 m, dans certaines exploitations de craie, aux environs de Meudon (Hauts-de-Seine), ou de gypse, dans le Bassin de Paris, la Provence ou le Jura, et exceptionnellement plus d'une centaine de mètres pour certaines exploitations en roches dures situées à flanc de montagne (Jura, Pyrénées, Alpes).

Les méthodes d'exploitation et géométries de découpage sont très diversifiées. Elles dépendent des conditions topographiques et géologiques du site ainsi que des propriétés de résistance de la roche. Ces conditions permettent d'exploiter jusqu'à un certain taux de vide, appelé « taux d'exploitation » ou « taux de défrètement ». Ce taux est généralement compris entre 60 et 80 % avec des valeurs plus exceptionnelles de 90 à 95 %, voire de près de 100 % dans les exploitations par hagues et bourrages.

La hauteur exploitée ou « ouverture », comme la largeur des galeries ou des chambres, est très variable et dépend, outre de la puissance de la couche, de la résistance du matériau, en particulier de la tenue des piliers et de la qualité du toit ou « ciel ». La hauteur des vides, parfois de 2 m, voire moins, peut atteindre 15 à 20 m dans les anciennes carrières de gypse de l'Ouest du bassin de Paris. Elle est le plus souvent de l'ordre de 4 à 8 m. La largeur des galeries, généralement comprise entre 4 et 8 m peut varier de 3 et 15 m.

La géométrie de ces exploitations n'est devenue régulière qu'à partir de la fin du XIX^{ème} siècle. Avant cette date, la plupart des travaux d'extraction étaient réalisés de manière désordonnée, en fonction de la qualité du gisement ou de la contrainte imposée par les droits de forage (autorisation d'exploiter ou possession des terrains de surface).

Seules exceptions à ces règles, les exploitations d'ardoise, peu nombreuses en France, développent des méthodes d'extraction particulières liées à la structure et à la nature de ce type de gisement qui autorisent des volumes de vides importants. La profondeur des ardoisières varie de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres.

Les techniques de creusement ont évolué au cours du temps en même temps que la production. L'extraction manuelle de pierres de taille, réalisée au pic ou à la lance, a été mécanisée par l'introduction d'engins de découpe au fil, par sciage, ou avec des haveuses. Les matériaux moins nobles, pierres à chaux ou gypse, ont été extraits dès le XIX^{ème} siècle à l'explosif, d'abord à la poudre noire puis à la dynamite et à l'explosif nitraté vers la seconde moitié du XX^{ème} siècle.

La typologie des carrières souterraines repose sur la diversité des méthodes d'exploitation utilisées dont les plus connues sont décrites ci-après.

Exploitations par traçage de galeries

On trouve assez souvent d'anciennes exploitations de tuffeau (variété de craie phosphatée), de sables ou travertin dont le découpage consistait uniquement à tracer des galeries selon une géométrie plus ou moins anarchique. Ces exploitations sont appelées « exploitations par galeries filantes » lorsqu'elles laissent des piliers très longs et parallèles entre eux (tuffeau du Val de Loire) ou « exploitations en rameaux » lorsqu'elles forment un réseau de galeries étroites laissant un étai de masse important (sables de Fontainebleau et travertin de Brie)

Exploitations par chambres et piliers abandonnés

C'est la méthode d'exploitation la plus généralement utilisée et la plus ancienne. Elle se caractérise par une répartition plus ou moins bien ordonnée des piliers avec des sections très différentes pour assurer une stabilité suffisante. Le mode de découpage le plus classique est désigné sous le terme de « piliers tournés ». La forme et l'alignement des piliers sont d'autant plus réguliers que les exploitations sont récentes. Les piliers réguliers sont souvent de section carrée et répartis de façon orthogonale. Ils sont parfois décalés en quinconce pour assurer une meilleure stabilité du toit en présence de fractures.

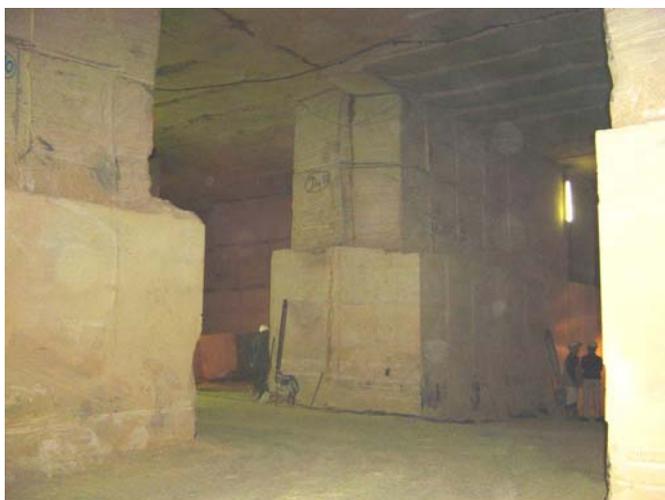


Figure 4 : Exploitation d'une carrière de calcaire par chambres et piliers (Charente)

Le découpage du gisement laisse le plus souvent des galeries de géométrie orthogonale, comme dans les exploitations de calcaire grossier, mais aussi trapézoïdale, comme dans les exploitations de gypse de la région parisienne.



Figure 5 : Exploitation de gypse de l'Est Parisien à galeries trapézoïdales

A ces modes de découpages traditionnels viennent s'ajouter des variantes originales comme la méthode d'exploitation par petits piliers et rideaux (région de Caen) ou celles consistant à découper la couche en plusieurs niveaux superposés (carrières de craie de la région de Meudon au Sud-Ouest de Paris, ou de Touraine, carrières de calcaire stampien de Gironde). L'exploitation dite en « seconde bille » ou en « sous-pied » consiste à prolonger l'exploitation par la prise de bancs inférieurs en fonction de critères techniques ou économiques.

Exploitations par hagues et bourrages

Il s'agit d'une méthode de dépilage intégral qui ne semble avoir été appliquée qu'à partir du XVI^{ème} siècle, dans les carrières de calcaire grossier de la région parisienne et de Reims.



Figure 6 : Carrière par hagues et bourrages du sous-sol de paris (source IGC-Paris)

La stabilité du toit à proximité du front d'extraction, encore appelé « front de masse », était assurée par des empilements de moellons appelés « piliers à bras ». L'arrière de la « taille » était traitée par remblaiement (« bourrage ») à l'aide de déchets d'exploitation ou de matériaux d'apport. Les zones remblayées étaient délimitées et cloisonnées par des murets en pierres sèches appelés « hagues », murets qui encadraient les galeries

d'accès appelés « rues de service ». Pour pallier une stabilité jugée précaire, on abandonnait par endroits un pilier de section importante appelé « étai de masse ». Ce mode d'exploitation fut localement appliqué sur deux, voire trois niveaux, notamment dans la région parisienne.

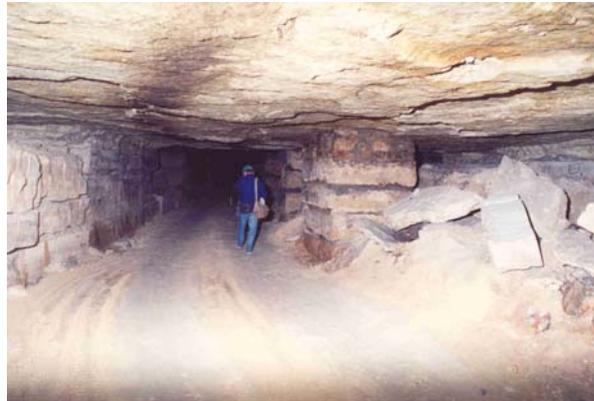


Figure 7 : Exploitation par hagues et bourrages du XX^{ème} siècle (région de Reims)

Exploitations par foudroyage ou affaissement dirigé

Une des premières applications de cette méthode d'exploitation remonte au XVIII^{ème} siècle avec l'obligation de foudroyer à la poudre noire d'anciens cavages d'extraction de gypse dans le Nord et l'Est de Paris (arrêt royal de 1779). Il s'agit également d'une méthode de dépilage intégral dont la suppression des piliers est réalisée par un abattage à l'explosif.

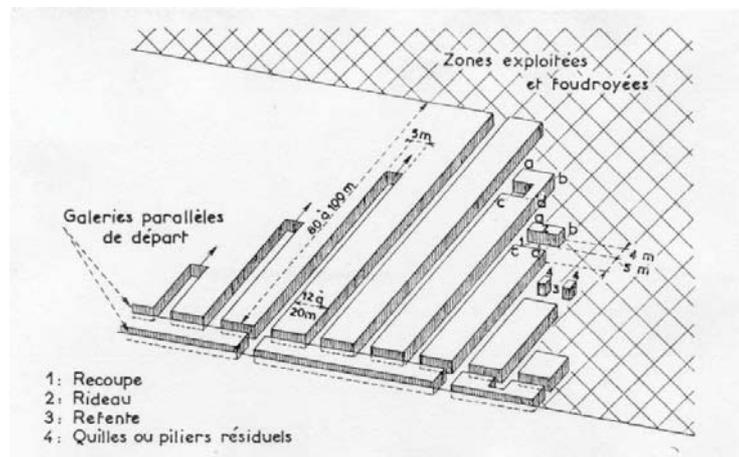


Figure 8 : Schéma d'une exploitation par foudroyage intégral (d'après Vidal, 1964)

La méthode classique, bien connue pour l'extraction du gypse en région parisienne, est planifiée dès le départ et fait partie intégrante de la stratégie d'exploitation. Les opérations bien menées conduisent à une suppression pratiquement total des vides, mais laissent des terrains de couverture déconsolidés qui entraînent inévitablement des tassements différés de la surface qui peuvent subsister longtemps après l'exploitation.

Exploitations par puits et chambres de type « catiches ou bouteilles »

Ces méthodes anciennes, très originales, sont généralement propres à une région bien précise. Il peut s'agir d'excavations isolées comme les marnières de Haute-Normandie ou

de chambres exploitées en descendant à partir de puits adjacents (« puits bouteilles ») et disposées de façon plus ou moins régulière.



Figure 9 :Exploitation par puits bouteilles (Doué-la-Fontaine, Maine-et-Loire)

C'est le cas des « catiches » de la région lilloise, des exploitations par chambres hautes du falun de Doué-la-Fontaine près de Saumur (Maine-et-Loire) ou des crayères pyramidales de la craie champenoise. Les têtes de puits étaient généralement obturés après exploitation par des voûtes de pierres taillées ou « bouchon », ou des planches ou de plaques métalliques fichées dans les terrains meubles de couverture, sur lesquels on déversait des remblais.

3.3 NATURE ET CONSEQUENCES DES ACCIDENTS

Les principaux risques résultant de la présence de carrières souterraines abandonnées correspondent à la manifestation en surface de désordres dont les effets diffèrent en fonction du mode de rupture et de la nature des terrains formant le recouvrement. On distinguera essentiellement parmi ces risques, l'effondrement localisé de type « fontis », l'effondrement localisé par rupture de quelques piliers et l'effondrement généralisé désigné également « effondrement spontané ».

L'effondrement localisé de type « fontis »

Il s'agit d'un éboulement initié au sein d'une cavité souterraine qui remonte progressivement vers la surface et débouche brusquement au jour en créant un entonnoir circulaire dont le diamètre peut varier de quelques mètres à plusieurs dizaines de mètres. Ce type d'instabilité est le plus fréquent car il peut se produire au-dessus de tout vide même d'extension moyenne (anciennes galeries, puits, karst). Le processus classique apparaît lorsqu'une montée de voûte atteint des bancs peu résistants. La cloche d'éboulement ou « cloche de fontis » se développe verticalement et débouche en surface si l'épaisseur du recouvrement de la carrière demeure relativement faible (50 à 80 m, environ dans le cas des carrières de calcaire ou de gypse du Bassin de Paris). Ce processus peut être bloqué à une certaine profondeur soit par la présence d'un banc raide et épais, soit par « autocomblement » si les matériaux éboulés et foisonnés s'accumulent et finissent par remplir totalement les vides disponibles de la cavité.



Figure 10 : Fontis survenu en 1991 sur le plateau de l'Hautil (Yvelines)

Du fait de l'extension du phénomène, les conséquences en surface sont, en général, limitées en superficie mais peuvent s'avérer très graves si elles se localisent sous une construction ou sous toute autre infrastructure. C'est ainsi qu'à Paris (villa Saint-Jacques) en 1879 trois maisons furent englouties dans un fontis avec leurs habitants, et que plus récemment, disparut une personne, à Chanteloup-les-Vignes, dans le massif de l'Hautil (Yvelines), en 1991 et une autre personne, à Neuville-sur-Authou (Haute-Normandie), en 2001.

Lorsque le recouvrement est constitué de roches meubles, le fontis se produit le plus souvent sous la forme d'un cône d'éboulement dont l'angle est lié à l'angle de talus naturel des terrains. Pour un angle de 45° , le rayon en surface est égal à la profondeur de la cavité.

L'effondrement localisé

Dans une carrière souterraine exploitée par la méthode des chambres et piliers abandonnés, la ruine d'un ou plusieurs piliers peut se traduire en surface par un effondrement lorsque la profondeur des travaux et la raideur du recouvrement ne sont pas suffisamment importantes. On parle alors de rupture de pilier(s) isolé(s). Comme les fontis, les effondrements de ce type sont des phénomènes purement locaux qui ne dépendent pas de la géométrie d'ensemble de la cavité mais uniquement de conditions locales défavorables géométriques, structurales ou autres.

La dimension de la zone affectée au jour est en général plus importante que celle d'un simple fontis (plusieurs centaines ou milliers de mètres carrés) et la forme de la dépression plus irrégulière.

L'effondrement généralisé

Il s'agit d'un abaissement violent et spontané de la surface qui se manifeste sous la forme d'un cratère, d'étendue et de profondeur plus ou moins importantes, limité par des fractures nettes de rupture. La zone effondrée peut correspondre soit à une partie de l'exploitation sous-jacente (plusieurs piliers) soit à sa totalité. Suivant les dimensions de

l'exploitation, la surface effondrée peut atteindre plusieurs hectares et la hauteur affaissée plusieurs mètres si la hauteur exploitée de la couche est suffisante : elle atteint généralement la moitié ou le tiers de cette hauteur (« ouverture »).



Figure 11 : Effondrement généralisé à l'aplomb d'une carrière de craie (Indre-et-Loire)

Du fait de la brutalité du phénomène et de l'importance de la surface concernée, les conséquences de l'accident peuvent être catastrophiques comme celui de Clamart - Issy-les-Moulineaux (Hauts-de-Seine) en 1961. L'effondrement d'une ancienne carrière de craie, exploitée sur plusieurs niveaux, a affecté une superficie de 3 ha et entraîné la destruction d'une vingtaine de pavillons en faisant 21 morts et 50 blessés.

Ces phénomènes sont spécifiques des carrières ou mines souterraines exploitées par chambres et piliers ; ils sont nettement moins fréquents que les fontis mais peuvent affecter tout type d'exploitation en cours ou abandonnée.

Les mécanismes de rupture qui déclenchent l'effondrement spontané procèdent de processus d'instabilité très différents et plus ou moins complexes : rupture simple par écrasement des piliers, rupture du toit, poinçonnement du mur par les piliers, cisaillement des planches intercalaires ou mauvaise superposition des piliers entre plusieurs niveaux exploités, mise en charge hydraulique du toit, déviation du champ des contraintes par effet de versant, actions de l'homme, etc.).

Conséquences pour les personnes

Une enquête de la Direction des Mines du Ministère de l'Industrie, effectuée en 1964 dénombreait, entre 1871 et 1964, 56 effondrements survenus dans les exploitations menées par chambres et piliers, dont 44 pour les mines et carrières en activité et 12 pour les mines ou carrières abandonnées. Ces accidents firent au total 108 tués (48 au fond, 60 au jour) et 94 blessés (20 au fond, 74 au jour). Concernant uniquement les carrières, Les 4 accidents les plus meurtriers firent à eux seuls 66 tués et 58 blessés : Vieux-Ports (Indre et Loire) en 1880, Chancelade (Dordogne) en 1885, Clamart - Issy-les-Moulineaux (Hauts-de-Seine) en 1961, et Champagnole (Jura) en 1964.

Une enquête récente de la Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement (1999) a fait un bilan, non exhaustif, de l'accidentologie relative aux seules carrières souterraines abandonnées et non réutilisées. Les principales conclusions de cette enquête sont les suivantes :

- la majeure partie des accidents humains sont le fait de la dégradation lente des carrières souterraines abandonnées qui avaient été exploitées par la méthode des « chambres et piliers ». Le bilan des victimes recensées, entre 1778 et 1998, s'élève à 62 morts et 73 blessés ;

- la plus forte sinistralité est observée en région parisienne (départements 75, 92, 93, 94, 95 et 78), probablement en raison de l'extrême densité des exploitations et du tissu urbain ;
- la plupart des événements recensés sont du type effondrement localisé, principalement fontis (dans plus de 90 % des cas). Ils provoquent le plus souvent un faible nombre de victimes (1 ou 2 par accident) ;
- les effondrements généralisés sur un à plusieurs hectares sont heureusement rares (1 seul pour la période 1950-1998), mais très meurtriers (Clamart, Issy-les-Moulineaux, en 1961).

Ces chiffres peuvent paraître relativement faibles en première analyse en considérant les valeurs moyennes dans la durée d'analyse. Ils ne doivent cependant pas faire oublier le caractère souvent fortuit et aléatoire de l'évènement accidentel sur le plan de son occurrence et de la variabilité du nombre des victimes qui se traduit par un très fort impact psychologique sur les populations menacées ou non.

Par ailleurs, il ne faut pas négliger le phénomène de « vieillissement » qui affecte inexorablement, avec le temps, la stabilité de ces anciennes exploitations. Un exemple typique est celui des accidents de marnières, en Haute-Normandie, dont l'augmentation de leur fréquence ces dernières années a rendu le problème très préoccupant : de 4 effondrements par an en 1985, on compte en moyenne 3 effondrements par jour au cours de l'année 2000, avec un pic de 20 effondrements constatés en une seule journée au cours du printemps 2001, il est vrai particulièrement pluvieux.



Figure 12 : Accident dû à la rupture d'une marnière dans l'Eure (document LCPC)

4. MAITRISE DU RISQUE

4.1 RECONNAISSANCE ET EVALUATION DE L'ALEA

Dans les régions urbanisées recelant en leur sous-sol d'anciennes carrières abandonnées, connues ou oubliées, le développement d'une politique de prévention par le traitement des risques potentiels passe par une phase de recherches préliminaires qui comporte deux aspects fondamentaux :

- la localisation et/ou la reconnaissance des cavités souterraines ;
- le diagnostic de stabilité (expertise) pour l'évaluation de l'aléa et de ses effets prévisibles en surface vis-à-vis de la sécurité de la population et des biens exposés.

Le déroulement de ce processus s'opère de façon différente selon que les cavités sont connues et accessibles, ou bien mal localisées et inaccessibles.



Figure 13 : Reconnaissance d'une carrière abandonnée à partir d'un puits

a) des cavités souterraines accessibles

Si la cavité souterraine est accessible, l'évaluation de l'aléa est traitée classiquement dans le cadre d'une expertise simple ou d'une étude de stabilité au sein de laquelle on peut distinguer trois niveaux d'investigation :

- la phase de reconnaissance : elle permet de recueillir des éléments quantitatifs ou qualitatifs sur la géométrie des vides, la lithologie, la fracturation, les caractéristiques physiques et mécaniques du milieu rocheux. A l'issue de cette reconnaissance sont établis les scénarios possibles correspondant aux différents mécanismes de rupture identifiés. Une analyse historique du site par retour d'expérience est une approche préliminaire très souvent fructueuse (phase informative) ;
- la phase de modélisation : elle consiste, pour chaque scénario retenu (par exemple, l'écrasement des piliers sous le poids des terrains de recouvrement), à évaluer les sollicitations imposées aux structures (S) et à les comparer à leur propriétés de résistance limites (R). On en déduit alors un coefficient de sécurité ($F = R/S$) rapport de ces sollicitations ;
- l'établissement du diagnostic : le diagnostic final est établi en considération de la valeur du coefficient de sécurité calculé (F) et des valeurs de référence (F_{min} , F_{max}) établies en fonction des conséquences prévisibles du risque ainsi que du niveau de

confiance accordé à la reconnaissance préliminaire et au modèle de calcul utilisé. La référence à des observations qualitatives ainsi qu'aux enseignements tirés de l'expérience (règles de l'art) tiennent également une part importante dans la formulation du diagnostic.

Précisons que, dans les cas les plus simples et en l'absence d'enjeux importants, un « **avis d'expert** », fondé sur la seule phase de reconnaissance, peut suffire à préconiser ou pas les mesures de sécurité qui s'imposent.

b) des cavités souterraines mal localisées ou inaccessibles

Si les cavités souterraines sont inconnues, inaccessibles ou trop dangereuses pour être rendues accessibles, la localisation des vides et l'identification des risques est une démarche essentielle qui comprend deux aspects :

- la recherche et localisation des vides potentiels par voie informative ;
- la localisation et reconnaissance préliminaire des vides et du sous-sol.

a) *La phase de recherche et de localisation des vides* potentiels repose sur une démarche informative comprenant, par exemple, des enquêtes auprès de la population, des recherches documentaires (archives) auprès des Services Publics spécialisés ou l'analyse des « indices » laissant supposer la présence d'une cavité, telles que les indices de surface relevés par des observations sur site ou l'examen de photos aériennes, et tout autre indice susceptible d'apparaître sur les cartes topographiques ou géologiques.

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

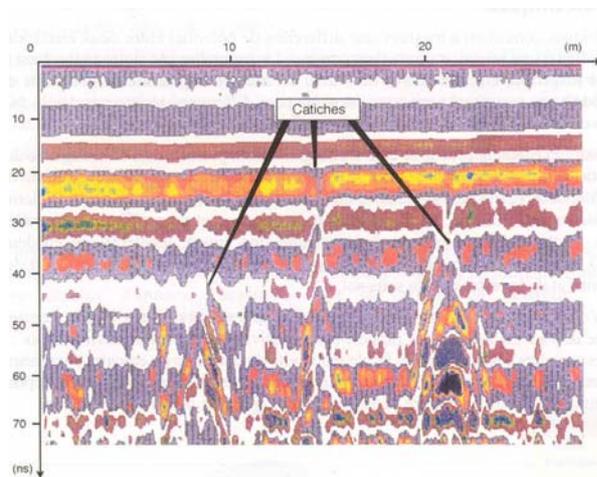


Figure 14 : Localisation de cavités par géophysique (ici radar géologique)

Les résultats de la géophysique sont parfois décevants, surtout dans des conditions de site difficiles, en particulier en présence d'un recouvrement important (plus de 20 m de profondeur) ou lorsque la géologie et la topographie est défavorable ou perturbée. Cette méthode n'est pas non plus applicable en site fortement urbanisé.

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

Outre les informations qu'elle apporte sur la nature des terrains, la reconnaissance par forages permet, en effet, de situer exactement les cavités, de les reconnaître (par endoscopie ou caméra vidéo), de préciser la hauteur de vides, le volume à combler et de choisir ainsi les meilleurs points d'attaque pour le creusement des puits d'accès ou de remblaiement. Cette phase de reconnaissance permet également d'estimer le plus correctement possible le volume des vides à combler et le coût des opérations de traitement.

4.2 LA PREVENTION

Malgré l'amélioration des techniques de reconnaissance et de diagnostic, la complexité des travaux souterrains et les difficultés liées à l'environnement du site laissent encore subsister de fortes incertitudes ou contraintes pour les « décideurs », non seulement techniques (qualité du diagnostic, évaluation des vides, opérabilité de la méthode, etc.), mais aussi administratives et financières. Ces contraintes peuvent rendre délicate la prise de décision nécessaire à une prévention du risque véritablement adaptée aux enjeux.

En effet, indépendamment des dispositions de sauvegarde à prendre en cas de péril imminent, lorsque l'existence d'un risque potentiel latent est avérée, le problème essentiel est celui de la prévention. Le choix de la méthode de mise en sécurité repose alors sur une alternative fondamentale à caractère technique et économique : **traiter, surveiller ou déplacer les enjeux** (figure 15).

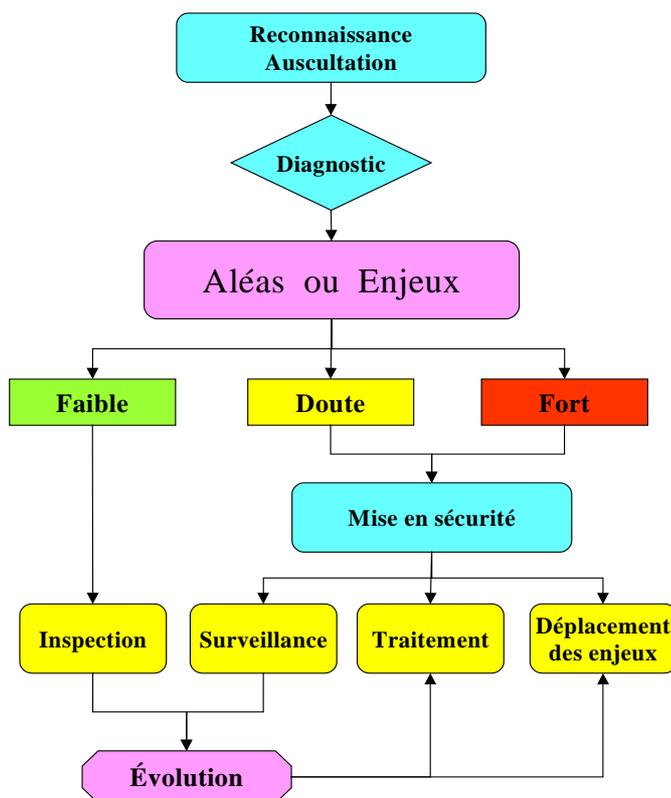


figure 15 : Schéma de principe de la méthodologie de maîtrise des aléas

Le risque est une grandeur qui s'évalue en croisant l'aléa (grandeur elle-même estimée à partir de deux dimensions : sa probabilité d'occurrence et son intensité) avec les enjeux (sévérité des dommages potentiels). On peut alors définir un « espace » du risque décomposé en plusieurs domaines, dont en premier lieu le domaine du «risque acceptable» et celui du « risque inacceptable ». La séparation entre ces deux domaines émane de la décision collégiale des acteurs impliqués dans la maîtrise du risque.

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

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

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

4.2.1 AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET INFORMATION DU PUBLIC

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

- les périmètres de risques, en application de l'article R 111.3 du Code de l'Urbanisme ;
- les plans d'exposition aux risques (PER), institués par la loi du 13 juillet 1982, désormais obsolètes ;
- les plans de prévention des risques (PPR), instaurés par la loi du 2 février 1995 et qui remplacent les deux premiers.

Les R 111.3 et PER sont aujourd'hui remplacés par les PPR, mais en leur absence ces anciens documents valent PPR (Article L.562-6 du Code de l'Environnement).

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

La réglementation visant l'information du public est assortie de mesures techniques obligatoires ou recommandées, selon les cas, visant les constructions existantes ou futures. En cas de péril imminent, la loi du 2 février 1995 (aujourd'hui codifiée par les articles L.562-1 à L.562-7 du Code de l'Environnement) prévoit des arrêtés de péril qui peuvent être pris pour procéder à l'évacuation des personnes.

Par ailleurs, le citoyen dispose d'un droit à l'information, notamment en matière de risques technologiques et naturels prévisibles. La loi du 22 juillet 1987 (codifiée par l'article L125-2 du Code de l'Environnement) et son décret d'application 90-918 du 11 octobre 1990 répartissent les compétences en matière d'information du public entre l'Etat et les maires des communes concernées.

Enfin, la loi n°2003-699 du 30 juillet 2003 relative à la prévention des risques technologiques et naturels (dite loi risques) et ses décrets d'application successifs

viennent renforcer les dispositifs d'affichage et d'information, notamment dans le domaine des cavités souterraines.

Le décret n°2004-554 de juin 2004 impose aux préfets et aux maires de constituer des documents d'information en y associant les personnes en possession d'informations sur la présence de vides. En tout état de cause, le préfet transmet aux communes le Dossier départemental sur les Risques Majeurs (DRM) afin qu'ils établissent un Document d'Information Communal sur les Risques Majeurs (DICRIM). La cartographie des cavités souterraines élaborée par les communes ou les groupements de commune, sur le fondement de l'article L.563-6 du Code de l'Environnement, doit donc y être incluse lorsqu'elle a été réalisée.

D'autre part, le décret 2005-134 du 15 février 2005 relatif à l'information des acquéreurs et des locataires de biens immobiliers sur les risques naturels et technologiques majeurs s'applique dans les zones délimitées par un PPR (ou dans le périmètre d'étude dans le cadre d'un PPR en phase d'élaboration).

4.2.2 INSPECTION ET SURVEILLANCE

Ces mesures de prévention ont pour but d'avertir ou d'alerter du danger sans s'opposer au phénomène proprement dit. Elles font appel à des techniques d'inspection ou de surveillance dont le principe est de suivre l'évolution des mouvements de terrain et de prendre les mesures de sécurité conservatoires qui s'imposent en cas d'instabilité avérée (figure 16). Elles représentent le plus souvent une stratégie d'attente en reportant ou en fragmentant dans le temps les travaux pour mieux en répartir le coût.

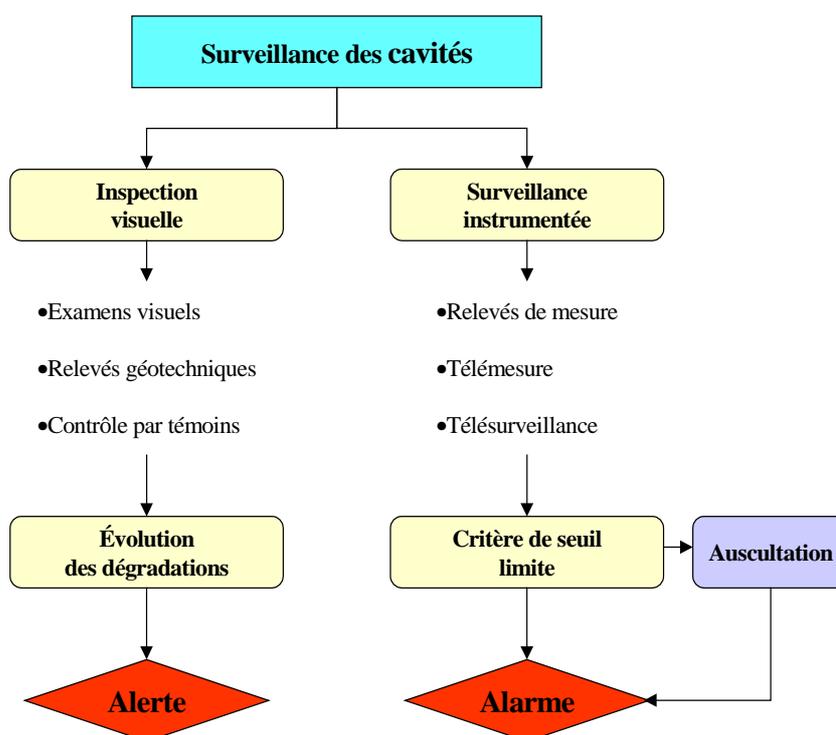


figure 16 : mise en sécurité des anciennes exploitations souterraines par des méthodes de surveillance

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

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

4.2.3 TECHNIQUES DE TRAITEMENT

Les mesures de prévention, fondées sur des techniques adaptées au traitement des cavités, du sol ou des constructions, se définissent en deux modes d'action :

- les techniques « actives » qui consistent, au sein de la cavité, à s'opposer au phénomène d'instabilité, en lui-même, pour minimiser ou supprimer définitivement le risque ;
- les techniques « passives » qui consistent à adopter des dispositions constructives particulières au niveau de bâtiments ou d'ouvrages neufs par un renforcement de la structure ou la réalisation de fondations spéciales.

a) Les techniques de prévention actives

Les techniques de prévention dites « actives » font appel à des traitements qui s'opèrent sur les cavités soit en consolidant les ouvrages souterrains, soit en comblant les vides, soit en les supprimant totalement. Leur principal objectif est de diminuer, voire d'annuler, la prédisposition du site à subir des instabilités. On notera que certaines techniques permettent de conserver ouvertes les cavités, les autres les condamnant définitivement (figure 17).

On peut les décomposer en quatre catégories :

- *les techniques de consolidation* des ouvrages souterrains par différentes méthodes de renforcement ponctuelles (piliers maçonnés, cadres métalliques, boulons, etc.). Elles sont utilisées presque exclusivement dans les sites accessibles que l'on veut conserver ouverts. Elles exigent un entretien et une surveillance de leur évolution ;
- *les techniques de remblayage partiel*. Elles sont utilisées dans les sites accessibles ou inaccessibles et consistent à « renforcer » les cavités par frettage des piliers et abaissement de l'élançement. Par ailleurs, le volume des vides étant fortement diminué (en principe de plus de 50 %), les possibilités de remontées de fontis sont fortement réduites par un effet d'autocomblement plus rapide ;
- *les techniques de comblement* des vides : Le remblaiement total (ou quasi-total) des cavités est accompagné (ou non) d'un clavage final et d'une consolidation des terrains par injections. Ces traitements peuvent, selon les conditions de site et les techniques utilisées, être opérés directement par le fond ou depuis la surface à partir de forages ;
- *Les techniques de suppression des vides*. Ces techniques consistent, dans le cas du comblement – terrassement, à décaisser et remplir les cavités par voie mécanique ou, dans le cas du foudroyage, à provoquer un affaissement des terrains de recouvrement par abattage à l'explosif des ouvrages souterrains.

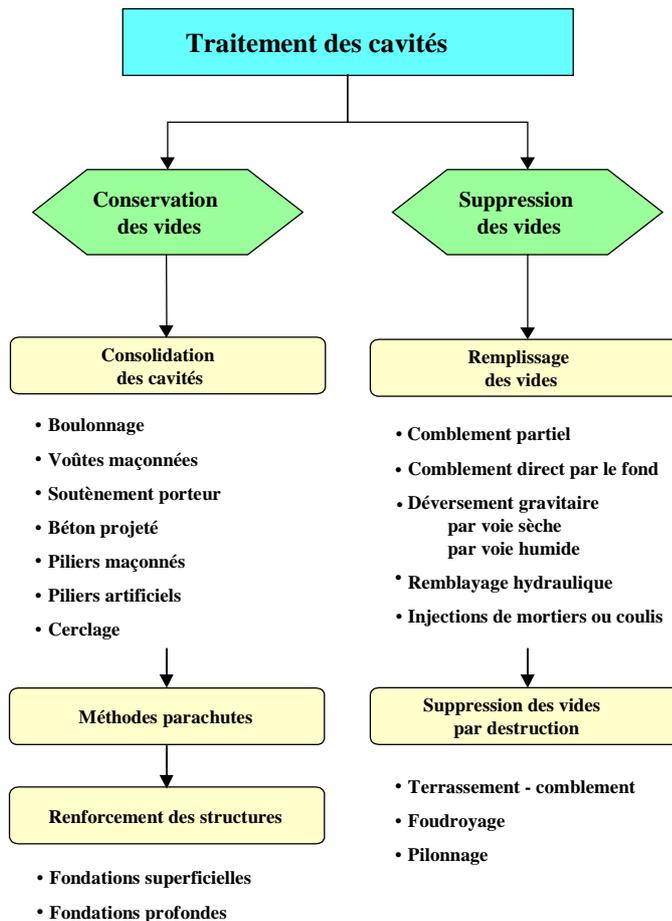


figure 17 : mise en sécurité des anciennes exploitations souterraines par des techniques de prévention actives

Le choix entre ces différentes techniques est fonction :

- des conditions d'accessibilité ou de stabilité du site ;
- de la destination de l'ouvrage souterrain ;
- du niveau de protection adapté à la destination du site (sécurité des personnes ou protection du bâti existant, ou encore projet d'aménagement urbain, etc.) ;
- du coût de l'opération.

b) Les techniques de prévention passives

Les techniques de prévention dites « passives » correspondent à des dispositions constructives spéciales qui s'appliquent essentiellement aux constructions et ouvrages neufs et très souvent en accompagnement des dispositions de traitement du sol établies *préalablement*. On peut citer parmi ces techniques :

- le renforcement de la structure d'une construction par chaînages, fondations superficielles renforcées (radier général, longrines en béton armé). Cette solution est en principe réservée au cas de petits vides dont la répartition est inconnue : fontis,

poches de dissolution, karsts, marnières, sapes, terrains foisonnés ou décomprimés ou à l'aplomb d'une zone anciennement effondrée.

- *la réalisation de fondations profondes* dont le rôle est de reporter les charges en dessous du niveau de carrière au moyen de puits ou pieux. Il y a nécessité de chemiser les pieux, ou de les ceinturer en maçonnerie (carrière accessible), au niveau de la traversée de la cavité. On leur associe, le plus souvent, un traitement des vides par remplissage ou par des renforcements ponctuels.
- *l'adaptation des réseaux souterrains et de la voirie* pour limiter le risque de rupture et, en particulier, pour éviter les fuites d'eau qui peuvent accélérer le processus de dégradation d'une cavité. Les techniques consistent à utiliser des raccords souples adaptés aux déformations ou, au contraire, à renforcer l'ouvrage (pour les canalisations en gros diamètre) pour s'opposer aux déformations.

5. INSPECTION ET SURVEILLANCE

5.1 LES TECHNIQUES DE SURVEILLANCE : PRINCIPES ET OBJECTIFS

Lorsqu'il existe des carrières en zone urbaine ou périurbaine, l'importance du volume des vides souterrains est telle qu'il n'est pas toujours envisageable économiquement de traiter de façon radicale et systématique tous les anciens travaux par des solutions définitives, par exemple en les comblant.

Lorsqu'un diagnostic de stabilité conclut à la nécessité de traiter ou de déplacer les populations, le financement des travaux prévus demande souvent un certain délai. Dans ces conditions, une surveillance adaptée des cavités souterraines peut constituer une solution alternative intéressante dans l'attente de la réalisation des travaux. En tant que solution palliative, la prévention par surveillance se limite aux objectifs suivants :

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

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

5.2 L'INSPECTION VISUELLE

5.2.1 ROLE ET PRINCIPE

L'inspection visuelle permet de surveiller l'évolution des désordres qui affectent progressivement les ouvrages souterrains avant qu'ils ne s'aggravent et ne mettent en péril la sécurité publique. Elle donne le moyen d'entreprendre à temps les travaux préventifs nécessaires.

Ce type d'inspection est réalisé le plus souvent par des services spécialisés régionaux ou départementaux comme les Inspections Générales des Carrières de Paris et de la petite couronne ou des Yvelines, du Val d'Oise et de l'Essonne, le Service Départemental d'Inspection des Carrières Souterraines du Nord, le Service de Géologie et des Carrières Souterraines du Maine-et-Loire ou de Gironde, le service des carrières de la mairie de Laon (Aisne) mais aussi l'INERIS sur certains sites publics ou privés. Leur domaine d'action est normalement limité aux cavités accessibles du domaine public, mais peut parfois être étendu au domaine privé.

5.2.2 TECHNIQUE

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

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

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



Figure 18 : Inspection d'une marnière en Normandie (document BRGM)

Les observations peuvent s'accompagner de relevés effectués à partir de témoins posés en travers de fissures mécaniques (plâtre, règle graduée ou autre dispositif), ou à partir d'indices de chutes de blocs établis à partir de systèmes de repérage préparés à cet effet (bâches disposées au sol, peinture projetée sur le ciel ou les piliers, etc.). Pour des secteurs inaccessibles, l'inspection visuelle peut être effectuée à l'aide d'une caméra en forage.



Figure 19 : Surveillance d'une carrière du Nord avec des relevés d'indices sur les parties peintes et des mesures de convergence

5.2.3 PERFORMANCES

Méthode essentiellement fondée sur l'observation, l'inspection donne un diagnostic purement qualitatif qui repose largement sur l'expérience et la qualité d'expertise de l'expert en charge de la surveillance.

5.2.4 DOMAINES D'UTILISATION

L'inspection nécessite que les cavités souterraines soient accessibles et en suffisamment bon état pour ne pas mettre en péril la sécurité des inspecteurs. Cette technique est utilisée principalement pour la surveillance des cavités souterraines que l'on veut conserver intactes et ouvertes, dans de bonnes conditions de sécurité et de salubrité.

Dans les carrières de grande extension (plusieurs hectares ou dizaines d'hectares), la surveillance par inspection reste toujours possible et souvent mieux adaptée que la

surveillance instrumentée, le nombre de capteurs à implanter devenant prohibitif sur le plan économique.

Par contre, il faut proscrire son utilisation dans les cavités souterraines fortement dégradées et évolutives qui présentent des piliers ruinés, des chutes de blocs ou des montées de voûte largement répandues et à plus forte raison en cas de péril imminent. La simple inspection visuelle, fondée la reconnaissance d'indices d'évolution, paraît en effet illusoire dans un tel milieu si on l'utilise pour la prévention des effondrements.

5.2.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

La surveillance par inspection est une solution préventive simple, peut-être rustique mais économique. Elle permet de contrôler un vaste espace de carrière là où tout autre méthode n'est pas envisageable (en particulier la surveillance instrumentée).

Compte tenu de la fréquence limitée des visites imposées par la méthode même, son principal inconvénient réside donc dans la difficulté de détecter un phénomène d'instabilité d'évolution trop rapide ou difficilement perceptible.

5.2.6 ASPECTS ECONOMIQUES [*]

L'inspection relevant du domaine public ne pose pas de gros problèmes financiers particuliers surtout dans les départements dotés de services d'inspection spécialisés. Le coût découle essentiellement du coût de la main d'œuvre, le coût dû au matériel étant plutôt faible voire négligeable.

Le recours à certains organismes publics ou bureaux d'études spécialisés peut être envisagé au cas par cas pour procéder à des examens et relevés géotechniques périodiques (carte géotechnique). Le coût d'une telle mission peut être estimé entre 1500 et 4000 à 5000 €, en fonction de l'importance du site et de la finesse des relevés. Il peut s'avérer plus important si les cavités sont très étendues et les conditions d'accès plus difficiles (zones ennoyées, etc.).

5.3 LA SURVEILLANCE INSTRUMENTEE

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

5.3.1 ROLE ET PRINCIPE

Ce mode de surveillance est mis en œuvre lorsque les études géotechniques préliminaires concluent à une incertitude sur l'évolution de la stabilité. Elle conforte l'analyse du géotechnicien en lui fournissant des éléments complémentaires pour ausculter, diagnostiquer et prévenir de l'imminence d'une éventuelle rupture (rupture de piliers, déflexion du toit, soulèvement du mur, etc.).

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

Les techniques actuelles de surveillance instrumentée font appel de plus en plus à la télémesure ou à la télésurveillance en remplacement de la surveillance par lecture

[*] Dans tout le présent rapport, les coûts sont donnés en € HT (valeur 2003).

directe, difficile à gérer sur le plan de la cadence des relevés et de l'immobilisation du personnel technique. Ces méthodes permettent d'alléger considérablement les tâches de relevé et de contrôle sur un grand nombre de points et d'optimiser la fréquence des mesures.

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

La détection des instabilités des terrains par les techniques de surveillance repose sur le principe de l'enregistrement de l'évolution des déformations, en vitesse ou accélération (figure 20).

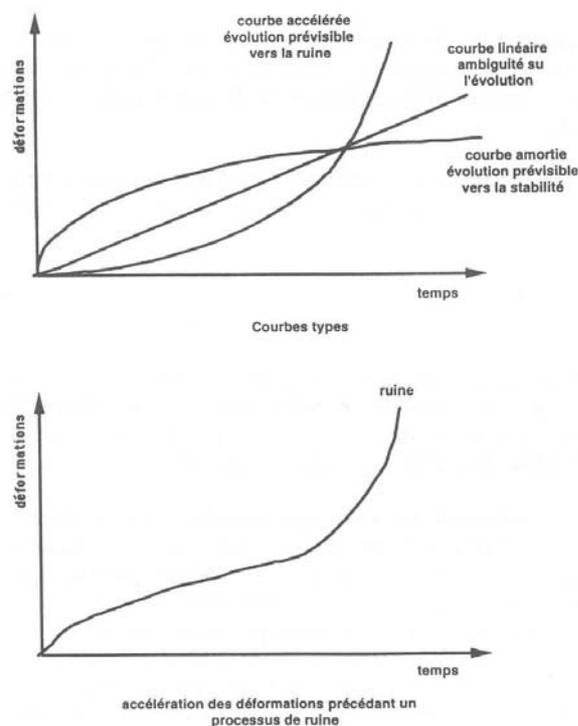


figure 20 : Principe de la surveillance, types de courbes des déformations en fonction temps

La méthode dite du « **gradient** » repose sur l'interprétation de la courbe d'évolution d'un phénomène en fonction du temps, à savoir :

- lorsqu'une cause, de quelque origine, vient perturber l'équilibre des terrains, ceux-ci évoluent normalement vers un nouvel état d'équilibre : cela se traduit par des déformations de l'excavation qui doivent s'amortir lorsque la cause perturbatrice a cessé (stabilité) ;
- toute évolution non amortie (instabilité) se traduit à plus ou moins brève échéance par une rupture. En fait, seule la détection d'une accélération permet véritablement d'envisager la ruine de l'excavation.

Des études menées dans d'anciennes carrières souterraines de craie du nord de la France, ont permis d'établir, à partir de mesures de convergence entre épontes, des gradients limites de vitesse ou d'accélération de déformation caractéristiques, et bon

indicateurs, de l'état de dégradation des ouvrages (Schwartzmann, Bivert et Delporte, 1989).

Vitesses moyennes	Dégradations
0 - 0,1 mm/an	Aucune évolution apparente, même en présence de toit ou de piliers fissurés.
0,1 - 0,3 mm/an	Petits écaillages, chutes intermittentes de petits blocs. Dégradation lente, de type discontinu.
0,3 mm/an	Chutes de toit, rupture de piliers. Eboulements plus ou moins fréquents, voire effondrement progressif de la carrière.

Tableau n° 1 : Vitesses critiques de déformations établies dans les carrières souterraines abandonnées de craie du Nord (d'après Schwartzmann, Bivert et Delporte, 1989)

Ces valeurs doivent être considérées comme représentatives d'un matériau et d'un bassin régional bien identifié. Elles ne sont pas transposables, en l'état, d'un site à un autre comme l'indiquent les valeurs du tableau ci-après :

Type d'exploitation	Nature du gisement	Type de mesure	Vitesses limites de déformation avant effondrement	Intervalle de temps entre l'alarme et l'éboulement
<i>Carrières souterraines abandonnées</i>				
Carrière souterraine de Saint-Saulve	craie	convergence	0,45 mm/an	3 à 6 mois
Carrière souterraine de Cruzilles	calcaire à ciment	convergence	0,91 mm/an	6 mois à 1 an
<i>Mines en activité</i>				
Mine de l'Aumance (HBCM) foudroyage - dépilage	charbon	expansion du toit	2 mm/heure 4 mm/heure	1 à 2 heures
Mine de la Mairy dépilage	Minerai de fer	expansion du toit	3 mm/heure	quelques minutes
Mine de Serouville dépilage	Minerai de fer	convergence en voie en bordure de dépilage	3 mm/heure	1 heure
Mine PMC (USA) longue taille	charbon	convergence en voie de 6,5 m	0,6 mm/jour 7 mm/minute	2 à 8 jours 1 à 20 minutes
Mine SUFCO (USA) longue taille	charbon	convergence en voie de 6,5 m	0,8 mm/jour	non disponible
Mine White Pine (USA) chambres foudroyées	Minerai de cuivre	convergence	0,4 mm/jour	9 à 10 jours

Tableau n° 2 : Vitesses de déformation critiques dans différents types d'exploitations (Tritsch, 1991)

Ce tableau donne quelques rares exemples de seuils limites déterminés à partir d'enregistrements réels, en considérant, d'une part, les carrières abandonnées et, d'autre part, les mines en activité. Les vitesses de déformations des terrains jusqu'à leur

effondrement témoigne de la très grande variabilité des valeurs mesurées suivant le type d'exploitation.

5.3.2 TECHNIQUES

a) Les appareillages à lecture directe

Une assez large panoplie de capteurs permet d'effectuer facilement des mesures précises de déplacement ou de pression par simple lecture. Il s'agit :

- d'instruments fixés sur les parois ou entre éponges (ciel et mur) tels que les fissuromètres, les convergencemètres, les extensomètres, etc.) ;
- d'instruments portables (comparateurs, palmers, pieds-à-coulisse, micromètres, ou distancemètres).

La surveillance instrumentée vient s'intégrer au circuit d'inspection et complète les investigations par des données de mesure précises et objectives. La fréquence des relevés est le plus souvent mensuelle, semestrielle ou annuelle. Elle correspond à la fréquence des inspections et dépend essentiellement de la vitesse d'évolution des ouvrages souterrains.

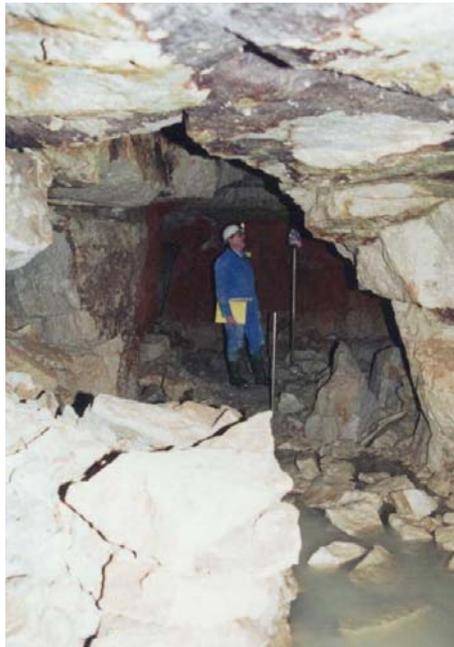


Figure 21 : surveillance manuelle à partir d'une canne de convergence munie d'un comparateur (région de Valenciennes, document SDICS)

b) La télémesure

La télémesure simple consiste à remplacer les comparateurs à lecture directe par des capteurs électriques puis à raccorder par câble chacun de ces capteurs à un bornier de mesure unique et d'accès facile (tête de puits, entrée de carrière, pied de falaise). Le relevé des mesures est effectué en quelques minutes, par un agent équipé d'un ohmmètre digital de haute précision. La périodicité des mesures est régulière (mensuelle ou hebdomadaire, quotidienne si nécessaire). L'exploitation des résultats est effectuée au laboratoire. Le dépouillement des mesures s'opère de façon manuelle ou informatisée.



Figure 22 : Surveillance par télémesure à partir d'un fissuromètre

c) La télésurveillance

La télésurveillance ou télémesure automatique consiste à interroger chaque capteur, à une fréquence déterminée, grâce à un automate programmable puis à télétransmettre par modem les données vers un poste central de surveillance qui archive et traite informatiquement des données reçues. Un exemple de dispositifs de mesure par télésurveillance est présenté sur la figure 23.

Dans certaines techniques récentes, comme l'écoute microsismique, le capteur (géophone ou accéléromètre) transmet directement à la centrale d'acquisition les signaux vibratoires captés à partir des mouvements du sol.

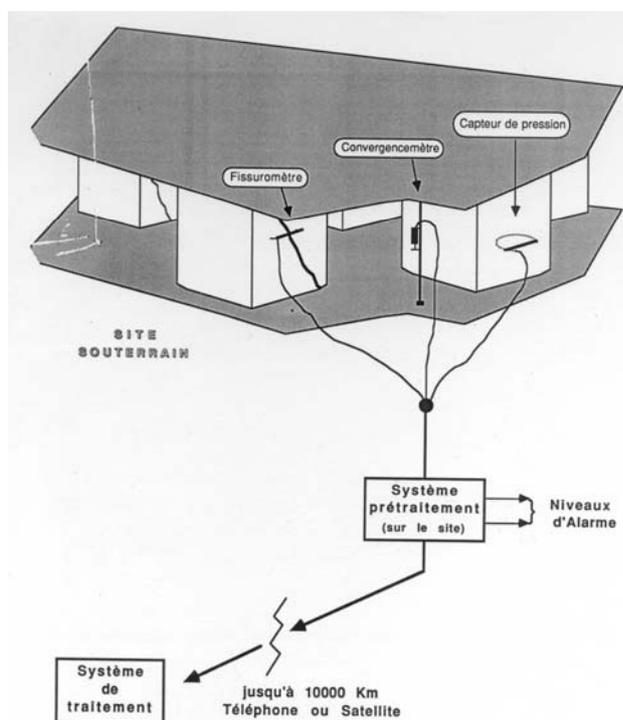


figure 23 : principe de télésurveillance d'une carrière souterraine

Le micro-ordinateur pilotant la scrutation des entrées digitales ou analogiques des capteurs, effectue localement, en temps réel, des traitements pouvant être relativement complexes : validation et test des mesures, traitement statistique, modification des paramètres de scrutation, gestion des alarmes locales ou télétransmises, archivage local et temporaire des données.



Figure 24 : Centrale d'acquisition automatique (carrière de gypse du Jura)

La fréquence des mesures dépend de la rapidité d'évolution des phénomènes et peut donc varier dans le temps. En fait, ce n'est pas seulement la fréquence des mesures qui est importante, mais plutôt la fréquence d'exploitation de ces mesures : c'est cette dernière qui conditionne la décision et les dispositions de sécurité à prendre (par exemple : évacuation si péril imminent).

Exemples :

- carrières de craie dans le nord : une mesure de convergence toutes les demi-heures, mais exploitation seulement une fois par jour (SDICS - INERIS) ;
- carrière de calcaire en Gironde : une mesure de convergence par jour télétransmise et exploitée une fois par jour (BRGM) ;
- carrière de calcaire en Charente : une mesure toutes les deux heures, avec exploitation au départ hebdomadaire puis mensuelle (INERIS) ;
- Suivi des effondrements en Lorraine par un réseau d'écoute microsismique avec transmission à distance des signaux sur une centrale d'acquisition. Une équipe de techniciens d'astreinte assure le suivi du réseau pour toute alerte éventuelle (INERIS).

5.3.3 DISPOSITIFS DE MESURE ET PERFORMANCES

Les techniques de mesure relèvent de la surveillance instrumentée. A part la microsismique, utilisée de façon très ponctuelle dans des situations très particulières, elles sont essentiellement rattachées à 3 types d'investigations in situ :

- les mesures du déplacement ou de la déformation (mesure relative) ;
- les mesures de pression ou de contrainte ;
- les mesures de température et d'hygrométrie (pour mémoire).

On peut, si nécessaire, compléter les mesures réalisées au fond par des mesures de surface telles que des relevés topographiques de nivellement (notamment en toit de carrière suivant des cheminements en galeries¹), de pente par inclinométrie, ou de remontées de nappe par piézométrie.

¹ Comme dans le cas de la carrière de MERIEL (95), instrumentée par le LCPC

a) Les mesures de déplacement ou de déformation

Les mesures de surveillance les plus courantes sont, les mesures de déplacement des terrains. On peut en distinguer trois principaux types :

- la *convergence*, mesure du rapprochement vertical entre épontes (ciel et mur) ou horizontal entre parements ;
- l'*expansion*, mesure de la dilatation volumique des piliers (ou fluage) ou de la séparation des bancs du toit ;
- la *fissuométrie*, mesure de l'écartement des fissures mécaniques.

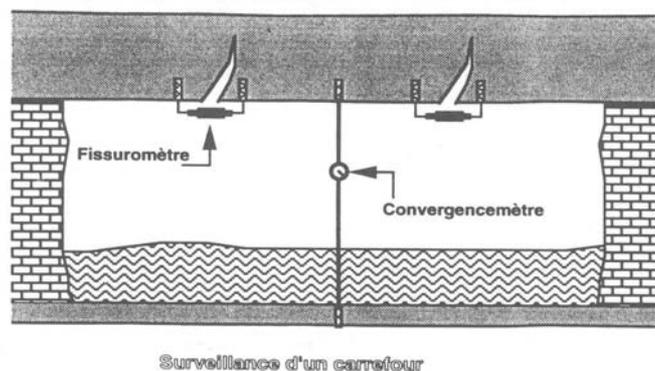
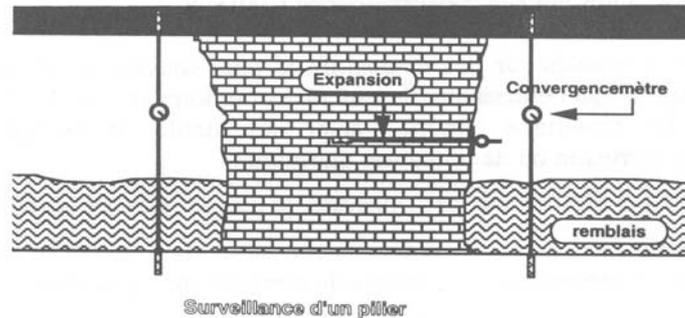
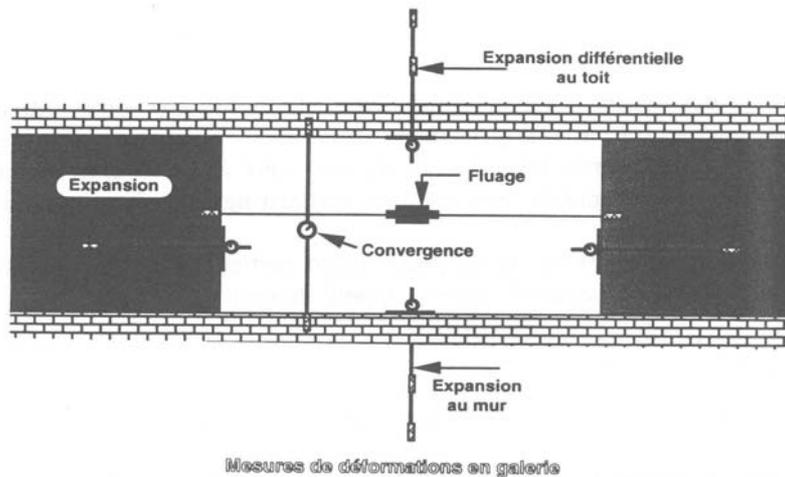


figure 25 : dispositifs de surveillance de cavités souterraines

Les systèmes de mesure les plus courants sont, soit des capteurs à lecture directe comme ceux évoqués précédemment, soit des capteurs électriques (résistifs, inductifs ou cordes vibrantes) utilisés nécessairement pour la surveillance instrumentée (figure 25).

Les capteurs sont montés sur des dispositifs le plus souvent mécaniques comme des cannes de mesure à tige coulissante, des ancrages formant des doublets de mesure ou des boulons spéciaux. Les montages sont réalisés dans des matériaux choisis pour éviter les phénomènes de corrosion ou de dilatation thermique, comme l'acier inoxydable ou l'invar.

La précision relative effective de ces systèmes de mesure se situe autour de 0,1 %.

b) Les mesures de pression

les mesures de pression (ou « mesures pressiométriques »), largement utilisées dans le domaine du génie civil ou minier, le sont plus rarement dans le domaine de la surveillance des carrières souterraines.

Les systèmes classiques sont constitués de cellules pressiométriques hydrauliques (cellules de pression de tous types, vérins plats, etc.) dotés de capteurs électriques ou d'instruments à lecture directe (manomètres).

La précision relative effective de la mesure est de l'ordre de 1 %.

Une expérimentation de ce type menée ces dernières années par l'INERIS a permis sur la carrière de Livry-Gargan (BPB Placoplâtre) de mettre en évidence l'effet de fretage des piliers par un remblaiement partiel du fond (Collet & al., 2004).

5.3.4 DOMAINES D'UTILISATION

Les techniques de surveillance sont utilisées principalement comme moyen de prévention dans les cavités souterraines que l'on veut conserver intactes et ouvertes, dans de bonnes conditions de sécurité ou de salubrité, là où les enjeux sont parfois importants : habitations sous-minées, établissement recevant du public (écomusées, centre thermal, etc.).

Dans le cas de cavités souterraines abandonnées ne présentant pas d'intérêt quant à leur conservation (sites non classés), les méthodes de surveillance sont utilisées pour différer ou répartir dans le temps les opérations de traitement nécessaires, pour des raisons purement économiques, mais aussi pour contrôler l'efficacité de travaux de renforcement sur la stabilité d'un site réhabilité. Elles supposent la carrière suffisamment accessible et saine pour assurer une sécurité acceptable pour le personnel d'intervention.

Dans le cas de carrières inaccessibles en site à faibles enjeux, la surveillance peut être utilisée comme une technique complémentaire, par exemple par observation ou mesure en forages. On peut opérer alors par vidéoscopie ou extensométrie.

Dans les carrières de grande extension (plusieurs hectares ou dizaines d'hectares), la surveillance instrumentée ne semble guère convenir, le nombre de capteurs et le suivi des mesures devenant prohibitif sur le plan économique.

Dans le cas de cavités souterraines étendues et fortement dégradées, la surveillance instrumentée conventionnelle, au moyen de convergencemètres ou de fissuromètres, paraît également inadaptée du fait du caractère à la fois ponctuel et limité de l'implantation du réseau de capteurs. Dans cette situation, la seule piste prometteuse à terme est la recherche et le développement de méthodes de surveillance « en grand » par des techniques susceptibles de détecter les phénomènes physiques issus d'une libération brutale d'énergie à l'approche de la rupture des terrains. Les techniques telles que l'écoute sismique ou « sismo-acoustique » font partie de ces méthodes de détection et de localisation en grand même si, au stade actuel des recherches, leur application n'est encore envisageable que dans les cas où toutes les autres méthodes classiques, y compris de traitement (par comblement), sont inopérantes ou inadaptées économiquement.

5.3.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

La surveillance instrumentée, manuelle ou informatisée, est particulièrement bien adaptée au contrôle de l'évolution d'un site de dimensions limitées mais à risque et enjeux forts, comme dans le cas d'un établissement recevant du public. Elle permet, en outre, d'assurer de façon passive, une mise en sécurité préventive des populations lorsqu'elle s'accompagne de dispositifs ou de dispositions d'alerte.

Cependant, l'implantation de capteurs, même nombreux, ne fournit que des résultats ponctuels et le plus souvent localisés à une zone particulière. Cette localisation de l'information soulève donc le problème de la pertinence du choix de l'implantation, dont l'importance ne fait que s'accroître avec la diminution du rapport moyens financiers/surface à surveiller. En conséquence, au-delà de quelques hectares, la méthode de surveillance devient rapidement prohibitive par le coût, la mise en œuvre et le suivi qu'elle implique.

En outre, la difficulté majeure que soulève ce mode de prévention réside dans la fiabilité de l'ensemble du système, du capteur jusqu'au traitement des données. La fiabilité repose sur un ensemble de qualités (précision, fidélité, longévité, etc.) que doivent posséder non seulement les dispositifs de mesure mais aussi les organes de saisie et de traitement du signal si l'on veut éviter tout dysfonctionnement.

Cette méthode nécessite donc un certain nombre de précautions fondamentales pour sa mise en œuvre comprenant une phase de mise au point du système par des enregistrements et analyses préalables des mouvements sur site. Il s'agit, en effet, d'éviter à tout prix le déclenchement d'une alerte inutile ou au contraire de ne pas faire déclencher une alerte salutaire. Notons ainsi toute la difficulté de fixer des valeurs « seuils » fiables et suffisamment précises.

En outre, la surveillance ne se limite pas à une « simple » approche technique et analytique du risque mais implique aussi une organisation de la sécurité (gestion de la « crise »), depuis le déclenchement de l'alerte jusqu'à l'application de consignes ou de prescriptions particulières. Cet aspect pose le problème de la définition de la responsabilité de chacun, à commencer par celle qui incombe à la mission du géotechnicien, mais aussi au propriétaire du terrain, particulier ou société, ou au maire de la commune, responsable de la sécurité publique.

5.3.6 ASPECTS ECONOMIQUES [*]

La **surveillance instrumentée** est, normalement, une technique dont la mise en œuvre et la maîtrise sont du ressort d'un organisme spécialisé ou d'un bureau d'études qualifié. Les postes de financement se situent à différents niveaux :

- achat du matériel d'auscultation (capteur et dispositifs) ;
- achat du matériel d'acquisition (système de saisie et de traitement des données) ;
- maintenance des matériels ;
- rémunération du personnel chargé de la pose des appareillages, de la prise des mesures in situ ou de la gestion du système, du suivi à la décision d'alerte.

Pour donner une idée assez objective du coût financier d'une surveillance classique (saisie quotidienne, exploitation différée hebdomadaire ou mensuelle), l'analyse de plusieurs sites équipés et suivis par différents organismes spécialisés permet d'avancer les éléments tarifaires (purements indicatifs car évoluant en fonction des difficultés d'accès, des longueurs de câbles, etc.) suivants :

[*] Rappelons que dans tout le présent rapport, les coûts sont donnés en € HT (valeur 2003).

- coût unitaire moyen d'un dispositif de mesure de convergence complet installé au fond (fourniture, pose et calibrage) : 2 k€ à 5 k€ ;
- coût initial d'un système d'acquisition informatisé relié au réseau téléphonique (télésurveillance) ; 10 à 20 k€ ;
- coût annuel de mesures in situ relevées par un opérateur sur un système d'acquisition local à une fréquence mensuelle : 15 à 25 k€, selon le nombre de capteurs et la complexité du dispositif ;
- coût annuel de télémesure effectuée à une fréquence mensuelle à partir d'un système d'acquisition informatisé relié au réseau téléphonique : 10 à 20 k€ ;
- coût annuel de gestion d'un système de télésurveillance automatique, éventuellement doté d'un dispositif d'alarme (maintenance, suivi et exploitation des données) : 20 à 30 k€

A titre indicatif, pour une carrière, d'une étendue de un à quelques hectares, surveillée à partir d'une douzaine de dispositifs de mesure de la convergence, le bilan financier s'établit ainsi :

- coût initial total de l'installation et du suivi au cours de la première année : 30 à 60 k€, environ ;
- coût annuel de maintenance et exploitation des données : 10 à 15 k€, environ.

Il faut noter qu'à présent la fiabilité et la pérennité des matériels sont devenues satisfaisantes : l'expérience montre qu'il n'est pas rare de voir certains dispositifs et capteurs placés au fond se conserver, dans de bonnes conditions, au-delà de 10 ans.

6. LES TECHNIQUES DE CONSOLIDATION DES CAVITES

6.1 GENERALITES

Les modes de traitement des cavités souterraines par « **consolidation** » font appel à des techniques de protection active par renforcement ou soutènement des ouvrages. Mises en œuvre directement à partir du fond, ces techniques permettent de rétablir ou maintenir une stabilité suffisante des cavités, à plus ou moins long terme.

A l'exception de la technique du pilier artificiel injecté depuis la surface, les domaines d'utilisation des différentes techniques sont limités par deux conditions principales :

- l'espace souterrain doit être suffisamment accessible pour permettre le déploiement des moyens d'intervention dans les chantiers ;
- les conditions de sécurité et de salubrité des ouvrages souterrains doivent être satisfaisantes.

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

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

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

a) Techniques améliorant l'état

Il s'agit de techniques de traitement par « confinement » ou injection qui visent à améliorer la résistance globale de l'ouvrage.

Les techniques de confinement, comme le boulonnage, consistent à raidir la structure par un armement avec ou sans pré-tension qui, en s'opposant à l'expansion, permet de limiter les décollements des bancs du toit ou de maintenir une certaine cohésion entre les blocs.

D'autres techniques de confinement telle que la pose de grillage ou de treillis soudé épinglé, le béton projeté, le ceinturage ou « cerclage » s'appliquent prioritairement aux piliers ou aux parements des galeries. Le but recherché est, d'une part, de limiter les décollements ou l'écaillage et, d'autre part, de créer un effet de « triaxialité » en appliquant une précontrainte. Cet effet augmente notablement les propriétés de résistance du milieu et donc la capacité portante des piliers.

Les techniques d'injection, en milieu fracturé, permettent de restituer une certaine homogénéité et d'élever la cohésion ou le frottement interne du milieu.

b) Les techniques augmentant la portance

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

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

En fait, les deux actions se combinent le plus souvent, comme dans le cas d'un revêtement par béton projeté sur treillis soudé en association avec du boulonnage : le premier effet sera un confinement du pilier par un blocage de l'expansion latérale, le second un effet de soutènement après remise en charge du pilier.

6.2 LE BOULONNAGE

Le boulonnage est principalement utilisé dans les carrières souterraines comme un moyen de soutènement du toit, sans autre revêtement additionnel (figure 26). On l'utilise également pour le renforcement des piliers, souvent en association avec du grillage ou du béton projeté.

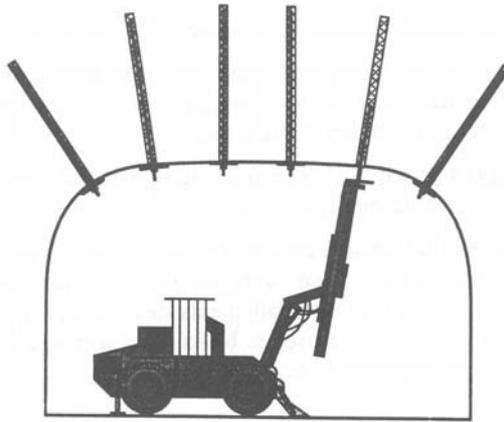


figure 26 : boulonnage mécanisé en chambres et piliers

6.2.1 ROLE ET PRINCIPE

Le boulonnage est un mode de soutènement « suspensif » qui fonctionne normalement en traction, parfois en cisaillement. Les fonctions usuellement assignées au boulonnage sont les suivantes :

- supporter le poids des blocs fracturés ou désolidarisés, menaçant de s'effondrer par l'effet de la pesanteur (toit) ;
- freiner et limiter les mouvements de la paroi, les stopper si possible (piliers).

Pour atteindre ces objectifs, le boulonnage doit jouer les rôles suivants :

- un rôle de soutien (des parties susceptibles de s'effondrer) ;
- un rôle de confinement (exercé sur la paroi et destiné à compenser partiellement le décollement) ;
- un rôle de renforcement interne du massif (ou d'armature), pour limiter les mouvements des discontinuités (cisaillements).

6.2.2 LES DIFFERENTES TECHNIQUES DE BOULONNAGE ET LEURS PRINCIPES

Indépendamment de leurs caractéristiques intrinsèques, les boulons sont ancrés dans la roche, soit par une tête d'ancrage, soit par un scellement réparti tout le long de la tige.

a) Boulons à ancrage ponctuel

Les boulons à ancrage ponctuel créent une force longitudinale appliquée sur le terrain. Cette force apparaît dès la pose, par l'effet de la mise en serrage du boulon au moyen de

la plaque et de l'écrou. Elle s'accroît ensuite par un effort de réaction exercé par la plaque qui réagit aux mouvements de la paroi accompagnant le déconfinement.

Ce type de boulon est souvent utilisé pour assurer le rôle de suspension, ainsi que le rôle de confinement. Il n'est, en revanche, pas recommandé pour le rôle de renforcement, car l'espace entre la tige du boulon et la paroi du trou dans lequel il est installé est vide sur toute la longueur de la tige, ce qui ne lui permet pas de s'opposer aux mouvements latéraux de glissement des discontinuités.

b) Boulons à ancrage réparti

Les boulons à ancrage réparti sont constitués d'une tige d'acier, soit lisse, soit crénelée, adhérant aux parois du trou sur toute sa longueur par l'intermédiaire d'un produit de scellement (mortier ou résine). Après la prise du produit de scellement, ils développent une force longitudinale appliquée dès la mise en serrage de la plaque et renforcée par l'effort de réaction exercé par la plaque (figure 27).

Par ce type d'ancrage, le boulonnage permet de remplir les rôles de suspension et de confinement de la même façon que l'ancrage ponctuel. Il a l'avantage supplémentaire d'être bien adapté au rôle de renforcement (l'ouverture même minime d'une fissure, ainsi que les glissements relatifs bancs sur bancs en terrains stratifiés, mobilisent immédiatement la résistance du boulon). Les boulons en fibres de verre avec scellement à la résine conçus pour mieux résister à la corrosion, entrent dans cette catégorie.

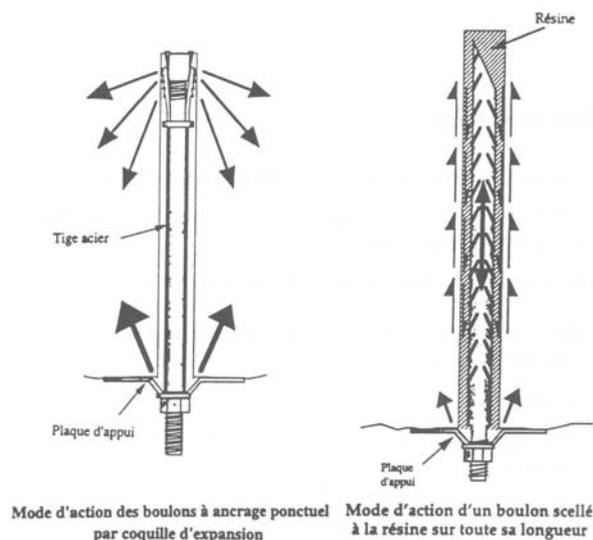


figure 27 : boulonnage par ancrage ponctuel et par scellement à la résine

Les *boulons à ancrage réparti sans scellement* ont pour caractéristique d'adhérer aux parois du trou par contact direct sur toute la longueur du boulon. Ce contact est assuré soit par gonflement du boulon après mise en place, soit par enfoncement en force du boulon dans le trou (ou même directement dans le terrain). La force longitudinale appliquée au terrain, décrite dans les autres types de boulonnage, est assurée ici par les réactions de frottement au contact boulon/paroi du trou. Différentes techniques permettent de mettre en œuvre ce principe : boulons à ancrage «mécanique» long (peu courant), barres foncées mais surtout boulons SPLIT-SET et boulons SWELLEX. Ce dernier type de boulonnage est rarement utilisé dans les carrières souterraines.

6.2.3 PERFORMANCES

Les performances du boulonnage sont liées aux caractéristiques de résistance des tiges matérialisées par leur nature (aciers, fibres de verre, etc.) et leur diamètre, mais aussi de la plaque et de l'ancrage, ou du scellement en ce qui concerne le boulonnage réparti.

A titre indicatif, la limite élastique à l'allongement peut varier classiquement de 100 à 300 kN, à condition qu'il n'y ait pas de risque de glissement de l'ancrage sur les parois du trou, qu'il s'agisse de la coquille d'expansion (boulon ponctuel) ou d'une défaillance du produit de scellement (boulon réparti).

La déformabilité des systèmes de boulonnage à ancrage ponctuel est plus grande que celle des boulons à ancrage réparti. La capacité d'allongement de l'acier est de l'ordre de 10 à 15 % mais, compte tenu de l'usinage et du façonnage des tiges, leur allongement réel est de l'ordre de 5 %. La capacité d'allongement des boulons à ancrage réparti est inférieure à 1 % : ce type de soutènement doit donc être considéré comme beaucoup plus « bloquant ».

6.2.4 DOMAINES D'UTILISATION

Le boulonnage ne peut être utilisé dans les opérations de renforcement de la dalle du toit (ciel) que sous deux conditions :

- que les terrains ne soient pas trop fracturés, ni trop plastiques, ni trop peu résistants ;
- que l'agressivité du milieu ne soit pas un obstacle rédhibitoire (corrosion, milieu sulfaté, etc.) et les venues d'eau limitées.

Dans le premier cas, on peut recourir à un garnissage ou revêtement additionnel (grillage, béton projeté), dans le second cas, à la mise en place de boulons du type fibre de verre.

L'on conçoit ainsi que le boulonnage soit mieux adapté aux carrières de calcaire plutôt qu'aux carrières de gypse, milieu agressif a priori et défavorable sur le plan géomécanique (planche de toit généralement peu épaisse, surmontée de marnes constituant un recouvrement pesant).

Pour davantage de détails on se reportera aux recommandations de l'AFTES (Association Française des Travaux en Souterrain), en particulier : condition d'emploi du boulonnage (1979-n°31) et conception et dimensionnement du boulonnage.



Figure 28 : Renforcement d'un passage karstique au toit par boulonnage

6.2.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Pour des raisons pratiques de pose, le boulonnage ponctuel est le plus pratiqué (pose manuelle).

Le boulonnage à ancrage réparti nécessite des engins mécanisés (jumbo de boulonnage). Appliqué à des chantiers importants, le boulonnage peut se prêter très bien à une mécanisation intensive qui augmente considérablement la cadence de pose et l'efficacité du soutènement. Par son caractère « plus bloquant » et l'absence de vide annulaire entre la tige et la paroi du trou, il présente a priori une plus grande efficacité et une plus grande pérennité.

Il faut noter à ce sujet que la pérennité de ce mode de soutènement pose un problème encore mal résolu. Il semble que la durée de vie d'un boulon classique (scellement réparti ou même ponctuel) puisse atteindre sans trop de difficulté une trentaine d'années dans des conditions normales de site. Dans les milieux agressifs, il convient de prendre une marge de sécurité en adoptant une certaine surépaisseur de l'acier (plus grand diamètre de boulon, par exemple).

Le boulonnage se caractérise également par une technologie assez délicate, de sa conception à sa pose. Utilisé dans des sites sensibles (nature des terrains, où enjeux en surface), le boulonnage doit être périodiquement contrôlé à tous les niveaux (réception, stockage, mise en place, vieillissement, etc.).

6.2.6 ASPECTS ECONOMIQUES

En fonction de l'importance du chantier et des possibilités de mécanisation, l'expérience acquise sur des chantiers mécanisés relativement importants montre que le coût de mise en place est le plus souvent compris entre 45 €/m² et 100 €/m² pour un schéma de boulonnage standard (longueur : 2,40 m ; densité : 0,5 boulon/m²).

Le coût supplémentaire apporté par l'association d'un grillage et d'une projection de béton de 5 cm d'épaisseur peut être estimé de l'ordre de 40 €/m² à 80 €/m².

6.3 LES SOUTÈNEMENTS PORTEURS EN GALERIES : MAÇONNERIES, CADRES ET REVÈTEMENTS BETONNES

6.3.1 ROLE ET PRINCIPE

Différents moyens de soutènement des ouvrages ont été utilisés de tous temps, comme les cadres en bois, les muraillements ou les voûtes en maçonnerie et les cadres métalliques. Ces soutènements avaient pour but d'assurer un rôle de protection du personnel contre la chute de blocs ou un rôle de revêtement destiné à s'opposer aux déformations, surtout de la voûte, en particulier dans les galeries tracées en roches meubles ou fracturées.

Contrairement au boulonnage qui constitue un soutènement « suspensif », ces soutènements sont désignés comme des soutènements « porteurs » : plaqués le plus directement possible à la paroi des terrains encaissants, ils maintiennent rigoureusement la structure en la « supportant » de façon active pour s'opposer aux pressions de terrain.

Ces soutènements sont utilisés dans les carrières souterraines en exploitation, de façon très localisée, dans les passages difficiles et instables. Dans les carrières souterraines abandonnées, ils sont utilisés comme moyens de renforcement pour s'opposer à la rupture de la voûte en ciel et donc aux phénomènes de montée de voûte, mais aussi pour s'opposer aux déformations des parois de galeries.

6.3.2 PRINCIPAUX TYPES

Les principaux types de soutènement porteur dans les ouvrages souterrains, sont les maçonneries, les cadres et les revêtements bétonnés.

a) *Les maçonneries pour le soutènement des voûtes*

Du XIX^{ème} siècle au milieu du XX^{ème} siècle, environ, la consolidation des anciennes carrières souterraines étaient essentiellement réalisées par des maçonneries afin de soutenir le toit (ciel) aux endroits les plus faibles ou sous les principaux points de surcharge :

- **les voûtes maçonnées** constituaient le soutènement le plus classique là où seule la tenue du toit posait des problèmes de stabilité. Les voûtes les plus courantes étaient réalisées sans piédroits en s'ancrant suffisamment en profondeur dans les parements rocheux. Elles pouvaient être en plein cintre ou déversées.
- **le muraillement massif en plein cintre** s'opérait 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.

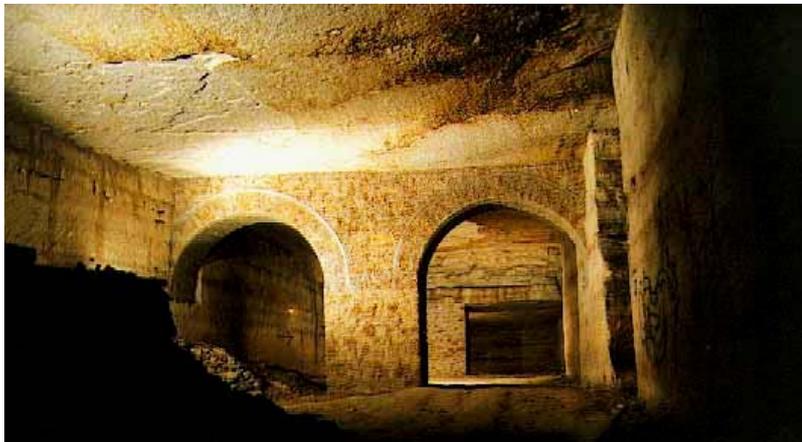


figure 29 : soutènement de chambres par maçonneries (document IGC-Paris)

Les maçonneries devaient impérativement reposer sur le «bon sol» et dans certains cas, il était nécessaire de maçonner également le mur de la galerie en réalisant un radier, le plus souvent en forme de voûte très surbaissée.

Se situaient également dans la même catégorie de travaux, les **murs de masques** réalisés dans la hauteur de la carrière, les **galeries maçonnées** destinées à soutenir des ouvrages linéaires (canalisations ou voies), ainsi que les **ceintures de fontis** destinées à soutenir le ciel au voisinage de l'accident. Ces ceintures formaient des murs en moellons hourdis au mortier dont l'épaisseur atteignait 0,80 à 1 mètre.

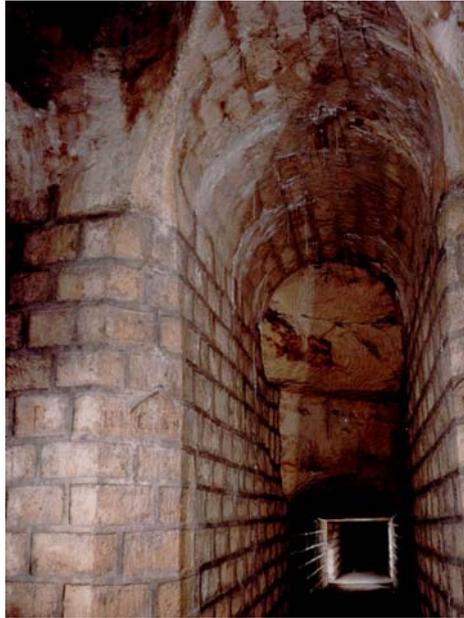


Figure 30 : Galerie maçonnée du réservoir de Montsouris (source : ICG-Paris)

b) Le soutènement métallique par cadres ou cintres

Les soutènements métalliques apparaissent à la fin du XIX^{ème} siècle sous forme de portiques ou d'étauçons en remplacement du bois et de la maçonnerie. On distingue :

- les **cadres**, utilisés essentiellement dans les galeries de section quadrangulaire (c'est-à-dire de forme rectangulaire ou trapézoïdale) ;
- les **cintres**, utilisés dans les galeries à géométrie semi-circulaire (beaucoup plus rares).

Les *cadres métalliques* quadrangulaires sont constitués d'éléments droits (poutrelles, rails, etc.) assemblés par des cornières rivées au chapeau et boulonnées aux montants. Contrairement aux cintres qui peuvent « coulisser », les cadres rigides ont un caractère « bloquant » qui s'oppose le plus rapidement possible au « déconfinement » des terrains par une action active de « supportage » (ou portance). Leur rôle est de soutenir le poids des blocs ou des parties de massif susceptibles de s'effondrer. Là encore, l'assise sur un « bon sol » est une condition indispensable à leur efficacité.



Figure 31 : Renforcement du toit d'une galerie par des cadres métalliques

c) Les revêtements bétonnés

Les revêtements bétonnés peuvent être utilisés, de façon ponctuelle, comme un moyen très efficace de stabilisation des terrains en assurant, par ailleurs, un rôle d'étanchéité face aux venues d'eau. Ils sont employés dans des conditions très dégradées ou stratégiques (protection des galeries d'accès).

Deux techniques peuvent être appliquées en fonction des conditions de site, de la géométrie des ouvrages et des possibilités de mécanisation de pose, à savoir :

- le revêtement par béton projeté ;
- le revêtement par béton coffré (armé ou non).

Le **béton projeté** (ou « shotcrete ») est un béton mis en œuvre par refoulement dans une conduite et projeté sur les parois par un jet d'air comprimé.

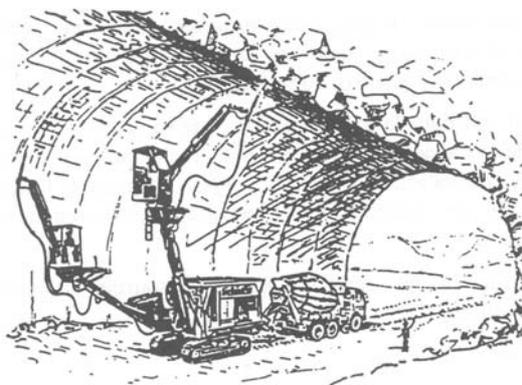


figure 32 : projection de béton en galerie (d'après un schéma du catalogue DRAMIX)

Il forme alors un revêtement uniforme de faible épaisseur (environ 5 cm, parfois davantage) qui se présente comme une coque mince qui assure une fonction de confinement vis-à-vis des déformations. Le béton projeté peut être armé, renforcé par des armatures, ou même associé à du boulonnage ou à des cadres métalliques.

Les revêtements en **béton coffré** ont progressivement remplacé la maçonnerie comme soutènement « annulaire » des galeries sensibles. Leur épaisseur est classiquement de l'ordre de 20 à 40 cm. Le béton est généralement non armé mais, dans certains cas, on peut procéder à un armement par ferrailage, pose de treillis ou blindage.

6.3.3 PERFORMANCES

Les différents modes de soutènement porteur utilisés comme renforcement localisé, admettent des capacités de portance très élevées et de déformabilité très faibles qui permettent une opposition aux mouvements du terrain à caractère bloquant.

A titre indicatif, un **soutènement métallique** classique (par exemple un profilé type TH de 80 kg/m) peut supporter une charge ponctuelle médiane de l'ordre de 200 à 500 kN à la flexion, en fonction de la nature de l'acier et du type de profilé (poids), ce qui représente pour une distance intercadre de 125 cm, une pression de 2 à 5 MPa.

Pour la **maçonnerie**, on considèrerait, 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 (Haton de la Goupillière, 1920).

Les **revêtements bétonnés** offrent l'avantage d'opérer un contact immédiat avec la paroi rocheuse. Leur résistance la plus faible (à la traction) varie de 1,5 à 8 MPa, en fonction de la nature du béton et des armatures.

Ces valeurs de portance montrent que ces soutènements sont adaptés aux terrains ayant tendance à se détendre (charge pesante) ou, à faible profondeur, aux terrains déconsolidés, quand il s'agit de résister à la charge gravitaire de tout ou partie du recouvrement.

6.3.4 DOMAINES D'UTILISATION

Les soutènements porteurs ne sont mis en place que 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, etc.

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 (Samuel-Lajeunesse, 1965). Les travaux s'accompagnaient souvent d'un comblement total ou partiel de certaines zones de carrière.

Le domaine d'utilisation de ce soutènement n'est pas limité au calcaire grossier dans la mesure où leur adaptation à tous types de terrains ne pose pas de problèmes particuliers, comme on peut le constater dans le domaine du Génie Civil. Toutefois, l'implantation des soutènements métalliques en milieu « agressif » pose des problèmes de pérennité (cas du gypse).

Pour plus de détails, se reporter aux recommandations de l'AFTES : Conception et dimensionnement du béton projeté (2001-n°164 et 165), Béton projeté renforcé de fibres (1994-n°126), Soutènement immédiat par béton projeté et boulonnage (1979-n°31), Emploi des cintres en travaux souterrains (1978-n°27), Choix du soutènement en galerie (1974-n°1).

6.3.5 PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Les méthodes de renforcement par un soutènement porteur sont très intéressantes de par leur performances de portance et leur emploi dans des conditions de terrain particulièrement difficiles.

Il s'agit, néanmoins, de moyens de renforcement qui ne peuvent être que localisés, car les matériels sont onéreux et leur mise en œuvre mobilise le plus souvent un personnel important. En outre, l'efficacité du renforcement repose sur le bon choix du type de soutènement et surtout la reconnaissance des zones à conforter prioritairement. La bonne adaptation et le dimensionnement des équipements est affaire de spécialistes expérimentés dans le domaine de la géotechnique.

Un inconvénient du revêtement bétonné dans les carrières de gypse est la formation possible de circulations d'eau derrière le béton qui entraînent la dissolution du gypse et la perte du contact entre le béton et le terrain (exemple de la falaise du parc des Buttes Chaumont).

6.3.6 ASPECTS ECONOMIQUES

Pour des raisons de productivité (durée des travaux élevée, main-d'œuvre importante, etc.), le revêtement en maçonnerie n'est plus guère utilisé aujourd'hui que dans des cas très rares, comme des opérations de réhabilitation. A titre purement indicatif, on estimait, à partir de données de travaux anciens, que le coût du mètre linéaire de voie consolidée en petite section était de l'ordre de 900 € à 2 500 € par mètre linéaire, suivant les cas, pour un coût moyen du mètre cube maçonné d'environ 350 €/m³.

M. Samuel-Lajeunesse (IGC Paris) indiquait, à partir de travaux effectués au début des années 1960, que le coût moyen des consolidations maçonnées était de l'ordre de 180 € par mètre carré consolidé en surface (chiffres réactualisés en valeur équivalente 2003).

Le soutènement par cadres est notablement moins onéreux, mais son coût se révèle extrêmement fluctuant, en fonction du modèle de cadre, du mode de pose (manuel ou mécanisé) et de l'approvisionnement des matériels (transport, difficultés d'acheminement). On peut situer, néanmoins, le coût moyen du cadre posé entre 500 et 1 000 €/unité, pour une section classique de l'ordre de 15 à 20 m².

6.4 ARMEMENT DES PILIERS PAR BOULONS ET TIRANTS

6.4.1 ROLE ET PRINCIPE

Les généralités de cette technique ont été exposées précédemment au chapitre consacré au boulonnage.

Le renforcement par boulons ou par tirants s'appuie sur le principe du confinement par frettage (figure 29). Il s'applique aux piliers fracturés mais non ruinés.

Les boulons sont implantés géométriquement sur les quatre faces des piliers à une profondeur déterminée (longueur du boulon), tandis que les tirants traversent le pilier de part en part. Les boulons et tirants sont, dans pratiquement tous les cas, scellés au ciment ou à la résine et prétensionnés (léger serrage initial).

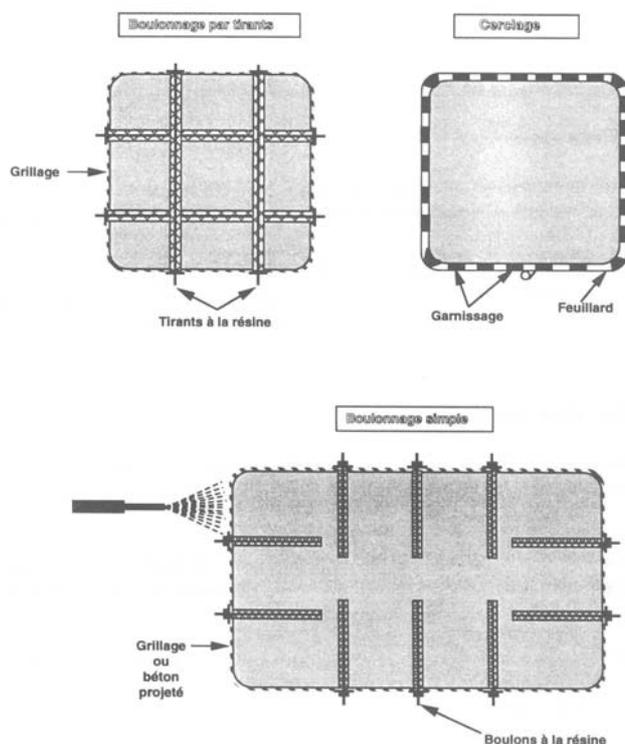


figure 33 : renforcement des piliers par boulonnage ou tirants avec pose de grillage ou projection de béton



Figure 34 : Pilier renforcé par boulonnage, avec grillage (carrière de la Brasserie, Vincennes)

6.4.2 PERFORMANCES

Appliqué au renforcement des piliers, des essais ont montré que le boulonnage était capable de développer des contraintes de frettage de l'ordre de 2 MPa en fin de phase élastique. On peut encore accroître le confinement en augmentant la résistance des boulons ou la densité du boulonnage.

6.4.3 DOMAINES D'UTILISATION

Le boulonnage ou la pose de tirants sont des techniques de renforcement adaptées aux piliers fracturés dans les mêmes domaines d'utilisation que le boulonnage du toit (§ 7.2).

En ce qui concerne plus spécifiquement les piliers, ces techniques ne s'appliquent de façon efficace que si les piliers sont rompus mais non ruinés ce qui sous-entend un certain état d'homogénéité ou de cohérence des blocs à la paroi des piliers. Dans le cas de piliers peu cohérents ou fortement fracturés, on a intérêt à améliorer le confinement par l'association d'un grillage ou d'un treillis soudé.

6.4.4 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Il s'agit d'un mode de renforcement performant et de mise en œuvre assez aisée et aussi rapide que la pose soit manuelle (boulonnage ponctuel) ou mécanisée (boulons et tirants à ancrage réparti, scellés à la résine ou au mortier). Son action de renforcement est immédiate si l'on accompagne la pose d'un serrage initial.

Toutefois, son efficacité dépend de la qualité des matériels mis en œuvre, ainsi que du dimensionnement dont l'évaluation est l'affaire de spécialistes.

6.4.5 ASPECTS ECONOMIQUES

Un exemple réel de renforcement en carrière, parfaitement accessible à des engins, effectué sur une dizaine de piliers sur la base de 12 boulons longs scellés au ciment par pilier ou 6 tirants traversants également scellés au ciment, a abouti à un coût moyen de 3 800 € par pilier (de 6 x 6 m pour une hauteur de 5 m), foration comprise, soit approximativement 270 à 360 € par boulon ou 550 à 750 € par tirant, ou encore 30 € à 40 €/m² de surface traitée.

6.5 PROJECTIONS DE BETON OU DE RESINE

6.5.1 ROLE ET PRINCIPE

Le rôle du béton projeté appliqué aux parois des piliers est essentiellement un rôle de confinement. Il joue également un rôle de renforcement dans la mesure où son action prévient ou minimise les déformations excessives du massif rocheux en augmentant la résistance du milieu.

6.5.2 NATURE DES PRODUITS

A l'instar des mines souterraines, on désigne sous le terme de **gunitage** une coque mince dont les éléments constitutifs sont variables et le plus souvent synthétiques (résines synthétiques, mélange de fibres et résine, etc.).

Le terme de **béton projeté** (ou **Shotcrete**) est réservé à la projection de béton avec incorporation de particules plus grossières dans le mélange.

6.5.3 ASPECTS TECHNIQUES ET PERFORMANCES

Des expérimentations en laboratoire ont montré qu'un enrobage de résine ou de mortier autour d'éprouvettes pouvait établir une étreinte de confinement supérieure à 0,5 MPa et donc augmenter de façon très importante la résistance du matériau.

Il n'est pas nécessaire que le produit soit projeté sur une grande épaisseur, en général 5 cm suffisent, l'important étant que le produit enrobe parfaitement l'ensemble du pilier. Le revêtement de béton projeté est réalisé souvent en association avec du grillage ou du treillis soudé.

Par ailleurs, la technique par projection permet d'augmenter sensiblement la portance du pilier si l'épaisseur du revêtement est poussée jusqu'à 15 ou 20 cm voire davantage. Cette mise en œuvre correspond alors plutôt à un ceinturage de pilier. Elle nécessite une projection en plusieurs passes successives.

6.5.4 DOMAINES D'UTILISATION

Contrairement au boulonnage, la technique du béton projeté ne permet pas d'appliquer une précontrainte mais engendre, par son revêtement uniforme, une contrainte de confinement. Elle s'emploie donc préférentiellement lorsque la roche est davantage déconsolidée ou sujette à l'altération et à l'écaillage, là où le boulonnage s'avère plus délicat voire inefficace.

Dans les cas les plus difficiles, piliers très déconsolidés ou soumis à de fortes contraintes, le béton projeté peut être associé à du boulonnage, ou éventuellement renforcé par des armatures, grillage, treillis soudé ou encore « armé » de fibres d'acier ou de matières plastiques (technique visant à remplacer le treillis soudé épinglé).

6.5.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Cette méthode présente l'avantage d'être une technique « douce » qui minimise les interventions perturbantes comme la foration, les vibrations, etc.

Technique performante, elle allie à ses propriétés de confinement mécanique des propriétés d'étanchéité qui protègent les structures, mais qui peuvent se révéler dangereuses dans le cas de venues d'eau importantes. Le drainage est une précaution élémentaire qu'il convient de considérer.

Sur le plan pratique, la mise en œuvre du béton projeté est une opération plutôt pénible et insalubre pour le personnel. Délicate sur le plan de la réussite, elle dépend en grande

partie des compétences de l'opérateur (pertes et rebonds, vides, régularité du débit, efficacité de la projection, etc.). En outre, pour obtenir des résultats satisfaisants à long terme, il est souvent nécessaire de procéder à une certaine préparation du support.

6.5.6 ASPECTS ECONOMIQUES

Un exemple de petit chantier en Charente Maritime a montré que la projection de béton (seule), appliquée en coque mince de l'ordre de 5 cm d'épaisseur, revenait approximativement à 35 à 70 €/m². Associé à du grillage standard, le coût atteignait 45 à 80 €/m².

En revêtement plus épais (10 ou 15 cm), le coût dépend essentiellement de l'épaisseur de béton (application en plusieurs passes de projection) et peut facilement dépasser 100 €/m².

6.6 CEINTURAGE - CERCLAGE DES PILIERS

6.6.1 ROLE ET PRINCIPE

Le renforcement par boulonnage ou béton projeté peut s'avérer inopérant voire même dangereux sur des piliers très endommagés. Si l'objectif est leur maintien, on peut avoir recours à des solutions de restauration non « traumatisantes » qui consistent à entourer le pilier d'une nouvelle « peau » rigide plus ou moins épaisse, dont le rôle est :

- de bloquer définitivement les déformations ;
- de redonner une fonction de cohésion par confinement et d'améliorer ainsi les caractéristiques de résistance ;
- d'augmenter éventuellement la capacité de portance.

6.6.2 TECHNIQUES ET MISES EN ŒUVRE

Le ceinturage rigide du pilier peut être réalisé de différentes façons :

- par des dispositifs de cerclage métalliques plus ou moins prétensionnés plaqués directement sur les faces du pilier ;
- par la pose de panneaux métalliques jointifs appliqués par cerclage (type Kennedy Steel Stoppings ou autres, etc.) ;
- par un revêtement périphérique bétonné épais mis en place à partir de différents types de coffrages : coffrage traditionnel maçonné, panneaux métalliques ou en bois, coffrage circulaire métallique.

Pour être particulièrement efficaces, ces procédés de ceinturage (revêtement bétonné) nécessitent des précautions particulières de préparation, d'affouillement et surtout de clavage si l'on veut assurer une bonne capacité de portance du pilier, par exemple :

- sablage des faces pour assurer une bonne prise du béton ;
- affouillement de la sole sur chaque face des piliers ;
- réalisation d'une semelle en béton armé ;
- mise en place d'un béton adapté offrant une résistance suffisante et un très faible retrait ;
- coffrage adapté pour béton pompé, ou muraillement en parpaings agglomérés pleins de 0,20 m avec raidisseurs et chaînage dans des éléments spéciaux. Le coffrage ou le muraillement doit être disposé de manière à pouvoir couler une ceinture de béton de 0,50 m minimum autour de chaque face du pilier ;

- injection de blocage de tête en voûte. Après séchage du béton, mise en place par injection sous faible pression d'un coulis de ciment dosé de 1 200 kg/m³ environ pour assurer un clavage (ou « matage ») parfait au contact du toit.

6.6.3 PERFORMANCES

Ces techniques permettent d'obtenir une pression de confinement non négligeable d'au moins 0,2 jusqu'à 0,8 MPa, comparable à celle du revêtement par béton projeté.

Dans le cas d'un ceinturage par béton coffré, l'étreinte latérale de 0,8 MPa correspond approximativement à la résistance admissible d'un anneau de béton de 50 à 60 cm d'épaisseur et de 2 à 3 m de diamètre interne.

En outre, pour une telle dimension de pilier, la portance finale est en principe du double de la portance du pilier originel, sous réserve de résolution des problèmes de clavage.

6.6.4 DOMAINES D'UTILISATION

Ce type de traitement est principalement réservé aux piliers fortement fracturés ou ruinés pour lesquels la restauration est impérative (emplacement stratégique, par exemple). Il peut éviter l'édification de piliers artificiels supplémentaires.

Contrairement aux méthodes de boulonnage ou de projection de béton, ces techniques ne peuvent être utilisées que de façon ponctuelle sur un nombre relativement limité de piliers. Elles exigent que les conditions de stabilité et d'accès soient suffisamment bonnes, et ne se conçoivent que si l'intérêt de maintenir les ouvrages ouverts est justifié.

6.6.5 PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Ce traitement permet d'améliorer par triaxialité la portance initiale du pilier résiduel. Le pilier restant en place, il élimine ou minimise aussi les problèmes de clavage et de mise en serrage que l'on rencontre inévitablement avec les piliers artificiels. Toutefois, la dilatation de l'anneau bétonné n'étant pas infinie (de l'ordre de 1.10^{-3} , environ), il convient de renforcer au mieux le contact au toit par un clavage (ou matage) de blocage en voûte, sous faible pression.

Les opérations sont plus délicates, plus longues de mise en œuvre et plus contraignantes que l'édification de nouveaux piliers maçonnés. Le choix de cette méthode de traitement dépend donc du contexte et de son enjeu.

En outre, pour des raisons pratiques et économiques, ces techniques ne peuvent pas s'appliquer aux carrières de grandes dimensions, en particulier de grande hauteur (souvent supérieure à 7-8 m dans le calcaire, jusqu'à 10-15 m, voire plus, dans le gypse).

6.6.6 ASPECTS ECONOMIQUES

Sur un chantier facilement accessible, de moyenne importance, comportant le renforcement de 6 piliers, la technique de revêtement annulaire bétonné derrière coffrage, appliquée à des piliers de dimensions courantes (par exemple : 3 m x 3 m x 4 m) est revenue à un coût moyen de l'ordre de 8 000 € à 15 000 € par pilier, soit, approximativement, à 250 €/m³ (pour une épaisseur bétonnée de 50 cm environ), en considérant le volume final et total du pilier après bétonnage.

Les dispositifs de ceinturage direct du pilier par cerclages des panneaux métalliques devraient représenter à peu près le même coût économique (pas d'exemples présents).

6.7 EDIFICATION DES PILIERS ARTIFICIELS

6.7.1 ROLE ET PRINCIPE

La construction de nouveaux piliers s'impose dans des configurations où seule une augmentation de la portance peut stopper le fléchissement d'ensemble du toit. Le principe est de reprendre les efforts dus au poids des terrains ou à des surcharges (bâtiments) à partir du mur de la carrière, pour mieux répartir et alléger les sollicitations sur les structures de la cavité (figure 31).

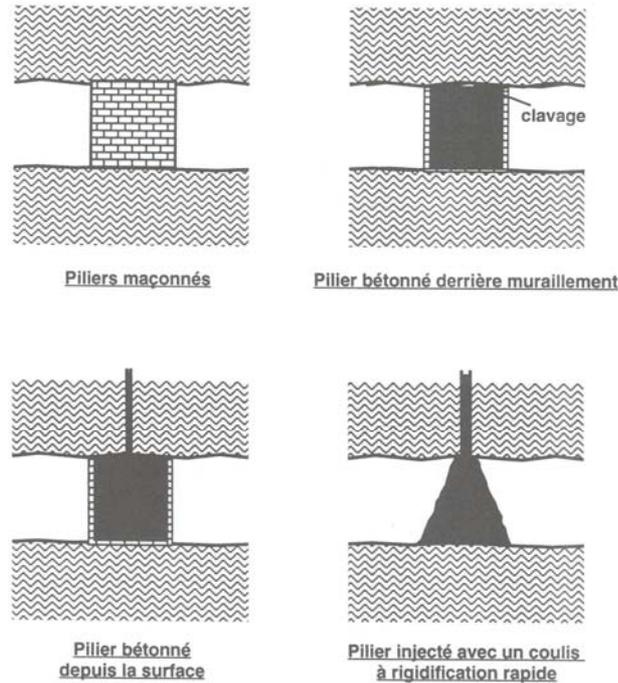


figure 35 : différentes techniques d'édification de piliers artificiels

6.7.2 TECHNIQUES ET MISES EN ŒUVRE

a) Piliers maçonnés

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-minée. Les piliers maçonnés, exécutés sous celle-ci, dans toute la hauteur de la carrière, doivent reposer sur le bon sol. Par ailleurs, un bon « clavage » (« matage » en ciel) au toit est nécessaire mais parfois assez difficile à obtenir.



Figure 36 : Consolidation par piliers maçonnés (carrière de la Brasserie, Vincennes)

L'Inspection Générale des Carrières de Paris (I.G.C.) fixe aux propriétaires du sol et du sous-sol, pour les carrières de calcaire grossier de la région parisienne, les prescriptions et les règles de l'art minimales exigées pour le projet de construction, telles que définies dans la notice spécifique aux piliers maçonnés (notice IGC du 15 juillet 2004 sur les travaux de consolidations souterraines exécutées par piliers maçonnés).

Elle impose des études de reconnaissance de sol préalables, le respect de règles de dimensionnement et de mise en place, et des caractéristiques minimales de résistance concernant les matériaux : pierres naturelles, parpaings pleins, béton, joints.



Figure 37 : Exemple de petits piliers en parpaings pleins trop élancés

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

b) Piliers bétonnés coffrés

La technique consiste à couler du béton d'une composition bien adaptée à l'intérieur d'un coffrage réalisé par un muraillement en maçonnerie traditionnelle ou par des panneaux en bois ou métalliques. Le coulage en couches successives est suivi d'une injection de clavage après un certain temps de séchage.

Les précautions de mise en œuvre sont les mêmes que celles décrites pour la technique du ceinturage bétonné (§ 6.6).

Dans certaines circonstances (faible hauteur de recouvrement), on peut avoir intérêt à injecter le béton depuis la surface pour obtenir un meilleur clavage au toit.

c) Piliers bétonnés depuis la surface

Depuis quelques années, des techniques d'injection de béton par forages depuis la surface sont apparues pour améliorer le rendement des opérations (bétonnage effectué à partir d'une centrale classique en surface). Elles permettent de parer aux éventuelles difficultés d'accès (passage des engins encombrants au fond) et d'assurer des conditions quasi parfaites de coulage et d'injection du béton (clavage du toit). Le coffrage doit néanmoins être mis en place depuis le fond par différents procédés :

- coffrage en chaussette en géotextile désigné souvent « coffrage synthétique » ;
- coffrage traditionnel en bois ou métallique, généralement circulaire pour des sections de piliers comprises entre 1,0 m et 2,5 m.

d) Piliers injectés depuis la surface sans coffrage

Cette technique permet de réaliser des piliers artificiels en carrières inaccessibles par injection de béton depuis la surface sans aucun coffrage. Elle consiste, à partir de forages de 100 à 160 mm de diamètre, pratiqués jusque sous le sol de la carrière, d'injecter gravitairement un coulis cimenté comprenant un adjuvant silicaté judicieusement dosé. Le but est d'assurer une prise idéalement rapide du mélange pour obtenir, après chute, des angles de cône aussi raides que possible (de 45° jusqu'à 70°, voire davantage).

Le diamètre du pilier final doit atteindre, au moins, 1,0 à 1,5 m au niveau du contact du toit.

Cette technique prometteuse mais encore peu courante, permet ainsi d'éviter de combler en totalité certaines zones inaccessibles à condition d'assurer un bénéfice économique et la pérennité de la consolidation.

6.7.3 PERFORMANCES

Ce mode de traitement est classiquement employé pour le traitement des instabilités localisées. Il permet d'ériger aux emplacements critiques des piliers de renfort dont on peut assez facilement maîtriser les caractéristiques de résistance et de déformabilité, les dimensions et donc la portance afin de les adapter au mieux aux contraintes imposées.

6.7.4 DOMAINES D'UTILISATION

La méthode de consolidation par piliers artificiels (surtout piliers maçonnés) est appliquée à pratiquement tous les types de carrières souterraines de dimensions raisonnables.

Elle est adaptée à tous les types d'exploitation (même à niveaux superposés) tant que l'ouverture (hauteur des piliers) n'est pas trop importante (en général 4 à 5 m), que les épontes sont suffisamment résistantes, en particulier que le ciel de carrière présente des caractéristiques mécaniques suffisantes et que les cavités sont peu dégradées.

Comme tout mode de soutènement, elle est utilisée surtout dans les carrières de calcaire, dans les conditions suivantes :

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

Cette technique de consolidation est adaptée à un grand nombre des cas, y compris pour la réalisation de constructions en surface (calcaire grossier du Bassin de Paris).

Elle présente, cependant, des limites de faisabilité dans les conditions suivantes :

- en milieu « agressif » (carrières de gypse, en particulier) ;

- en carrière de grande ouverture : l'élanement (rapport hauteur/largeur) trop important peut faire apparaître des phénomènes de rupture par flambement ;
- en présence d'un mauvais « sol » (mur) : le pilier risque de « poinçonner ».

6.7.5 PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS

L'édification de piliers artificiels est certainement la méthode la plus simple pour le renforcement des ouvrages souterrains. Elle permet de diminuer localement le taux de vide à des valeurs raisonnables et d'améliorer la sécurité. En contrepartie, son efficacité suppose la réalisation d'un certain nombre de piliers dont le coût final en fixe assez rapidement les limites.

Ce mode de consolidation est généralement préféré au ceinturage des piliers existants en considérant les aspects suivants :

- purement pratique : l'édification d'un pilier artificiel est souvent plus facile à réaliser que la restauration d'un pilier dégradé ;
- géométrique : la consolidation de l'ouvrage peut permettre un positionnement précis des points de portance ;
- économique : la restauration de piliers existants de grandes dimensions est rapidement réhabilitaire.

Les inconvénients majeurs de la technique résident essentiellement dans l'efficacité du contact entre le pilier et les épontes (ciel et mur). Elle n'est pas adaptée aux toits trop dégradés : inefficacité de l'action de portance du pilier et risque de fontis entre les piliers.

Des inconvénients spécifiques incombent à certaines techniques :

- difficultés de clavage et manque d'homogénéité (risque de rupture en tas de briques) dans le cas de piliers maçonnés soumis à une trop forte charge ;
- raideur parfois excessive pour le pilier bétonné (contraste des modules de déformabilité entre piliers et épontes).

En outre, cette technique nécessite également la réalisation de puits d'accès et impose le respect de conditions de sécurité renforcées pour le personnel.

6.7.6 ASPECTS ECONOMIQUES

Les coûts d'édification des piliers maçonnés dépendent beaucoup des techniques employées et des conditions opératoires liées au site. On peut donc difficilement estimer le coût d'un pilier maçonné traditionnel et « admettre », d'après les entreprises contactées, un coût moyen, purement indicatif, de l'ordre de 400/500 € le mètre cube, avec des fluctuations importantes du simple au double.

Pour un pilier en béton coulé derrière un coffrage métallique récupérable ou derrière un muraillement de parpaings, des exemples concrets de réalisation de piliers bétonnés en carrière de calcaire facilement accessible fournissent des coûts moyens de l'ordre de 300 € le mètre cube, (pour un pilier de l'ordre de 3 m x 3 m x 4 m), soit, dans ce cas, 10 000 € le pilier.

Les techniques moins classiques de coulage de béton depuis la surface sont encore plus difficilement chiffrables.

7. LES DIFFERENTES METHODES DE COMPLEMENT DES VIDES

7.1 GENERALITES

7.1.1 PRINCIPES ET OBJECTIFS

Les méthodes de traitement par remplissage des vides (ou comblement) représentent des solutions de traitement définitives (pérennes à long terme) des cavités souterraines instables.

Elles reposent sur des **principes** qui varient entre deux pôles :

- *le remplissage* : réduction du plus grand volume possible de vide par un simple comblement ;
- *la consolidation* : remplissage total des vides avec restitution de la compacité « initiale » du terrain ou tout du moins d'une certaine compacité (par injections de mortiers et de coulis).

Les **objectifs recherchés** varient donc également entre deux pôles :

- limitation des mouvements de terrain en surface (affaissement, tassement) à des amplitudes « admissibles » dans les zones non urbanisées ;
- interdiction de tout mouvement perceptible en surface dans le cas de zones destinées à la construction.

Dans le cas de carrières souterraines abandonnées, les domaines d'utilisation des méthodes de comblement sont liées aux conditions suivantes :

- nécessité d'éliminer définitivement (efficacité et pérennité) tout risque susceptible de provoquer des dommages sur l'environnement (surtout humains), en particulier en cas de péril imminent, de réhabilitation des terrains dans le cadre d'un projet d'aménagement urbain ou de création d'espaces de loisirs ;
- rejet d'une solution par confortement des ouvrages souterrains que ce soit pour des raisons culturelles, pratiques (accessibilité), sécuritaires ou économiques ;
- refus d'abandonner le site en l'état, avec les mesures d'accompagnement que cela implique ;
- possibilité d'un financement des opérations de traitement.

7.1.2 LES METHODES CLASSIQUES

Différentes méthodes de comblement peuvent être envisagées pour assurer le remplissage des cavités. Hormis l'utilisation récente et encore très limitée des mousses thermodurcissables, les méthodes de comblement les plus classiques sont les suivantes :

- le **remblaiement partiel**, par la méthode la plus simple ;
- le **remblaiement direct** à partir du fond, par engins mécanisés ;
- le **remblaiement gravitaire** par simple déversement depuis la surface ;
- le **remblaiement par injections** de mortiers ou de coulis (sous pression).

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

- les conditions d'accessibilité au fond et de sécurité du personnel opérateur ;
- les caractéristiques géométriques des cavités souterraines et l'estimation du volume des vides (difficile dans le cas de terrains déconsolidés ou effondrés) ;

- les conditions opératoires (profondeur, topographie, environnement urbain ou boisé, etc.) ;
- les matériaux disponibles, les moyens de transports adaptés, les possibilités de stockage, les à-coups de production ou d'approvisionnement ;
- la destination de la surface, les projets d'urbanisme, la valorisation du sol ;
- les aspects financiers ;
- la densité de population, le mode d'urbanisation ;
- les aspects sociologiques, économiques ou administratifs ;
- l'impact sur l'environnement.

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

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

En effet, en l'absence d'une méthode universelle, la tentation simplificatrice de choisir une seule et même méthode, doit toujours être évitée avant d'avoir parfaitement analysé l'implication de l'aspect technique ou économique sur le niveau admissible de mise en sécurité des personnes ou des biens.

Les injections, par exemple, qui assure le meilleur comblement (avec clavage), sont de plus en plus largement utilisées, mais leur coût reste, malgré les progrès de la technique, toujours très élevé et, le plus souvent, difficile à maîtriser. Ces techniques requièrent, en outre, des travaux de reconnaissance préliminaire poussés et soignés, réalisés à partir de forages lorsque les vides souterrains sont inaccessibles, à maillage serré, mettant en œuvre les moyens d'investigation les plus avancés comme les diagraphies en forage, la caméra ou l'endoscopie des vides, les tests géophysiques, etc. On conçoit donc parfaitement l'adaptation de ce traitement lorsqu'il s'agit de réaliser un vaste projet d'urbanisation, mais beaucoup moins lorsqu'il s'agit de traiter des terrains en zones naturelles.

7.1.3 FAISABILITE TECHNIQUE

Indépendamment des études géotechniques préliminaires examinées au § 4, une analyse de faisabilité technique est nécessaire pour estimer l'ampleur des travaux et définir la nature des traitements les plus appropriés au contexte. Cette analyse est réalisée à partir de travaux de reconnaissance complémentaires qui concernent plus particulièrement :

- la reconnaissance des limites des ouvrages souterrains ;
- la vérification de leur état de conservation ;
- l'estimation du volume des vides ;
- les effets de la décompression des terrains en présence de cavités effondrées ou de fontis.

D'emblée, deux configurations vont conditionner l'analyse :

- les ouvrages souterrains accessibles (c'est-à-dire visitables sans danger) ;
- les ouvrages souterrains non accessibles.

a) Cas des ouvrages accessibles

La première démarche consiste à examiner les documents existants, et en particulier les cartes, en vérifiant leur validité (mise à jour, limites, corrélations géométriques et topographiques entre le fond et la surface, etc.).

La seconde étape porte sur la réalisation de relevés nécessaires à la définition des modes opératoires : prises de cotes sur plans, hauteur des vides, qualification et quantification des remblais, dégradations non cartographiées (chutes de blocs, montées de voûtes, fontis, effondrements localisés...), présence d'eau et sa circulation, qualité de l'atmosphère (aéragé), etc.

b) Cas des ouvrages inaccessibles

A la suite d'éventuelles investigations géophysiques, la reconnaissance des vides proprement dite repose sur un programme de recherche par foration destructive accompagné de diagraphies (enregistrement des paramètres).



Figure 38 : Reconnaissance des vides par forage avec diagraphies

La règle (empirique) utilisée est celle d'un forage de reconnaissance tous les 900 m² (maillage 30 m x 30 m) dans le cas général, ou d'un forage tous les 100 m pour les ouvrages linéaires, et d'un forage pour 200 à 400 m² (maillage 15 m x 15 m ou 20 m x 20 m) aux emplacements d'ouvrages lourds, avec un minimum, dans tous les cas, de 3 forages (Desforges, 1988).

Chaque fois que cela est possible, la maille de foration est adaptée aux caractéristiques de la cavité : galeries, chambres, piliers, carrefours (croisières). Si la géométrie exacte des ouvrages est ou peut être connue (caméra en forage), l'implantation des forages est opérée au droit des carrefours. Si on ne peut adapter la maille de foration à la géométrie des carrefours (limites mal connues, zones d'incertitude...), il faut adopter une dimension de maillage qui est fonction de la destination du terrain, en augmentant de toute façon le nombre des forages.

En présence de terrains décomprimés et lorsque le remplissage est envisagé par injections de coulis, les forages sont systématiquement enregistrés avec 3 ou 4 paramètres de foration :

- vitesse d'avancement de l'outil ;
- pression sur l'outil ;
- pression de l'eau ;
- couple exercé sur la tige.

Ces indications permettent d'estimer les caractéristiques des terrains de couverture, les décompressions éventuelles et d'appréhender la nature et les quantités de coulis qu'il convient d'injecter.

Dans la plupart des cas, les forages de reconnaissance sont exécutés dans le même diamètre que celui des forages d'injection pour pouvoir être réutilisés et équipés en tubes d'injection.

La réhabilitation du sol, nécessaire à la réalisation de constructions ou d'ouvrages lourds en surface, exige des reconnaissances complémentaires du comportement des terrains au moyen d'essais pressiométriques ou au pénétromètre dynamique.

7.1.4 ESTIMATION DU VOLUME DES VIDES

Dans le cas de cavités présentant des vides francs, la détermination du volume de remplissage ne présente pas de difficultés particulières en dehors de l'évaluation des pertes en matériau dues aux fuites latérales (problème de barrages ou karsts, par exemple), et de l'essorage pour un remblai hydraulique ou un coulis. On adopte alors des coefficients compensateurs pour tenir compte, au mieux, de ces pertes dans le calcul.

Dans les cavités plus difficilement identifiables, plus dégradées ou plus complexes, présentant des remblais de pied ou des zones effondrées, le calcul des volumes devient beaucoup plus délicat. On doit estimer, en outre, les pertes liées aux vides persistant au sein des remblais ou des zones foisonnées (adopter également des coefficients correcteurs qui peuvent être affinés par des enregistrements paramétriques).

7.1.5 NATURE DES REMBLAIS

Parmi les paramètres technico-économiques à prendre en compte dans une opération de comblement, les produits de remblayage représentent un facteur primordial sur plusieurs aspects : volume nécessaire pour le comblement, disponibilité des produits et choix des remblais.

a) Caractéristiques et spécificités

En particulier, c'est la nature du ou des matériau(x) retenu(s) qui va conditionner la qualité du traitement, son coût et la réussite finale du chantier en répondant aux exigences suivantes :

- **qualité de déversement et de compacité du produit.** Ces propriétés déterminent la réussite de la mise en place du remblai et du remplissage recherché des cavités (importance du vide résiduel). Les produits de remblai ou matériaux dit « tout-venants », bruts ou criblés, conviennent pour les opérations classiques de comblement, à sec ou hydraulique, dans la mesure où ils contiennent peu de minéraux argileux et ne comportent pas de blocs trop gros. Les mortiers ou coulis sont des mélanges variables réalisés à base de ciment et d'eau avec une charge constituée de produits granulaires du type sablon (avec adjonction éventuelle de silicates, de bentonite, etc.). Il sont en général suffisamment liquides au moment de l'injection pour s'infiltrer dans les vides résiduels tout en assurant une bonne cohésion du milieu ;
- **caractéristiques mécaniques du remblai.** Pour le comblement par injections, la finalité est d'assurer, autant que possible, une valeur de pression limite de l'ordre de 0,6 MPa, correspondant à la valeur mesurée au pressiomètre (notice injections IGC) dans les remblais de carrière injectés. Dans le cas du comblement gravitaire, on cherche à assurer, au minimum, un confinement satisfaisant des piliers ou un remplissage des vides aussi complet que possible. Ces propriétés mécaniques ne doivent pas être altérées par la présence d'eau.
- **impacts sur l'environnement.** Les matériaux utilisés ne doivent pas présenter de risque de pollution, en particulier vis-à-vis de l'eau. Même si les carrières souterraines ont le plus souvent été exploitées au dessus du niveau de la nappe superficielle, la configuration géologique des terrains environnants peut favoriser la percolation d'eau

depuis la surface et la migration potentielle de polluants. Ce dernier paramètre est aujourd'hui examiné de manière systématique et l'appréciation technique interfère avec les réglementations, nationale et européenne, actuelle et à venir, sur les déchets et les décharges.



Figure 39 : Exploitation de remblais miniers de type cendres volantes

b) Nature des produits de remblai

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

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

Pour le remplissage des cavités sans injections, on utilise classiquement les matériaux dit « tout-venant », comme les sables, les graves, les granulats calcaires, les terres de fouilles, les matériaux issus de démolition, etc. En présence ou à proximité d'une nappe superficielle, le maître d'ouvrage peut imposer une charge inerte constituée de sables naturels, de stériles miniers ou éventuellement de matériaux recyclés.

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

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

c) Contrôle des produits

Les travaux de remblayage, sous la responsabilité du maître d'ouvrage représenté par le maître d'œuvre, doivent correspondre aux spécificités du cahier des charges qui peut imposer des documents de traçabilité (lieu de provenance, nom du fournisseur, quantités

approvisionnées, analyses chimiques éventuelle, types de contrôle, etc.). L'eau injectée peut également faire l'objet de spécifications quant à sa provenance et sa qualité.

Pour les opérations de remblayage de cavités en exploitation (devenues Installations Classées - ICPE - depuis 1994), la Direction Régionale de l'Industrie, de la Recherche et de l'Environnement (DRIRE) exerce un contrôle au titre de la police des mines. La réalisation des travaux suppose le respect de procédures définies dans le cadre d'un arrêté d'autorisation établissant la nature des remblais après la fourniture d'une étude d'impact.

Dans le cas du remblayage de carrières souterraines abandonnées, hormis les régions où il existe un service d'inspection des carrières spécialisé (région parisienne, Nord, Gironde, etc.), le contrôle du chantier par l'administration ne s'exerce que dans le cadre de la protection de l'hygiène et de la sécurité des travailleurs, soit directement par l'inspection du travail, soit éventuellement par un service technique décentralisé (DDE ou DRIRE), lorsque le site récepteur appartient au domaine public. Le contrôle de la nature des produits de remblayage n'est en fait pas directement soumis à une autorité administrative, sauf si les matériaux sont clairement répertoriés comme déchets issus d'une ICPE. Le site traité devient alors lui-même une installation classée.

d) Perspectives

L'importance des zones urbanisées sous-minées, les difficultés sans cesse croissantes d'approvisionnement en matériaux de remblai et la présence encombrante de déchets industriels d'origines diverses posent le problème de la redéfinition des possibilités d'utilisation de certains produits considérés comme inaptes eu égard aux contraintes environnementales et aux exigences réglementaires qui devraient se poser à court terme.

Différentes directives européennes et règlements nationaux définissent les principes généraux applicables aux filières de traitement et d'élimination en matière de gestion de déchets et de décharges (comme la directive européenne de 1999 D 99/31/CEE du 26 avril 1999, concernant la mise en décharge des déchets).

L'esprit de ces textes insiste sur la nécessité d'encourager le recyclage et la réutilisation de certains déchets dans le cadre d'opérations d'aménagement ou de réhabilitation permettant de ménager ou d'éviter l'exploitation supplémentaire de ressources naturelles.

La mise en œuvre, pour le remblayage de cavités souterraines, de produits issus de processus industriels, soit directement comme matériau brut de remblayage gravitaire, soit sous la forme de charge additionnelle pour les coulis, peut alors constituer, sous certaines conditions, une voie de réutilisation intéressante.

7.2 LE REMBLAIEMENT PAR VOIE PNEUMATIQUE (POUR MEMOIRE)

Cette méthode a été développée dans les mines européennes dans les années 30. Largement pratiquée dans les anciennes carrières souterraines abandonnées du Nord de la France, cette technique n'est plus guère utilisée depuis les années 1970, essentiellement pour des raisons de salubrité concernant le personnel.

7.2.1 ROLE ET PRINCIPE

Le remblaiement pneumatique a pour objectif de réduire au maximum le volume des vides souterrains. Ce mode de traitement, complété par des injections de clavage, peut aboutir à une mise en sécurité maximale du site (remblaiement total).

Le principe repose sur l'utilisation d'un flux d'air continu sous pression pour transporter au travers de tuyaux les particules solides du matériau de remblai.

7.2.2 NATURE DES PRODUITS

Le succès de la méthode pneumatique dépend essentiellement du matériau de remblayage utilisé. Les matériaux argileux sont à éviter car ils bouchent les canalisations. Le sable seul, trop abrasif et lourd, induit une usure excessive des tuyaux.

On utilise généralement comme matériau de remblais des cendres volantes, des graviers, schistes de terril ou du calcaire broyé. Dans certains cas, on peut y ajouter du ciment et/ou de la bentonite.

La préparation de ces matériaux comporte obligatoirement un criblage.

7.2.3 MISE EN ŒUVRE

Cette technique de remblaiement est généralement mise en place à partir du fond, mais peut être également opérée à partir de la surface (mise en œuvre désormais abandonnée).

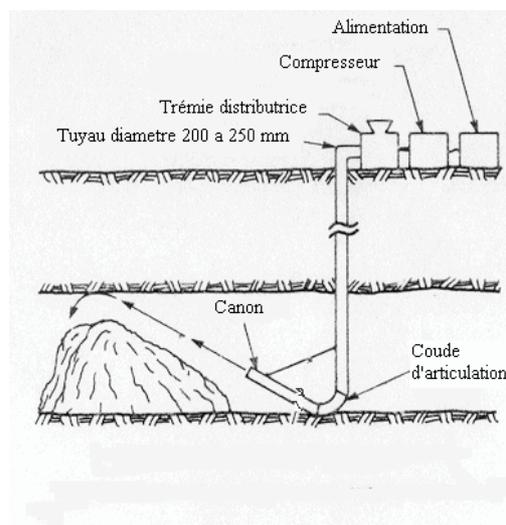


Figure 40 : Principe d'une mise en place de remblais par voie pneumatique

Les matériaux sont amenés par convoyeur jusqu'à une remblayeuse pneumatique. Les remblayeuses peuvent assurer des débits de 10 à 100 m³/h, suivant les modèles.

7.2.4 PERFORMANCES

Le remblayage pneumatique permet d'obtenir une bonne compaction des remblais et un meilleur remplissage des vides que par un simple déversement gravitaire (par voie sèche). Il fournit néanmoins de moins bons résultats que le remblayage hydraulique.

7.2.5 DOMAINES D'UTILISATION

La technique de remblayage pneumatique permet de traiter des vides souterrains dégradés, accessibles ou non, et d'opérer sur des cavités de toutes dimensions. Elle est utilisable dans les zones où l'usage de l'eau n'est pas envisageable (phénomènes de dissolution) ou lorsqu'il n'est pas possible d'avoir de l'eau en quantité suffisante.

Elle s'applique bien aux sites dont la réhabilitation du sol ne concerne que la création d'**espaces verts ou de loisirs** et non pas le bâti existant ou prévu. On peut alors choisir des matériaux plus simples et moins coûteux, comme du matériau tout-venant non cimentés, en acceptant un certain vide résiduel (jusqu'à 0,50 m).

Pour les **voies publiques**, on peut opérer un traitement optimal par un remplissage quasi total (vide résiduel de l'ordre de 0,20 m), sans clavage, en utilisant les meilleurs produits de remblai.

Pour la protection du **bâti existant**, il faut envisager des injections de clavage complémentaires.

7.2.6 PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Le remblayage pneumatique est une méthode qui donne de bons résultats en taux de comblement. Cette technique ne nécessite pas d'eau lors de sa mise en œuvre et minimise les inconvénients dus à celle-ci.

L'usage de la méthode pneumatique est limité par l'usure importante des canalisations. Cette usure est d'autant plus accentuée que la vitesse des particules dans les canalisations est grande, vitesse indispensable pour maintenir les matériaux en suspension et éviter le bourrage des tubes de transport. La perte de charge correspondant aux efforts nécessaires pour vaincre les frottements de l'air comprimé et des matériaux de remblayage dans les tuyauteries est un autre problème limitant les distances de transport par voie pneumatique.

Il s'agit d'une technique de mise en place plutôt lente et donc assez onéreuse. Elle consomme, en outre, beaucoup d'énergie (pour pouvoir maintenir les particules en suspension).

Enfin, et surtout, Le remblayage pneumatique engendre des risques et nuisances, pour le personnel et l'environnement, liés essentiellement à la libération de poussières parfois nocives. Citons également le problème des vibrations des compresseurs, qui doivent être placés à l'écart ou dans une zone saine.

7.2.7 ASPECTS ECONOMIQUES

Nous ne disposons pas de coûts actualisés pour cette méthode, faute de chantiers récents.

7.3 LE REMBLAIEMENT PARTIEL

7.3.1 ROLE ET PRINCIPE

Les techniques dites de remblayage partiel^[*] consistent à opérer un remplissage progressif de la cavité avec des matériaux tout-venant, si possible compactés, jusqu'à une certaine hauteur prédéterminée. Un vide résiduel parfois important (jusqu'à la moitié de la hauteur) peut être éventuellement laissé à la partie supérieure de la cavité.

Le but recherché est d'assurer à moindre coût :

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

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

- un renforcement des piliers par effet de confinement grâce à l'effet de butée dû au remblai (« frettage ») et une diminution de leur élancement ;

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

- une diminution effective du volume des vides (figure 33) permettant une stabilisation des terrains à long terme par autocomblement des vides (éboulement progressif des bancs du toit) ;

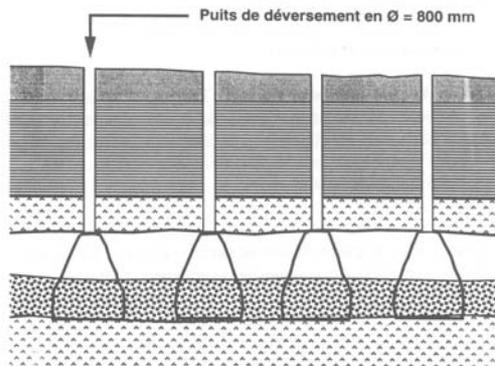


figure 41 : remblaiement partiel par déversement gravitaire par voie sèche depuis la surface (carrière de l'Est de Paris)

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

7.3.2 NATURE DES PRODUITS

Les produits utilisés pour le remblayage partiel sont des matériaux classiques de remblaiement, bon marché, bruts ou parfois simplement criblés, constitués de déblais tout-venant, déchets de carrières, terres de fouilles, stériles miniers ou plus nobles comme des sablons ou des graves.

Ces matériaux doivent être aussi inertes que possible et non polluants à terme. Les conditions mécaniques satisfaites, la qualité importe peu du moment que les matériaux ne soient pas trop argileux, ni ne comportent d'éléments de trop grande dimension pour permettre une bonne répartition des efforts latéraux (après compactage).

L'intérêt de la méthode est de pouvoir disposer de produits peu coûteux, voire même susceptibles d'offrir un bénéfice économique par stockage de déchets de décharge.

7.3.3 TECHNIQUES ET MISES EN ŒUVRE

Le remblayage partiel peut être mis en place de différentes façons en fonction des conditions d'accessibilité du site :

- soit directement à partir du fond à l'aide d'engins mécanisés ou par voie pneumatique (remblayage pneumatique) ;
- soit par remblayage depuis la surface, à partir de forages, en gros ou petit diamètre selon que la mise en place s'effectue gravitairement à sec ou par voie humide (remblayage hydraulique).



Figure 42 : Remblayage partiel avec mise en place par le fond

Les **matériaux du remblai** les plus utilisés sont d'abord les déchets de roche réutilisés sur place, les sables, sablons et graviers, parfois certains stériles et déchets industriels non polluants (matériaux de démolition).

Dans le cas d'**une mise en œuvre par le fond**, l'efficacité du frettage des piliers est nettement améliorée par un compactage adéquat des remblais, en particulier au contact des piliers pour obtenir un léger confinement de celui-ci. D'autre part, si la carrière est dangereuse (chutes de blocs), on peut avoir recours à un purgeage préliminaire mécanisé pour assurer la sécurité du personnel.

Dans le cas d'**une mise en place depuis la surface à partir de forages**, les modalités de mise en œuvre sont celles de tout type de comblement avec, toutefois :

- un volume moindre de matériaux de remblayage ;
- une maille de foration plus grande ;
- des conditions opératoires souvent moins sévères.

7.3.4 PERFORMANCES

Le frettage transmis par un remblai sur un pilier s'exerce par la poussée du remblai qui s'oppose à la dilatation volumique que ce pilier supporte lorsqu'il est soumis à un effort de compression. Il s'ensuit un état de confinement qui tend à augmenter progressivement la capacité portante du pilier même lorsque celui-ci est fracturé.

Des expérimentations sur éprouvettes au laboratoire simulant des conditions de carrières remblayées entièrement et partiellement (demi-hauteur) ont montré que la portance maximale pouvait augmenter de 5 à 10 % pour une étreinte latérale de 0,1 à 0,3 MPa appliquée sur toute la hauteur de l'éprouvette. Pour une étreinte appliquée sur la moitié de la hauteur de l'éprouvette, l'augmentation de la portance est réduite à peu près de moitié (Siwak, 1984). L'amélioration de la portance du pilier apparaîtrait encore plus nettement en phase post-rupture (Wojtkowiak & al., 1985).

Des expérimentations récentes menées sur la carrière souterraine de gypse exploitée par BPB Placoplâtre, à Livry-Gargan (94), ont montré que la mise en place du remblayage partiel permettait de reconfiner le parement du pilier de l'ordre de 80 kPa (Collet & al., 2004).

Il semble cependant que l'effet de frettage du remblai soit surtout intéressant pour ralentir l'évolution de la fracturation des piliers plutôt que pour augmenter leur portance. Le gain de portance semble en effet réel et non négligeable mais conditionné par la qualité de la

mise en place du remblai et de son compactage. En l'absence de compactage (remblayage par foration depuis la surface), les performances de la méthode sont donc plus limitées. Il apparaît fréquemment, après remblaiement, un espace entre le remblai et le pilier en raison du retrait de celui-ci (exemple de la carrière de Rosny-sous-Bois). D'autre part il faut proscrire l'emploi de matériaux subissant un retrait après sa mise en place.

7.3.5 DOMAINES D'UTILISATION

Solution considérée comme bâtarde, le remblayage partiel a le mérite de pouvoir être utilisé dans de nombreux cas et de façon économique si le but recherché n'est pas la conservation totale de la cavité souterraine. Cette technique doit toutefois être réservée aux terrains qui n'ont vocation à être urbanisés ou à recevoir un public important.

Le mode opératoire le plus efficace par mise en place mécanisée du remblai à partir du fond suppose bien évidemment des conditions d'accessibilité et de sécurité satisfaisantes. Une phase préparatoire peut être nécessaire (remise à section, purgeage des zones dégradées, etc.). Le compactage peut alors s'opérer sans difficulté. A contrario, la solution de réduction du vide par simple remplissage (gravitaire à sec ou par voie hydraulique...) est réservée prioritairement aux cavités souterraines pas ou peu accessibles ou trop dégradées et dangereuses pour la sécurité du personnel.

Par ailleurs, il faut considérer ce traitement rudimentaire comme insuffisant dans le cas de sites souterrains instables à risque d'effondrement généralisé. Il peut également être inopérant vis-à-vis du risque de fontis si le recouvrement n'est pas favorable au processus d'autocomblement (épaisseur trop faible, insuffisance du foisonnement). Il est rapporté, ainsi, un cas d'effondrement d'une carrière, près de Valenciennes, partiellement comblée (remblayage à mi-hauteur laissant un vide supposé de 1 m à 1,50 m) et située sous un recouvrement de 15 à 17 m, qui aurait provoqué un affaissement de surface de 0,3 m à 0,4 m.

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

C'est, en fait, le contexte socio-économique du site qui conditionne en grande partie le choix de ce mode de traitement imparfait mais relativement peu onéreux.

7.3.6 PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS

L'avantage principal de cette méthode réside essentiellement dans sa simplicité de mise en œuvre et son coût, dans la mesure où l'objectif est simplement de réduire le volume des vides pour minimiser les dommages en cas de rupture.

Son efficacité jugée souvent douteuse peut être améliorée par un compactage des remblais mais au détriment de l'aspect économique.

L'efficacité réelle du traitement ne semble pas toujours celle attendue dans le temps lorsqu'il s'agit de garantir la stabilité de piliers pour prévenir tout mouvement de surface. Par contre elle est particulièrement réelle dans le traitement des fontis, en sachant que le bon foisonnement du toit est le principal facteur de réussite.

Ce traitement peut aussi être considéré comme une solution provisoire dans l'attente d'un traitement définitif (par comblement total).

7.3.7 ASPECTS ECONOMIQUES

L'avantage économique de la méthode réside dans la diminution des volumes à combler. Le coût des remblais, en eux-mêmes, dépendent essentiellement des facteurs suivants :

- nature et provenance des matériaux de remplissage (recette possible dans certains cas) ;
- préparation des matériaux (tri, criblage, nettoyage) ;
- traitement préparatoire du site (purgeage, confortement, entretien des accès et de la ventilation) ;
- importance des volumes à traiter ;
- rendement des chantiers mécanisés (cadence) ;
- stratégie et planification des opérations d'approvisionnement, de transport et de remplissage.

Pour des chantiers de plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes à combler, on estime de façon très globale que le coût de mise en place, avec une recette pour la réception des déblais, serait de l'ordre de 15 et 30 €/m³. Ce chiffre, purement indicatif, doit être compris comme ne servant qu'à fixer les idées.

7.4 REMBLAIEMENT DIRECT A PARTIR DU FOND PAR ENGIN MECANISES

Il s'agit d'un mode de remblaiement classique par mise en place, à sec, de remblais tout-venant, d'origines diverses, acheminés et déversés par des engins mécaniques camions, chargeurs et bulldozers.

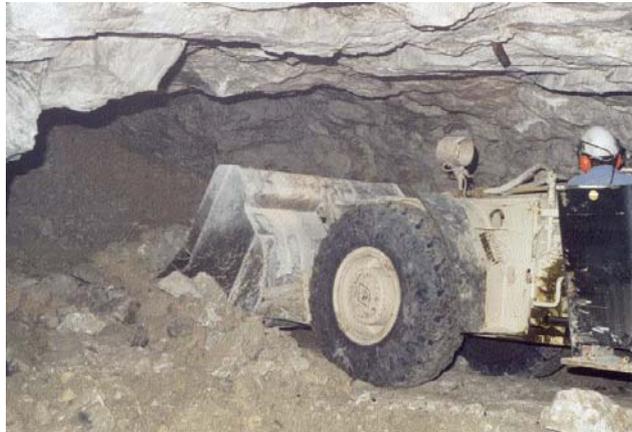


Figure 43 : Remblayage direct par le fond avec des engins mécaniques

7.4.1 ROLE ET PRINCIPE

L'objectif de la méthode est de réduire le plus possible le volume des vides souterrains en remplissant les vides originels de matériaux divers non traités, sans adjonction de liant hydraulique. Le vide résiduel doit être aussi réduit que possible.

Le principe repose sur un déroulement d'opérations mécanisées simples, à tous les stades : approvisionnement, manutention, déchargement, compactage, avec un traitement minimal des produits de remblaiement.

7.4.2 NATURE DES PRODUITS

Les produits utilisés dans ce mode de remblaiement sont essentiellement des matériaux bon marché, bruts ou parfois simplement criblés, constitués de déblais tout-venant,

déchets de carrières, terres de fouilles, stériles miniers ou plus nobles comme des sablons ou des graves.

Ces matériaux doivent être aussi inertes que possible et ne pas présenter de risque de pollution à terme. Ces conditions satisfaites, la qualité importe peu du moment que les matériaux ne soient pas trop argileux, ni ne comportent d'éléments de trop grande dimension pour qu'après la phase de tassement différé (inévitable), le vide résiduel restant demeure acceptable.

L'intérêt de la méthode est de pouvoir disposer de produits peu coûteux, voire même susceptibles d'offrir un bénéfice économique par stockage de déchets de décharge.

7.4.3 ASPECTS TECHNIQUES ET MISE EN ŒUVRE

Eu égard aux contraintes de rendement (mécanisation intensive) et de sécurité du personnel, cette méthode de remblaiement n'est envisageable que si les avantages économiques demeurent favorables en considérant des conditions de site suivantes :

- **état des ouvrages** : la carrière doit être aussi peu dégradée que possible pour ne pas engendrer de risques pour la sécurité du personnel ou entraîner des surcoûts de protection trop importants. Il est, en effet, souvent nécessaire d'effectuer une phase préparatoire de mise en sécurité minimale du site par purgeage des blocs instables, abattage de parements dangereux, ou boulonnage localisé de zones dégradées du toit ou de piliers ;
- **aspects dimensionnels et accessibilité** : les galeries d'accès et les chambres doivent être suffisamment grandes (hauteur et largeur) pour permettre le passage des différents engins. Dans certains cas, on peut envisager la possibilité d'utilisation d'engins typiquement miniers, plus réduits en dimensions, mais aussi plus maniables, à performances égales ;
- **aspect ventilation** : les opérations mécanisées nécessitent pour le personnel des conditions d'hygiène et de salubrité de l'atmosphère qui soient garanties par une ventilation suffisante des chantiers. Cela peut se traduire par des adaptations spécifiques des engins ou par l'aménagement d'un réseau de ventilation adapté (entrées d'air, puits d'aéragé, ventilateurs et gaines d'aéragé, etc.).

La **mise en œuvre** proprement dite du comblement est relativement simple au demeurant :

- acheminement des produits au fond par passage direct des camions par les galeries d'accès ou par déversement depuis la surface à partir d'un puits artificiel ou naturel (fontis aménagé à cet effet) ;
- reprise depuis un point de déversement par des bulldozers ou des chargeurs type mine et déchargement au fond des galeries de remblayage puis bourrage final. Ces opérations se déroulent le plus souvent en phases successives de dépôt en alternance avec des phases de compactage.

La stratégie consiste alors à mener les fronts de remblaiement parallèlement en rabattant sur les entrées.

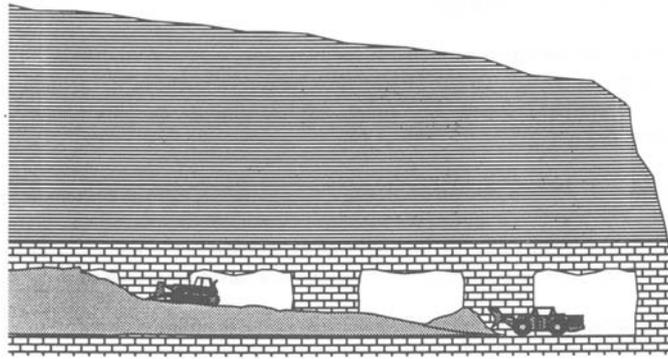


figure 44 : Comblement mécanisé depuis le fond

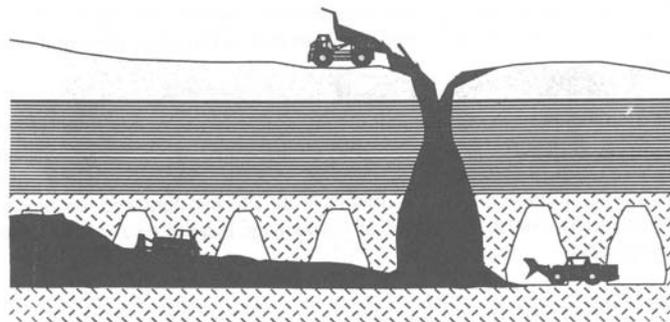


figure 45 : Comblement mécanisé par le fond avec déversement et soutirage

Traitement optionnel

Si les prescriptions définies préalablement en matière de stabilisation des terrains ne semblent pas être garanties par les caractéristiques de compacité du remblayage, il faut recourir à un **traitement final par clavage**.

Ce traitement est assuré de façon conventionnelle par des injections (sous faible pression) de coulis réalisées à partir de la surface par des forages en petit diamètre (en général 89 mm) ou à partir de tubes d'injection placés au préalable en voûte. Le maillage est adapté classiquement à la géométrie des ouvrages du fond (au centre des carrefours des galeries) facilement identifiable dans ces conditions de site.

7.4.4 PERFORMANCES

La qualité finale du remblaiement (vide résiduel à long terme) dépend essentiellement des caractéristiques de compacité du matériau constituant le remblai et du soin apporté aux opérations de remblayage et de compactage.

On préconise habituellement un vide résiduel d'une hauteur maximale de 0,50 m, ou par tolérance, le respect de la règle du 1/15ème (rapport de la hauteur du vide résiduel par la hauteur du recouvrement) [1].

[1] Il nous paraît plus judicieux dans ce cas de considérer les caractéristiques de foisonnement des terrains du recouvrement pour assurer un bon auto-colmatage du vide résiduel.

Les exemples récents de remblaiement direct par le fond montrent que cette technique permet un remplissage pratiquement complet de la carrière qui ne laisse subsister qu'un vide de l'ordre de 20 à 30 cm au toit, vide qui peut augmenter quelque peu après le tassement des remblais dans le temps (Camelan, 1994).

7.4.5 DOMAINES D'UTILISATION

La méthode de remblaiement direct par le fond est une technique de remplissage plutôt douce (non destructive, mise en place sans pression et sans eau, non agressive, utilisant des matériaux contrôlés et non polluants). Elle est parfaitement adaptée à tous les types de massif rocheux (calcaire, craie, gypse, etc.), mais pas à toutes les configurations de site.

Cette technique est, en effet, exclusivement limitée aux carrières dont les conditions d'accès, de roulage et de stabilité des ouvrages sont suffisamment bonnes à l'origine (ou rendues telles par un traitement préliminaire).

Moins onéreuse, dans la plupart des cas, elle s'applique, préférentiellement à tout autre mode de remblayage, aux carrières instables placées dans les configurations suivantes :

- ouvrages de grandes dimensions, au taux de défrètement élevé ;
- ouvrages situés à grande profondeur (la méthode est indépendante de ce facteur) ;
- destination du site en surface ne justifiant pas la restitution de la compacité du sous-sol (mise en sécurité des personnes plutôt que du bâti), tout en se réservant la possibilité de compléter le comblement par des injections de clavage ;
- environnement justifiant des travaux à moindre risque de nuisances (zones urbanisées).

7.4.6 PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Il s'agit d'une méthode entièrement mécanisée permettant des rendements élevés. Dépendante des conditions d'accessibilité du site mais aussi bénéficiaire de parfaites possibilités de reconnaissance des ouvrages souterrains, cette technique est particulièrement souple dans sa mise en œuvre (stratégie) et dans son adaptabilité aux besoins (sécurité, aspects économiques, environnement, etc.). Elle offre des possibilités de traitements complémentaires (injections de clavage, renforcement passif des structures, fondations profondes, etc.) si la destination du site venait à changer.

Dans des conditions normales d'application, il s'agit, en outre, d'une technique de remblaiement parmi les plus avantageuses sur le plan économique. L'estimation de son coût est également plus facile et plus fiable. Elle est le plus souvent indépendante des facteurs de site tels que la profondeur, la présence de nappes aquifères, la nature des terrains, l'environnement, etc.

La gamme très étendue des matériaux utilisables et l'absence de traitement préalable ou d'adjonction d'autres produits sont des points économiquement avantageux offrant souvent l'occasion de faire des recettes casuelles pour la réception et le stockage des déblais.

En contrepartie, la configuration des cavités souterraines (accessibilité, géométrie, dégradations) limite considérablement le champ d'application de cette technique, contrairement aux autres modes de comblement opérables sur pratiquement tous les sites.

Enfin, il faut souligner le caractère souvent dangereux et pénible du travail réalisé au fond (risques de chutes de blocs, éboulement, atmosphère nocive ou insalubre...) qui nécessite un personnel compétent et qualifié. Ces risques expliquent parfois les réticences des compagnies d'assurance pour couvrir ce type de traitement.

7.4.7 CONTROLE DE L'EFFICACITE DU TRAITEMENT

Le contrôle du remblaiement s'opère essentiellement à partir du fond au fur et à mesure de la progression du chantier. Le contrôle visuel doit être effectué périodiquement et porter principalement sur la qualité du bourrage des fonds et du clavage des remblais le plus près du toit (ciel).

Un contrôle complémentaire peut être pratiqué par un bureau spécialisé à la fin des opérations, après tassement des remblais pour s'assurer que le vide résiduel est conforme au chier des charges. Ce contrôle exige la réalisation de forages avec enregistrement des paramètres, voire diagraphies et un suivi assuré par un bureau de contrôle spécialisé.

7.4.8 ASPECTS ECONOMIQUES

Cette méthode a été utilisée avec succès sur plusieurs gros chantiers de la région parisienne, dans le calcaire grossier, la craie et le gypse. Les coûts dépendent essentiellement des facteurs suivants :

- nature et provenance des matériaux de remplissage (recette possible dans certains cas) ;
- préparation des matériaux (tri, criblage, nettoyage) ;
- traitement préparatoire du site (purgeage, confortement, entretien des accès et de la ventilation) ;
- importance des volumes à traiter ;
- rendement des chantiers mécanisés (cadence) ;
- stratégie et planification des opérations d'approvisionnement, de transport et de remplissage.

Pour des chantiers de plusieurs dizaines de milliers de mètres cubes à combler, le coût minimal de mise en place avec une recette pour la réception des déblais est estimé autour de 20/30 €/m³. Ce chiffre, purement indicatif, doit être compris comme ne servant qu'à fixer les idées. Dans des conditions très favorables, il est parfois possible de faire descendre ce coût dans la mesure où l'augmentation du rendement ne s'effectue pas au détriment de la sécurité. Ce chiffre paraît néanmoins très difficile à atteindre.

D'après les données de l'I.G.C - Ile de France (Desforges, 1988), il faut compter, dans les cas les plus courants, sur des coûts (tout compris) variant le plus souvent entre 30 et 45 €/m³, jusqu'à 50 voire 80 €/m³ pour des travaux plus complexes (carrières d'Issy-les-Moulineaux, Clamart, entre 1965 et 1969).

Pour des opérations combinées de remblaiement direct avec injections de clavage (dans la proportion 80 % - 20 %), le coût moyen sur des chantiers importants situés à faible profondeur (10 - 30 m) atteint 35 à 60 €/m³, clavage compris, (ligne SNCF Paris - Versailles, Issy-les-Moulineaux), le coût des injections de clavage qui y ont été pratiquées étant nettement supérieur à celui du comblement direct.

7.5 REMBLAIEMENT PAR DEVERSEMENT GRAVITAIRE DEPUIS LA SURFACE

Lorsque les ouvrages souterrains ne permettent pas la circulation des engins ou que leur état peut conduire à une mise en danger du personnel, le remblaiement par déversement gravitaire est la première solution qu'il faut envisager en remplacement du comblement direct mécanisé à partir du fond.

Diverses méthodes de remblaiement gravitaire, mises en œuvre depuis la surface, permettent grâce à leur diversité de trouver, dans la plupart des cas, une solution adaptée

aux prescriptions de comblement. On peut avoir recours, si nécessaire, à des injections de clavage complémentaires.

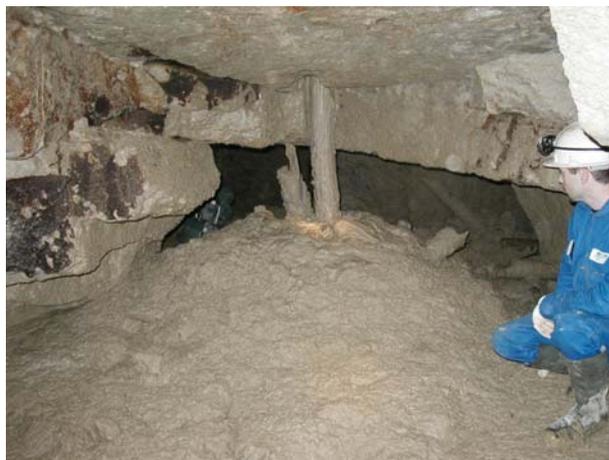


Figure 46 : Remblayage par déversement gravitaire depuis la surface

Ces méthodes sont remplacées ou complétées par des injections de coulis sous pression, en présence de terrains en très mauvais état (partiellement effondrés ou décomprimés) dès lors que la destination du sol en surface impose un niveau de sécurité qui exclut l'occurrence de tassements différés (protection des constructions existantes ou projet d'aménagement urbain).

7.5.1 ROLE ET PRINCIPE

Comme pour le comblement direct, le remblaiement par déversement gravitaire a pour objectif de réduire au maximum le volume des vides souterrains pour garantir des conditions de stabilité du sol à long terme déterminées par la destination du site (enjeux).

Dans des conditions d'opérabilité favorables, ce mode de traitement, allié à des injections de clavage, peut convenir à une mise en sécurité maximale du site (tassements différés nuls ou négligeables pour le bâti existant).

Le principe est de déverser le plus simplement possible (gravitairement ou sous faible pression) des matériaux granulés criblés à partir de forages ou «puits de déversement» dont le diamètre est imposé par la technique de mise en place (le plus souvent 0,4 à 1,0 m).

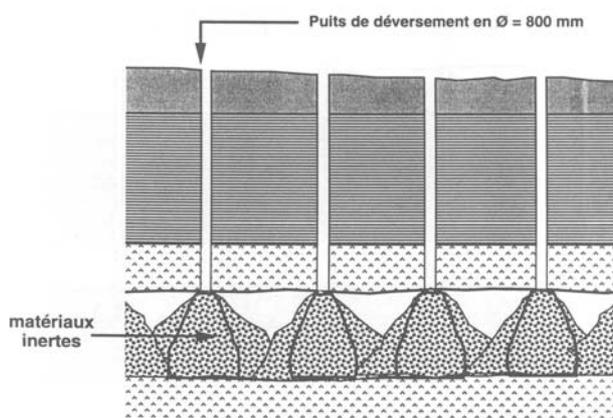


figure 47 : Déversement gravitaire par voie sèche depuis la surface

7.5.2 NATURE DES PRODUITS

Les produits utilisables sont également des matériaux bruts bon marché, comme des déblais, des déchets de carrière, des terres de fouilles, des stériles (à condition d'être inertes et non polluants), à la rigueur des gravats (bien que déconseillés a priori). Sont exclus les matériaux argileux, les débris végétaux, les produits organiques, etc.

La préparation de ces matériaux, réduite au minimum, comporte obligatoirement un criblage par grille et un éventuel lavage.

Pour des traitements plus complexes visant à obtenir une meilleure restitution des caractéristiques du sol, on utilise préférentiellement des matériaux plus nobles comme les sables et sablons dont les propriétés de compactage sont bien meilleures que celles des matériaux moins nobles dits inertes.

Là encore, l'origine des matériaux peut permettre un bénéfice économique à l'approvisionnement (stockage de déchets de décharge).

7.5.3 ASPECTS TECHNIQUES ET MISES EN ŒUVRE

Cette méthode de remblaiement se caractérise par la possibilité d'opter entre plusieurs techniques de mise en place, par voie sèche, voie humide ou semi-humide, plus rarement par voie pneumatique [1]. Le choix est déterminé par les conditions de site (géométrie et état des cavités, nature des terrains, profondeur), et par la qualité et la taille des granulats de remblai.

a) Remblaiement gravitaire par voie sèche

Cette technique consiste à déverser (sans addition d'eau) des granulats d'assez grande dimension à partir de forages (ou « puits ») nécessairement de grand diamètre (0,4 à 1,0 m). A l'aplomb des forages, le matériau forme un tas plus ou moins conique (angle élevé de l'ordre de 30° à 45°) qui s'imbrique dans le tas voisin (figure 36). L'étalement du matériau n'étant pas toujours très bon, cette technique nécessite la réalisation de forages selon un maillage dense. Le maillage doit être déterminé à partir des caractéristiques du matériau et de la distance maximale entre – axes qui, de toute façon, doit demeurer inférieure à 2 fois l'ouverture de la carrière. Le maillage doit être également adapté à la géométrie des cavités (foration au centre des galeries et des carrefours).

Le maillage, imposé par le mode de déversement, suppose une bonne connaissance de la géométrie des ouvrages. Cette connaissance résulte de visites effectuées au fond (carrières accessibles), ou d'une phase de reconnaissance préliminaire (carrières inaccessibles).

La technique de remblayage gravitaire par voie sèche exige un grand nombre de forages en grand diamètre. Elle s'avère donc coûteuse et n'est intéressante que lorsque la ressource en eau (nécessaire aux autres techniques) est insuffisante ou économiquement prohibitive. D'autre part, en terme de rentabilité, les exigences de foration sont tributaires de la profondeur (maximum : 30 à 35 m) et de la nature des terrains traversés (milieux cohérents seulement), le tubage à la foration étant difficilement envisageable (coût).

b) Remblaiement gravitaire par voie semi-humide

Cette technique consiste à former une boue visqueuse par adjonction d'eau au produit (dans la proportion : moitié eau, moitié matériau, soit à peu près 500 litres par m³). La boue est ensuite déversée à partir de trous (ou « puits ») forés et, le plus souvent, tubés.

[1] Le remblayage par **voie pneumatique**, utilisé jadis pour la mise en place des cendres volantes ne l'est plus guère aujourd'hui en raison de son coût et surtout des inconvénients qu'il présente en matière de qualité de remblaiement, de pérennité et d'insalubrité.

La mise en œuvre suppose, là encore, des forages en gros diamètre (0,4 à 0,8 m, parfois davantage) pour permettre le bon écoulement du produit. La présence d'eau nécessite la mise en place d'un tubage en acier dans les trous pour la traversée des milieux pulvérulents ou plastiques (les marnes, particulièrement sensibles à l'eau, ont tendance à fluer et à obstruer les trous de forages).

La transformation des produits en boue permet un meilleur étalement du remblai. Cet étalement peut encore être amélioré par une sélection granulométrique (coupure haute au diamètre = 200 mm). La distance entre forages est, par conséquent, plus grande que par voie sèche, le maillage devant rester adapté à la géométrie des ouvrages (ou à la destination du site). Si l'on connaît précisément la géométrie des ouvrages, on choisit de forer dans les carrefours, sinon on adopte un choix de maillage, lâche ou serré, qui est fonction des prescriptions de mise en sécurité du site (25 x 25 m à 15 x 15 m, le plus souvent), en resserrant progressivement le maillage, si nécessaire, dans les zones mal identifiées (jusqu'à 7 m x 7 m, voire 5 x 5 m).

Cette technique permet donc une meilleure répartition du remblai pour un nombre de forages sensiblement moindre et en fin de compte un meilleur remplissage des vides.

Le remblai se mettant en place selon une pente faible (quelques degrés), il est le plus souvent nécessaire de constituer des barrages d'arrêt avec des matériaux secs, en limite des zones à combler. Le tubage permet de traverser tous les types de terrains mais en induisant un surcoût aux opérations de foration. La profondeur limite efficace se situe également autour de 30 ou 35 m, jusqu'à un maximum pouvant atteindre 45 m.

L'adjonction d'une faible quantité de ciment permet de remédier aux inconvénients de fluidité en augmentant les caractéristiques mécaniques du remblai. Le remblai est alors désigné comme « **remblai traité au ciment** ».

Le remplissage s'effectue le plus souvent avec une légère pression (de pompage) visant à mieux pousser le matériau.

c) Remblaiement gravitaire par voie humide ou « remblayage hydraulique »

Cette technique consiste à déverser un mélange constitué de sablons (ou de cendres volantes) et d'une très forte quantité d'eau (au moins 500 litres/m³). Le mélange est éventuellement additionné d'une faible quantité de ciment (autour de 100 kg/m³). Le remblai, typiquement aqueux et non plus visqueux, est introduit par pompage à partir de forages opérés en plus petit diamètre (100 à 200 mm) systématiquement tubés (figure 48).

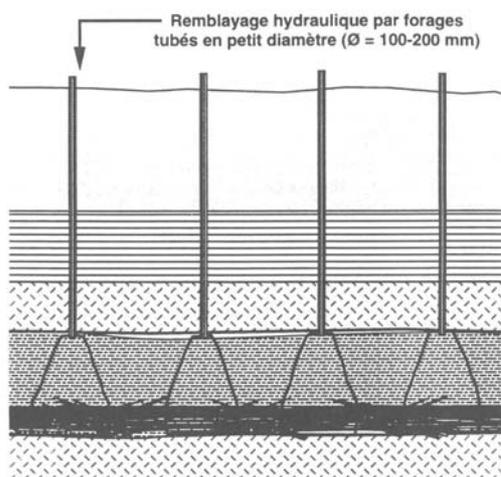


Figure 48 : déversement par voie hydraulique de cendres ou de sablons, mise en place par phases successives

La sélection de matériaux plus nobles comme des cendres volantes ou des sablons permet de confectionner des **mortiers de comblement gravitaire** dont les compositions types sont à peu près les suivantes :

Mortier de type I	A base de cendres volantes	Ciment (type CLK 45)	75 kg
		Cendres volantes	800 kg
		Eau	600 litres
Mortier de type II	A base de sablon	Ciment	75 kg
		Sablon	1 000 kg
		Eau	600 litres
Mortier de type I	A base de cendres volantes	Ciment	100 kg
		Cendres volantes humides	800 kg
		Eau	600 litres
Mortier de type II	A base de sablon	Ciment	100 kg
		Sablon	1 000 kg
		Bentonite	15 kg
		Eau	580 litres

Tableau 3 : Différents de mortiers mis en place par remblayage hydraulique

Ces mortiers, composés de matériaux à granulométrie plus fine, permettent une mise en place du remblai à partir de forages, verticaux ou légèrement inclinés, de petit diamètre.

Certains procédés comportent un ajout d'argile en faible quantité (5 à 10 %) dans le mélange sableux qui est malaxé et préparé dans une centrale. Le mélange peut être envoyé jusqu'à 500 ou 600 m de la centrale à l'aide de pompes.

Le matériau sableux, par ses propriétés granulométriques, minimise considérablement les problèmes de tassement des matériaux après « essorage » de l'eau. L'adjonction de ciment n'est pas toujours nécessaire mais se justifie lorsque les conditions de mise en place imposent l'obtention d'une prise du coulis. Le ciment atténue également les inconvénients liés à une importante quantité d'eau.



Figure 49 : Mise en place du remblai hydraulique

Le principal intérêt de la technique est de pouvoir opérer à plus grande profondeur (couramment 40 à 80 m) et d'assurer un meilleur remplissage des vides. Elle permet d'atteindre des taux de remplissage des vides de l'ordre de 95 %, dans les meilleures conditions (forages au centre de carrefours).

Dans des configurations de site plus difficiles, le maillage de foration est plus resserré (classiquement 7 m x 7 m à 10 m x 10 m).

d) Autres procédés de remblaiement par voie hydraulique

Différents procédés de traitement des matériaux se rattachent à ces techniques de déversement par voie humide et font l'objet de brevets. On peut noter, par exemple :

- le procédé dit « COLCRETE » de la société ESF. Ce procédé consiste à confectionner un béton « plastique » à partir de matériaux de remblai divers, inertes, mais triés, concassés et malaxés auxquels sont rajoutés des cendres volantes et un liant hydraulique. Ce remblai se durcit avec peu de retrait et permet d'obtenir des caractéristiques de résistance de l'ordre de 0,4 MPa à 28 jours, résistance sensiblement inférieures à celles des mortiers de base. La mise en place du COLCRETE est effectuée de façon classique par l'intermédiaire des puits forés.
- Le procédé dit « REGIMIX » mis au point par la société REGICENTRE. Ce procédé consiste à confectionner un coulis de cendres volantes dosé à 50 ou 100 kg de ciment par m³, livré par toupie, prêt à l'emploi mais non mouillé (produit livré sec). La mise en place est réalisée par voie hydraulique après humidification en continu, par apport d'une grande quantité d'eau au mélange, avant son introduction dans les vides. Le mélange pulvérulent est humidifié à l'aide d'une source d'eau « surpressée » et introduit dans les vides à travers des forages tubés de diamètre 200 mm. Cette technique est utilisée préférentiellement pour les petits volumes de vides inaccessibles ou en terrains décomprimés et se rattache plutôt aux techniques d'injection.

e) Traitement complémentaire par injections de clavage

Le remblaiement gravitaire par voie sèche, semi-humide ou hydraulique peut être complété si besoin est par des **injections de clavage** à partir de forages conventionnels de petits diamètres (70 à 89 mm) ou en équipant les forages utilisés pour le remblaiement gravitaire (figure 50).

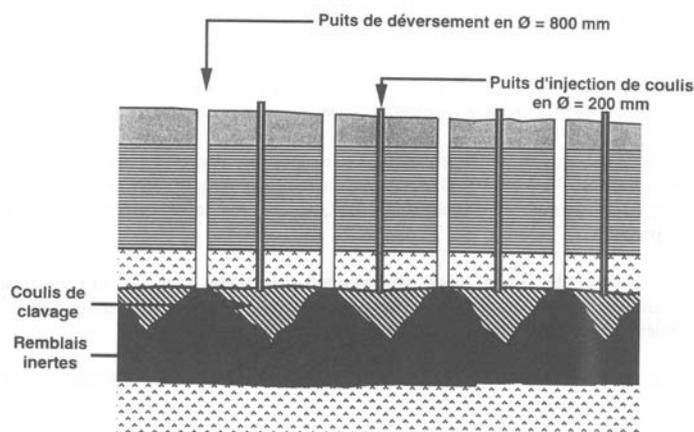


figure 50 : déversement gravitaire par voie sèche depuis la surface avec injections de clavage

7.5.4 PERFORMANCES

Les performances attendues au niveau de la qualité du remblayage (exprimée par le taux de remplissage effectif des vides et la résistance du remblai) dépendent de plusieurs facteurs conditionnés par les configurations de site. Ces facteurs sont essentiellement :

- la qualité de la technique de mise en place en elle-même ;
- la qualité des opérations en foration ;
- la qualité des matériaux de remblaiement.

La qualité du remblaiement et du clavage éventuel peut être contrôlée, en particulier après séchage, par diagraphies nucléaires.

a) Qualité de la technique de mise en place

La *mise en place par voie sèche* formant des tas coniques à partir de trous de forages laisse des vides résiduels importants entre les différents tas. La maille de foration doit être ainsi nécessairement resserrée. Le dépôt des matériaux secs (en fait plus ou moins secs) provoque, d'autre part, un tassement différé important du remblai qui augmente encore le volume final des vides résiduels. La hauteur moyenne des vides sous les ciels atteint fréquemment un ordre de grandeur métrique.

Les *mises en place par voie semi-humide ou hydraulique* permettent un meilleur remplissage des cavités avec un bon étalement du remblai dû aux déversements successifs, espacés dans le temps. Elles améliorent donc le taux de remplissage. La hauteur du vide résiduel en ciel peut ainsi être limitée à quelques dizaines de centimètres (10 à 30 cm) seulement, après essorage du matériau. Des expériences passées ont montré que l'essorage à peu près complet du matériau humidifié s'effectuait presque complètement au bout de 3 à 6 mois, et que le tassement différé du remblai, après 4 à 5 ans, pouvait ne pas dépasser 20 à 30 cm. D'autres exemples montrent, pour des galeries de grande hauteur (10 m environ), des tassements résiduels de l'ordre de 40 cm (Desforges, 1988).

b) Qualité de la foration

Essentielle pour la technique de mise en place par voie sèche, la qualité de la foration dépend des paramètres suivants :

- la maille de foration, paramètre fondamental de réussite lorsque l'on recherche une hauteur minimale de vide résiduel ;
- la précision de la foration (perçement). Un point de débouché de trou idéalement placé au centre des carrefours de galeries est la meilleure condition de réussite. Il implique une bonne connaissance de la géométrie du fond, le respect de la corrélation topographie - géométrie fond - surface, et une déviation très limitée des forages pour ne pas percer dans les piliers ou les parements ;
- la technique de foration en elle-même (choix du diamètre, de l'outil, du tubage, des paramètres opératoires, etc.) assure ensuite la qualité du résultat final.

c) Qualité des matériaux et préparation

Les matériaux inertes, tout-venant à sec ou humidifiés, provoquent des irrégularités dans les dépôts (granulométrie très large) et des phénomènes de tassement beaucoup plus importants que les matériaux nobles comme le sablon ou les cendres volantes dont les propriétés d'auto-compactage (après essorage) sont bien meilleures.

L'obtention effective des performances attendues est extrêmement importante si l'on veut éviter les injections de clavage non prescrites a priori (cas des zones non bâties comme, par exemple, les espaces verts ou parcs de loisirs).

Enfin, pour obtenir une meilleure résistance du remblai ou s'affranchir des difficultés liées à l'eau, on peut recourir aux mortiers de comblement gravitaire classiques ou aux autres produits traités également avec ajout de ciment, comme le COLCRETE, le REGIMIX ou d'autres. Ces mortiers ou produits traités permettent d'obtenir des résistances à la compression (à 28 jours) comprises entre 0,4 MPa (COLCRETE) et 2,5 MPa (coulis de type II), environ. La mise en œuvre est alors effectuée par voie hydraulique.

7.5.5 DOMAINES D'UTILISATION

Par la diversité des techniques de mise en œuvre et des matériaux utilisés, le remblaiement des vides par déversement est un mode de traitement assez universel.

Réalisées depuis la surface, les opérations de remblayage à partir de forages permettent de traiter des vides souterrains totalement inaccessibles, très dégradés ou effondrés. En outre, la grande variabilité des techniques permet d'appliquer ce traitement aux vides accessibles dans des conditions économiques très concurrentielles (comblement direct par le fond) en s'affranchissant des inconvénients majeurs que sont l'hygiène et la sécurité du personnel travaillant en souterrain. Précisons que l'accessibilité du site permet d'optimiser considérablement les opérations (adaptation du maillage de foration, localisation des trous de forages, contrôle du remblayage, meilleure estimation du volume à combler, etc.).

Précisons, en outre, que ces techniques permettent d'opérer sur des cavités de toutes dimensions, contrairement au comblement direct par le fond qui exige une ouverture minimale.

L'adaptation des différentes techniques dépend prioritairement du niveau de sécurité requis et du choix économique (ces 2 critères évoluant d'ailleurs dans le même sens : à sécurité plus élevée, technique plus coûteuse). Elle dépend également des conditions de site et plus particulièrement de la disponibilité en eau (quantité), de la profondeur des travaux et de la nature des terrains traversés.

a) Aspects sécurité

Pour les sites dont la réhabilitation du sol ne concerne que la **création d'espaces verts ou de loisirs** et non pas le bâti, on appliquera les techniques et les matériaux les plus simples et les moins coûteux comme le déversement à sec ou semi-humide de produits de remblais tout-venant non cimentés, en acceptant un vide résiduel non négligeable à terme (jusqu'à 0,50 m)[¹].

Pour les **voies publiques**, on peut envisager, selon le cas, un traitement minimal par remplissage total (vide résiduel < 20 cm), sans clavage, type remblayage hydraulique, ou si nécessaire un comblement gravitaire avec des mortiers de type II (résistance à 28 jours de l'ordre de 2 MPa).

Dans le cas de mesures visant à **protéger le bâti existant**, il faut envisager un déversement de matériaux plus nobles, le plus souvent avec ajout de ciment mis en place préférentiellement par voie semi-humide ou hydraulique. Le remblayage total des vides par injection de clavage n'est pas obligatoire dès lors que le vide résiduel final ne dépasse pas une vingtaine de centimètres et que de légers tassements en surface (millimétriques

[¹] NB : En région parisienne, les prescriptions de l'IGC prévoient de façon plus conservatrice pour les jardins et espaces verts sous-minés un comblement gravitaire par des remblais cimentés correspondant au mortier de type I (résistance à 28 jours de l'ordre de 1 MPa).

ou centimétriques) sont tolérés en surface^[1]. La technique de remblayage hydraulique de mortier ou de béton maigre (sables et graves à faible dose de ciment) s'applique parfaitement à ce domaine d'utilisation.

Naturellement, les hauteurs acceptables de vide résiduel, à long terme, dépendent de la hauteur du recouvrement. Elles seront d'autant plus faibles que l'épaisseur du recouvrement est faible.

Pour les **constructions nouvelles**, plusieurs solutions peuvent être envisagées suivant les cas :

- déversement de matériaux inertes par voie sèche ou voie semi-humide, mais toujours complété par des injections de clavage. On prescrit dans ce cas des mesures de protection passives des constructions par renforcement des structures (radiers spéciaux ou autres) ;
- déversement gravitaire par voie semi-humide de mortiers (type I ou II) complété d'injections de clavage au coulis. Le comblement des vides doit être total en assurant une restitution suffisante des caractéristiques mécaniques du sous-sol. La qualité de ce type de comblement peut lever l'exigence sur les mesures de protection passive des fondations pour les constructions les moins lourdes ;
- déversement gravitaire simple pour assurer un bon remplissage des cavités, éventuellement sans clavage, mais obligatoirement accompagné de mesures de protection passives « lourdes » du type fondations profondes (pieux).

En outre, il est nécessaire de compléter le traitement de consolidation des terrains par des injections dans les éventuelles parties de remblais « anciens » ou dans les terrains décomprimés du recouvrement (prescriptions de l'IGC).

b) Aspects configurations de site

Un comblement sur un site sans ressources en eau suffisantes implique presque obligatoirement une mise en place par voie sèche avec les inconvénients inhérents à la technique (dans la mesure où le comblement direct par le fond n'est pas réalisable).

En présence de terrains de couverture peu cohérents, pulvérulents ou de niveaux aquifères, il est nécessaire de tuber. On a alors recours à des solutions de remblayage par voie semi-humide ou hydraulique, avec des forages en petits diamètres et des matériaux de remblai plus nobles (sablon, cendres volantes, mortier) qui assurent des conditions de déversement satisfaisantes.

Il en est de même lorsque la profondeur devient importante (au-delà de 30 - 35 m) et que la foration en gros diamètre (surtout par voie sèche) devient rédhibitoire sur le plan économique.

Ces choix supposent que soient résolus les problèmes de diffusion non contrôlée des remblais humides ou hydrauliques par la mise en place d'un système de rétention (barrages de matériaux secs, emploi de remblais silicatés, dispositifs d'étanchéité, etc.), de drainage ou de pompage (essorage de l'eau), ou encore par l'utilisation d'un mortier pour le comblement.

[1] NB : Il ne faut pas oublier que des mesures de protection passive comme le renforcement de la structure par reprise en sous-oeuvre peuvent être prises en complément.

7.5.6 PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS

D'une manière générale, le principal avantage des techniques de remblaiement par déversement gravitaire réside dans leur **universalité d'utilisation** du fait de leur indépendance relative vis-à-vis des conditions d'accès ou d'état du milieu. Dans pratiquement toutes les conditions de site (tout au moins jusqu'à des profondeurs n'excédant pas de 60 à 80 m), on trouve toujours une solution adaptée au problème de traitement du sol.

En plus de cet intérêt, on retiendra également :

- la possibilité d'utiliser une grande diversité de produits (depuis les déchets de toute nature, inertes ou des matériaux plus nobles comme les cendres volantes, les sablons jusqu'à mortiers), certains étant susceptibles d'apporter même une recette (dépôts de décharges non polluants) ;
- l'exécution des opérations depuis la surface : elle assure de bonnes conditions de salubrité et de sécurité au travail ;
- un bon rendement opératoire grâce à la rapidité de la mise en œuvre.

D'un point de vue plus spécifique, les **principaux avantages et inconvénients** rattachés aux différentes techniques de mise en place sont les suivants :

a) pour la voie sèche :

- utilisation de matériaux inertes tout-venant par simple déversement depuis la surface, solution particulièrement économique ;
- méthode de comblement plutôt «douce» sans apport de quantités d'eau importantes et par conséquent ne risquant pas d'affecter le site par des écoulements d'eau intempestifs ;

mais en contrepartie :

- tassement important du remblai laissant localement des vides résiduels importants et irréguliers ;
- foration des trous (ou «puits») en gros diamètre rendant plus difficiles et plus coûteux les passages en milieux pulvérulents ou aquifères ;
- profondeur pratique ou économique limitée à 30 ou 35 m environ ;
- caractéristiques mécaniques médiocres du remblai (sans injections de clavage).

b) pour la voie semi-humide :

- remplissage quasi-total des vides par un meilleur étalement du remblai et une meilleure pénétration ;
- diamètres de foration plus faibles permettant avec un tubage de traverser tous les milieux à de plus fortes profondeurs (35 - 45 m) ;
- caractéristiques mécaniques du remblai améliorées en fonction du choix des produits employés (jusqu'à devenir excellents en prenant des produits nobles additionnés d'un liant hydraulique).

Mais en contrepartie¹ :

- grande diffusion du remblai nécessitant la réalisation éventuelle de barrages, la maîtrise de l'exhaure liée à l'essorage du matériau, le contrôle des tassements résiduels après une période d'attente de plusieurs mois pour la consolidation du remblai ;
- nécessité de procéder à une mise en place par phases successives ;

¹ NB : L'emploi de mortiers compensent naturellement ces inconvénients si l'on accepte une augmentation très sensible du coût du matériau de remblai.

- dégradation possible des ouvrages souterrains liée à la présence d'eau ;
- tendance à une certaine imperméabilité du remblai (« effet de barrage »).

c) pour le remblayage hydraulique :

- comblement possible de vides résiduels peu importants et disséminés, grâce à la diffusion très importante du remblai ;
- emploi de matériaux nobles, cendres volantes ou sablons (souvent additionnés d'un liant hydraulique conférant de meilleures caractéristiques mécaniques au remblai) ;
- foration en petit diamètre permettant des traitements à grande profondeur (jusqu'à 80 m).

Les principaux inconvénients sont encore liés à la présence d'eau en quantité très importante lorsque le matériau de remblai n'est pas additionné d'un liant hydraulique. On notera alors les effets suivants :

- tassements très importants ;
- temps de consolidation très long (jusqu'à 6 mois ou plus) ;
- perturbations liées à l'eau sur les ouvrages souterrains ;
- impacts possibles sur le régime hydrologique (effet « barrage »).

7.5.7 ASPECTS ECONOMIQUES

La méthode de comblement par déversement gravitaire représente le procédé le plus pratiqué sur les principaux chantiers de la région parisienne. Ce succès est lié à l'efficacité intrinsèque des différentes techniques, à leur modularité mais aussi à leur coût de mise en œuvre qui s'avère très compétitif à condition de bien adapter la technique aux besoins de prévention recherchés.

En dehors des coûts liés au transport des matériaux, on constate que les coûts finaux de traitement sont extrêmement variables (pratiquement du simple au décuple). Cette grande variabilité des coûts est induite par un grand nombre de facteurs dispersifs, les principaux étant la taille du chantier, la qualité des produits de remblai et la technique retenue (choix adaptés aux enjeux). Il s'agit principalement des facteurs suivants :

a) taille du chantier

Les coûts finals des travaux sont directement liés à la taille du chantier et peuvent varier facilement du simple au quintuple sur ce seul critère.

b) facteurs liés au remblai :

- nature et origine des produits ;
- contingences d'approvisionnement (transport, etc.) ;
- préparation (inertes utilisés en l'état, produits nobles lavés - tamisés, ou mortiers, etc.).

c) facteurs liés à la foration :

- profondeur (en deçà ou au-delà de 35 - 40 m) ;
- nature des terrains (terrains déconsolidés, présence d'horizons aquifères, etc.) ;
- conditions d'accessibilité en souterrain ;
- diamètre de foration ;
- tubage ;
- maille de foration.

A partir de plusieurs cas représentatifs de chantiers plus ou moins importants, on peut donner, à titre purement indicatif, quelques exemples de coûts moyens :

- remblaiement gravitaire à sec de catiches ou de carrières de craie dans le Nord - Pas-de-Calais pour des volumes limités, en conditions faciles : 15 à 25 €/m³ ;
- remblaiement par voie semi-humide d'une carrière de gypse à Rosny-sous-Bois destinée à la création d'un espace vert : 15/20 €/m³, en moyenne ;
- remblaiement gravitaire à sec (avec clavage) d'une carrière de calcaire dans la Sarthe pour un volume de 3 000 m³ : 80 €/m³.

D'autres exemples de remblaiement par voie semi-humide en région parisienne fournissent pour les cas les plus simples (matériaux inertes, faible profondeur, maille lâche de 25 x 25 m, en zone naturelle...) un coût minimum situé autour de 20 €/m³ et, dans les cas plus difficiles, autour de 30 à 60 €/m³ (les injections complémentaires de clavage s'opèrent généralement sur la base de 120 ou 140 €/m³). On estime, dans des conditions normales, que les injections de clavage augmentent le coût total du remblaiement de 8 à 15 %.

Les exemples de remblaiement semi-humide du nord (avec un matériau non traité) conduisent à des coûts comparables.

Au-delà de 50 m de profondeur, les coûts moyens augmentent très nettement avec les opérations de foration.

7.6 REMPLISSAGE ET TRAITEMENT DES TERRAINS PAR INJECTIONS

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

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



Figure 51 : Centrale d'injection pour la consolidation d'anciennes carrières du Nord-Pas-de-Calais

L'Inspection Générale des Carrières de Paris (I.G.C.) fixe au propriétaires du sol et du sous-sol, pour les carrières de calcaire grossier, de gypse, de craie de la région parisienne et les marnières, les prescriptions et les règles de l'art minimales exigées pour le projet de construction. Celles-ci sont définies dans la notice spécifique aux travaux de

consolidations souterraines exécutés par injection (notice IGC, version janvier 2003). Elle impose des reconnaissances préliminaires des sols, des définitions des travaux de consolidation par injection, des contrôles des résultats de la consolidation et des documents à fournir après les travaux.

Le procédé de comblement par injections se différencie essentiellement des autres modes de comblement par la mise en œuvre de **granulats fins** de qualité toujours **traités au ciment**, mélangés à de l'eau et injectés sous forme d'émulsion soit gravitairement soit, le plus souvent, sous faible pression à partir de forages en petits diamètres. Cette technique est donc opérable en terrains décomprimés et à grande profondeur pour les cavités inaccessibles ou même impossibles à reconnaître précisément. Dans le cas de vides de relativement faible volume, il est nécessaire d'utiliser un **coulis à haute pénétrabilité** et à le mettre en œuvre **sous pression** (figure 52).

7.6.1 ROLE ET PRINCIPE

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

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

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

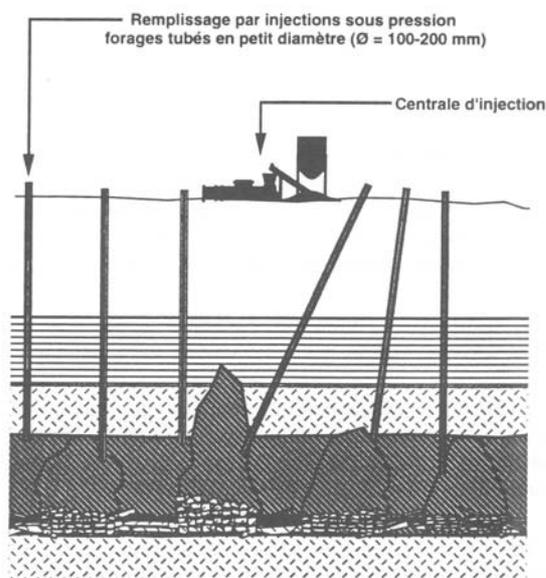


figure 52 : injections de mortier ou de coulis par voie gravitaire ou sous faible pression (0,1 - 0,5 MPa)

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

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

7.6.2 NATURE DES PRODUITS

Après avoir utilisé longtemps pour l'injection des sols des laits de ciments, plus ou moins dilués ou additionnés d'une charge (mortier), le choix se porte actuellement sur plusieurs dizaines de mélanges de produits permettant de résoudre tous les types d'injections en fonction de la dimension des vides (J. Boutitie et J. Meyer, in Filliat, 1981).

Indépendamment des produits d'injections destinés à d'autres applications du domaine du Génie Civil ou des Bâtiments et Travaux Publics [1], on distinguera, dans le cadre des traitements des vides et des terrains décomprimés, les principaux types de coulis suivants :

- les **coulis instables à base de ciment**, dont la sédimentation des particules se produit dès qu'on laisse la suspension en repos. La limite d'injectabilité de ces coulis n'est modifiée que par la dilution, ce qui fait qu'ils constituent, en fait, une sorte de remblayage hydraulique, avec évacuation de l'eau par «essorage» (accentué par la pression d'injection) ;
- les **coulis de ciment activés** caractérisés par un état « colloïdal ». Ils sont fluidifiés et peu délavables. L'activation est obtenue par malaxage mécanique intense («haute turbulence») ou par adjonction d'adjuvants plastifiants ;
- les **coulis stables argile - ciment**, mélanges stables pendant la durée d'injection avec prise retardée. Ils se caractérisent par un apport d'argiles et bentonites, avec composition argile - ciment qui permet d'obtenir une gamme étendue de résistance mécanique. Ils sont économiques et «pénétrants» ;
- les **coulis avec charge (= mortiers)** où une partie du ciment est remplacée par une charge inerte. Ce sont des coulis essentiellement économiques. Les produits inertes sont du filler calcaire, ou des cendres volantes. Avec les cendres volantes, on obtient un produit de meilleure résistance mécanique doté d'une pérennité remarquable (même en présence d'eau séléniteuse). Ces mortiers sont généralement activés dans des malaxeurs. Les bétons haute turbulence et du type « COLCRETE » sont obtenus de cette façon. Ils sont utilisés essentiellement pour le remplissage des vides importants.

L'utilisation de certains coulis dans des applications particulières et le développement de nouveaux produits conduisent à distinguer des coulis classiques des **coulis «spéciaux»**, parmi lesquels on peut citer :

- les **coulis à prise accélérée** et rigidification contrôlées. Ce sont des suspensions de ciment ou d'argile - ciment additionnées d'un accélérateur (le plus souvent du silicate de soude). Leur utilisation permet de résoudre les problèmes d'écoulement non contrôlé des coulis classiques. Ils résistent, en outre, particulièrement bien au délavage par l'eau. La technique de mise en œuvre est cependant plus délicate ;
- les **coulis cellulaires** du type « **coulis expansifs** » sont des produits relativement nouveaux qui comportent une certaine quantité de gaz occlus (adjonction au malaxage d'un produit le plus souvent à base de poudre d'aluminium). La réaction du mélange libère des bulles d'hydrogène qui provoque une augmentation du volume du coulis. Les « **coulis mousse** » permettent de remplir, de façon « relativement » économique, des vides importants mais avec une résistance assez faible du coulis (0,5 - 1 MPa). Ils sont obtenus par mélange d'un coulis de ciment et d'une mousse contenant un tensioactif.

[1] La classification exhaustive des produits d'injections a été établie par l'Association Française des Travaux en Souterrains (A.F.T.E.S., 1987).

Les composants

On notera que la raréfaction progressive des **cendres volantes** de centrales thermiques, qui assuraient la réalisation de coulis d'excellente qualité, relativement économiques et faciles de mise en œuvre, a entraîné leur remplacement par les sablons.

Utilisés comme charge dans les mortiers, les **sablons** nécessitent souvent une adjonction de bentonite pour améliorer la fluidification. Ces sablons sont malgré tout assez coûteux. Le sablon doit être un matériau siliceux suffisamment pur (du type sable stampien) ne contenant pas plus de 0,4 % de matières organiques.

Le **ciment** utilisé est généralement du type CLK. Il doit pouvoir résister à l'action chimique des eaux séléniteuses (dans les carrières de gypse, plus particulièrement).

La **bentonite** doit être une bentonite activée dont le diamètre des particules en suspension ne doit pas dépasser 2 microns. Elle est hydratée avant l'introduction dans le malaxeur.



figure 53 : Travaux d'injection près du canal Saint-Martin (document IGC-Paris)



Figure 54 : Centrale d'injection près du canal Saint-Martin (document IGC-Paris)

Compositions types

A titre purement indicatif, on peut citer quelques exemples types de composition de mortiers et de coulis utilisés pour différentes applications :

Mortiers de remplissage gravitaire

Mortier type I	75	kg de ciment CLK 45
	700	kg de sable (en poids sec)
	300	kg de cendres (en poids sec)
	580	litres d'eau
Mortier type II	100	kg de ciment
	1000	kg de sable
	15	kg de bentonite activée
	580	litres d'eau
Mortier type III	150	kg de ciment
	700	kg de sable
	300	kg de cendres
	560	litres d'eau

Coulis de clavage et de traitement des terrains décomprimés

Coulis type I	200	kg de ciment
	300	kg de sable
	500	kg de cendres
	595	litres d'eau
Coulis type II	325	kg de ciment
	30	kg de bentonite
	880	litres d'eau
Coulis type III	250	kg de ciment
	200	kg de cendres sèches
	20	kg de bentonite
	720	litres d'eau
Coulis type IV à rigidification rapide	375	kg de ciment
	25	kg de bentonite
	17	litres de silicate
	250	litres d'eau

Tableau 4 : Différentes composition types de mortiers et coulis

7.6.3 ASPECTS TECHNIQUES ET MISE EN ŒUVRE

Les modalités de traitement par injection diffèrent selon les objectifs poursuivis qui sont, par ordre croissant de pression d'injection, les suivants :

- combler totalement les vides par un remblai cohérent (gravitaire ou très faible pression de poussée) ;
- éliminer les vides résiduels par clavage (injection sous pression) ;
- traiter les vides résiduels et les terrains décomprimés (injections fluides pénétrantes) ;
- traiter les remblais de mauvaise qualité (injections solides).

Ces objectifs conditionnent le choix des produits d'injection et les choix techniques de mise en place.

Plus qu'ailleurs, la **phase préliminaire de faisabilité** est primordiale : Il s'agit, préalablement à toute intervention en milieu inaccessible, d'acquérir un maximum de connaissance sur la dimension des vides à remplir pour déterminer la technique la plus efficace.

Pratiquement toujours, des essais spécifiques d'injection sont nécessaires sur les chantiers de grande ampleur (**plots d'essais**). Ils permettent de préciser en dernier

ressort les paramètres techniques opératoires : profondeur, espacement des forages (maille), diamètre, tubage, nature des coulis et surtout débit et pression d'injection.

Dans la pratique, les opérations d'injection sont souvent circonscrites à une certaine partie de la carrière. Il est alors nécessaire d'établir des **barrages d'arrêt** limitant les épanchements en dehors de la zone à traiter. La réalisation de ces barrages peut s'opérer de différents façons : la pratique recommandée consiste à établir une double ligne de forages resserrés et disposés en quinconce. Le tube d'injection est descendu au fond du forage et l'injection est faite par passes remontantes. On peut aussi injecter un mortier à rigidification rapide (par adjonction de silicate par exemple) ou insuffler des matériaux fins et secs (fillers calcaires ou cendres sèches). Il est encore possible de réaliser ce barrage au moyen de forages de plus gros diamètre (300 à 400 mm) dans lesquels un béton maigre est déversé par gravité (Desforges, 1988).

La **préparation** des produits d'injection (mortiers ou coulis) s'opère classiquement en mélangeant à l'eau les granulats fins (cendres volantes, sablons traités au ciment) et les éventuels adjuvants de fluidification (bentonite) ou de rigidification (silicate de soude). Le mélange, réalisé à partir d'un mélangeur ou d'un malaxeur à turbine, produit la mise en émulsion.

L'**injection** proprement dite est effectuée au moyen de pompes centrifuges ou à vis pour les injections de gros vides sous faible pression (< 0,5 MPa) ou de pompes à piston pour une pression plus élevée (> 0,5 MPa).

Le **maillage** des forages d'injection est généralement compris entre 3 m x 3 m et 15 m x 15 m (AFTES, 1987). Il est finalement déterminé par des considérations géométriques en fonction du rayon d'action théorique, R, et du type d'injection.

La disposition des forages dans l'espace est fonction du type de traitement et de la localisation des ouvrages : ils peuvent être parallèles ou divergents, implantés sur une ou plusieurs lignes parallèles depuis la surface, orthogonalement ou décalés en quinconce.

La **mise en œuvre** des injections repose sur 3 paramètres principaux : le volume de coulis par passe, la cadence ou débit d'injection et la pression d'injection. L'écoulement d'un coulis dans un milieu est complexe. La pression d'injection, en particulier, dépendra du débit d'injection, de la perméabilité du milieu et de la viscosité du coulis.

L'injection, selon les besoins, est réalisée par un branchement direct en tête de forage ou par passes successives (de 2 à 5 m), soit à l'avancement soit en remontant.

On peut différencier plusieurs applications spécifiques des techniques d'injection.

a) Traitement des carrières inaccessibles

En présence de cavités de faible volume, on traitera directement les vides par des injections « gravitaires » de mortiers mis en place sous faible pression (il s'agit plutôt d'une poussée des produits de remblai).

Les vides des carrières inaccessibles en mauvais état, mais non effondrées, sont toujours importants. Il est préférable, dans ce cas, d'opérer le comblement en deux phases distinctes :

- une **phase de remplissage primaire** des vides, réalisée en fonction de la destination du site, soit par comblement direct ou déversement gravitaire de produits inertes soit par injection de mortiers (remplissage gravitaire ou sous très faible pression de poussée) ;
- une seconde **phase de clavage** par injection sous pression, opérée plus de 2 à 3 semaines après l'injection primaire de mortiers voire plusieurs mois après, dans le cas de comblement gravitaire par voie semi-humide (figure 55).

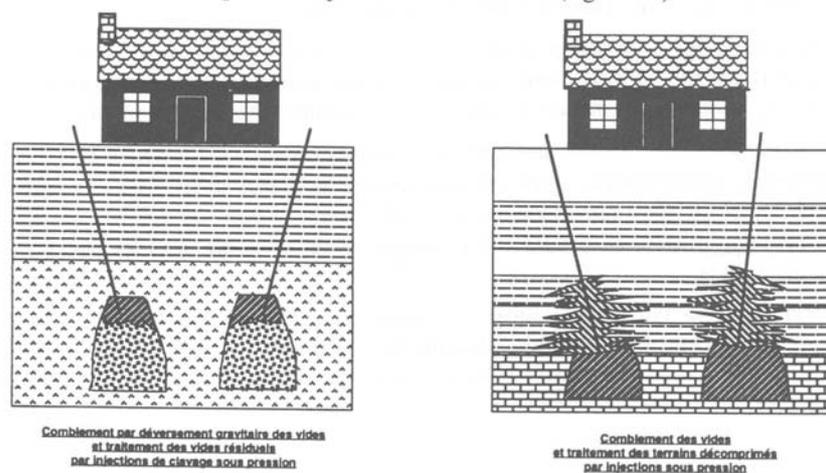


figure 55 : remplissage des vides et consolidation des terrains par injections

Dans la **phase de remplissage primaire**, les produits injectés correspondent alors aux mortiers de remplissage gravitaire et aux coulis dits « de clavage » (tableau 4).

L'injection de l'émulsion est réalisée sous très faible pression par une pompe centrifuge dans des flexibles puis des tubes verticaux ou inclinés (\varnothing : 50 à 100 mm) placés dans des trous de forage de petit diamètre (\varnothing : 80 à 160 mm). Les tubes, généralement en PVC, sont lisses au niveau des terrains non injectés et crépinés au niveau des terrains vacuolaires dans le cas d'un simple remplissage gravitaire.

Dans la **phase de clavage**, l'injection est réalisée sous une pression plus élevée mais qui demeure encore faible (0,1 à 0,3 MPa, maximum : 0,5 MPa) à partir de forages à maille plus serrée et de petit diamètre (\varnothing : 80 à 100 mm), équipés de tubes crépinés (\varnothing : 50 à 60 mm).

L'implantation et le **maillage des forages** sont établis de manière à assurer un remplissage complet des vides, si possible en s'adaptant aux caractéristiques géométriques des cavités (lorsqu'elles sont connues). La détermination du maillage proprement dit dépend des connaissances acquises sur le site et de la destination des terrains de surface. L'I.G.C retient en principe :

- pour les bâtiments : maille de 5 m x 5 m ;
- pour les voies publiques : maille de 7 m x 7 m ou 8 m x 8 m et les voies ferrées ;
- pour les espaces verts : maille jusqu'à 10 m x 10 m.

b) Traitement des terrains effondrés ou décomprimés

Lorsque les cavités sont affectées de phénomènes d'effondrement généralisé ou localisé (fontis) ou lorsqu'elles ont été foudroyés (méthode d'exploitation par « affaissement dirigé »), les terrains sus-jacents sont « décomprimés » et peuvent présenter également des vides plus ou moins importants et diffus.

Dans le cadre d'un projet d'aménagement de constructions nouvelles, le traitement définitif de tels terrains, tout comme celui des anciens remblais d'exploitation à ciel ouvert, nécessite des travaux d'injection pour restituer leur résistance initiale.

Compte tenu de la nature des vides, les produits d'injection correspondent à des **coulis de haute pénétrabilité**, ayant une plus grande résistance après prise et nécessairement mis en place sous plus forte pression (0,3 à 1,0 MPa). En site urbain, la pression d'injection ne dépasse pas 0,5 MPa pour éviter tout désordre dans les ouvrages enterrés et en surface.

L'injection se fait par des tubes « à manchette » (\varnothing : 33 à 45 mm) dans des forages en petit diamètre (\varnothing : 60 - 70 mm) dont la maille est resserrée (jusqu'à 3 m x 3 m). Elle s'effectue, le plus souvent, par tranches remontantes d'une hauteur correspondant à la hauteur du tube à manchette.

Les opérations d'injections sont plus délicates et nécessitent, pour l'obtention d'un traitement final de qualité, des moyens de contrôles des dosages et des volumes des produits injectés adaptés à la centrale d'injection.

c) Traitement particulier des remblais par injections solides

Une technique particulière est quelquefois utilisée pour le traitement des vides non francs et surtout des anciens remblais de mauvaise qualité (figure 43). La méthode consiste à venir « pousser » ces remblais par une injection de mortier très sec (« injection solide ») sous une très forte pression d'injection (jusqu'à 4 MPa environ). La nature du mortier et des remblais facilite la dissipation très rapide de la pression dans le milieu. La particularité du mortier réside dans sa très faible teneur en eau (environ 100 litres d'eau par tonne de matériau).

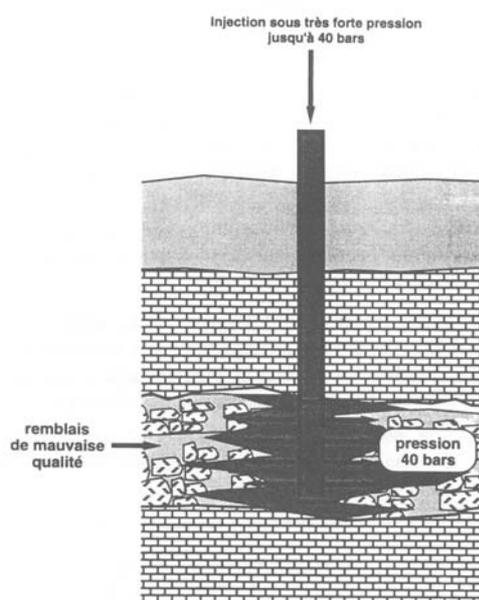


figure 56 : traitement des remblais par injections solides sous forte pression

L'injection de ce mortier sec sous une pression aussi forte provoque une compression suivie d'une prise des remblais qui permet d'éviter le clivage final.

Cette technique exige des précautions particulières à la mise en œuvre et une grande compétence de l'opérateur pour éviter tout claquage accidentel des terrains.

Les coûts sont plutôt élevés et atteignent facilement 350 €/m³, mais les volumes sont faibles.

7.6.4 PERFORMANCES

Les techniques d'injections de mortiers ou de coulis dans le sous-sol représentent, à l'heure actuelle, le mode de traitement le plus évolué sur le plan technique, et le plus performant quant à la qualité finale des résultats.

La technique, efficace au vu des équipements et produits utilisés, permet d'assurer un **comblement** que l'on peut considérer comme total des vides, même à grande profondeur.

La mise en œuvre de produits à granulométrie fine et forte pénétrabilité, injectés sous pression, permet d'obtenir un écoulement aussi parfait que possible du remblai sous un angle naturel très faible en permettant un **clavage** soigné (blocage du remblai au ciel de carrière), même à partir d'une mise en place gravitaire.

La diversité des techniques et des produits d'injection permet, en outre, des applications plus larges comme le traitement définitif et pérenne des terrains vacuolaires de tous types ou affectés de vides résiduels, les terrains décomprimés par affaissement ou les remblais de mauvaise qualité.

La **consolidation** des terrains, qu'il s'agisse de la restitution des caractéristiques mécaniques des terrains ou de leur nécessaire amélioration à des fins d'urbanisme, est de surcroît la particularité essentielle et valorisante de la méthode qui n'utilise que des produits durcissant dans le temps.

On peut noter, à titre indicatif, quelques exemples de caractéristiques de résistance à la compression (à 28 jours) attendues pour des mortiers et coulis classiques correspondant aux types définis précédemment :

Type	Utilisation préconisée (d'après I.G.C - Paris)	Résistance à 28 jours	Destination préconisée (d'après I.G.C - Paris)
Mortier type I	Remplissage	1 MPa	Jardins et espaces verts
Mortier type II	Remplissage	1,5 MPa	Voies publiques
Mortier type III	Remplissage	2 MPa	Bâtiments
Coulis de clavage	Clavage	2 - 3 MPa	Bâtiments
Coulis ciment-bentonite	Terrains décomprimés	3 MPa	Bâtiments
Coulis à rigidification	Terrains décomprimés, barrages	3 MPa	

Tableau n° 5 : Caractéristiques mécaniques des mortiers et coulis

Les prescriptions de l'IGC de Paris (notice 2003) prévoient des valeurs minimales de résistance à la compression des différents mortiers et coulis, mesurées sur des éprouvettes normalisées soumises à un laboratoire agréé COFRAC. Ces valeurs sont les suivantes :

- mortier de remplissage : 1,5 MPa ;
- coulis de clavage : 3 MPa ;
- coulis de traitement : 3 MPa.

7.6.5 DOMAINES D'UTILISATION

Les techniques de traitement des terrains par injections, plus coûteuses sur le plan économique, ne sont envisageables que sur des sites nécessitant une mise en sécurité maximale et placés dans des conditions très défavorables, à savoir :

- cavités totalement inaccessibles en très mauvais état et partiellement effondrées ;
- terrains sus-jacents décomprimés, carrières totalement effondrées, remblais de mauvaise qualité à retraiter ;
- conditions de site défavorables (grande profondeur, terrains bouleversés, ouvrages non identifiables, etc.) ;
- résistance mécanique du sol et du sous-sol insuffisante pour satisfaire aux prescriptions (aménagement des terrains de surface) ;
- terrains devant subir un traitement définitif et pérenne pour éliminer tout risque d'affaissement résiduel et réduire au minimum les renforcements de structure ou les fondations accompagnant la réalisation de constructions nouvelles.

Ces techniques ne sont intéressantes pratiquement et économiquement que là où les méthodes conventionnelles, plus rudimentaires, trouvent leurs limites d'application. Elles sont donc essentiellement réservées aux grandes opérations de réhabilitation de sites urbanisés ou d'aménagement de constructions nouvelles importantes.

7.6.6 PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Reposant sur des techniques plus élaborées mettant en œuvre des produits nobles, les traitements par injections présentent des avantages déterminants :

- assurance d'un remplissage total des cavités ou des vides résiduels par la mise en œuvre sous pression de mortiers ou coulis à haute pénétrabilité permettant un clavage aussi parfait que possible des remblais ;
- restitution ou amélioration des caractéristiques mécaniques du sous-sol, grâce à l'utilisation de produits d'injection durcissants ;
- opérabilité en conditions de sites difficiles.

En contrepartie, ces techniques de traitement se traduisent bien évidemment par un coût économique beaucoup plus élevé.

Elles impliquent, d'autre part, que les travaux soient réalisés par du personnel compétent et expérimenté, doté de moyens matériels performants pour minimiser les inconvénients ou les risques suivants :

- maille de foration mal adaptée ou déviation trop importante des forages laissant subsister des vides résiduels ;
- mauvais contrôle des paramètres d'injection à partir de la centrale (débit, volume et surtout pression d'injection), susceptible d'induire des phénomènes de claquage dans les terrains ou des mouvements en surface, avec des incidences sur la voirie, les réseaux, les égouts, etc. ;
- injection incontrôlée des coulis (plus fluides et pénétrants, sous pression) provoquant des phénomènes de dispersions latérales, avec comme conséquence des pertes et des possibilités de dégâts sur les structures environnantes de tous types.

Ces mauvaises réalisations induisent inévitablement des surcoûts préjudiciables et un certain doute sur l'efficacité des traitements opérés.

D'autre part, si les coulis actuels semblent assez bien résister dans le temps aux sollicitations mécaniques, statiques ou dynamiques et climatiques, les propriétés de résistance peuvent être néanmoins altérées par un milieu particulièrement agressif, par exemple en présence d'eaux séléniteuses (fortes teneurs en sulfates) ou d'eaux polluées (rejets d'eaux industrielles, égouts, etc.). La prise en compte du degré d'agressivité des eaux doit être analysée lors du choix des ciments.

Enfin, outre les problèmes d'hygiène et de sécurité liées aux produits pendant les travaux, il faut signaler le risque de modification de la qualité des eaux ou du régime des circulations hydrauliques naturelles par « effet barrage ». Bien que ce risque soit généralement faible, il faut adopter, si besoin est, des dispositions préventives particulières après analyse des risques (amélioration du drainage par des tubes, par exemple).

7.6.7 CONTROLE DE L'EFFICACITE DU TRAITEMENT DES TERRAINS PAR INJECTIONS

L'évaluation de l'efficacité d'un traitement par injection (en vue d'étanchement ou de consolidation) peut s'effectuer au cours de deux phases :

- pendant l'exécution du traitement ;
- après l'exécution.

a) En phase d'injection :

Les contrôles à réaliser portent sur :

- les caractéristiques des coulis (quantité et poids des matériaux approvisionnés, qualité et dosage des ciments) ;
- les soulèvements du sol (capteur avec alarme si les déplacements sont trop importants) ;
- les modifications de l'écoulement de la nappe par des essais Lugeon ou Lefranc associés à des mesures piézométriques ;
- les irrégularités observées dans les terrains par l'enregistrement des paramètres de forage (ou diagraphie instantanée) lors de la réalisation des forages d'injection, en complément des reconnaissances préliminaires.

b) Après l'injection :

Les contrôles suivants permettent de vérifier si les objectifs fixés ont été atteints :

- forages carottés, pour l'observation des terrains avec ou sans marquage préalable des coulis à l'aide de colorants ;
- forages destructifs avec enregistrement des paramètres ;
- mesures ponctuelles de pénétrométrie, pressiométrie ou dilatométrie qui donnent des indications sur l'amélioration des caractéristiques physiques du milieu traité. Les essais au pressiomètre et au dilatomètre sont réalisés dans des forages de petits diamètres ;
- essais mécaniques en laboratoire sur échantillons pour vérifier l'efficacité du traitement de consolidation ;
- essais de perméabilité pour contrôler un traitement d'étanchement, essais Lefranc, essais Lugeon et mesures piézométriques s'ils n'ont pas été réalisés pendant l'injection ;
- essais d'injections complémentaires.

7.6.8 ASPECTS ECONOMIQUES

La méthode de remplissage des vides par injections représente la solution technique la plus sûre de traitement des terrains mais aussi la plus onéreuse.

Le coût économique est, là encore, directement lié à la nature des produits d'injection (mortiers et coulis), à leurs conditions d'approvisionnement, à leur mise en œuvre, ainsi qu'aux conditions de foration (profondeur, tubage, accès, etc.).

Contrairement au comblement gravitaire, le traitement par injection représente un coût particulièrement onéreux, par la nature et la qualité des coulis, plutôt qu'aux opérations de foration proprement dites (presque le double pour un coulis de clavage).

En fait, si la foration (toujours en petit diamètre) en elle-même est relativement peu coûteuse (25 € à 30 € le mètre linéaire, environ), les coûts de foration s'avèrent finalement importants du fait du resserrage de la maille. Les coûts totaux de foration et mise en œuvre atteignent alors facilement 60 € à 120 €/m³ de produit injecté, en fonction

de la profondeur et de la difficulté du clavage. Le **coût final** des injections (comblement suivi de clavage) atteint ainsi un intervalle de prix compris le plus souvent **entre 60 € et 180 €/m³**, en fonction des conditions de site (profondeur) et de la nature des opérations d'injection (comblement, clavage, traitement des terrains décomprimés).

La fourchette de prix est donc très grande en fonction de la nature des produits, de la profondeur, mais surtout de l'effet d'échelle.

On peut citer comme exemples :

- le cas du comblement (18 000 m³) des anciens travaux miniers de moyeuve-Grande (54), pour un coût total unitaire tout compris de 155 €/m³ ;
- la déviation de Meaux : comblement des carrières dans le gypse ludien de la deuxième masse, datant des XIX^{ème} et XX^{ème} siècles, partiellement effondrées. Deux types de comblement ont été pratiqués :
 - comblement général au droit des ouvrages d'art avec d'abord la mise en place de barrages en mortier rigidifié au silicate (2500 m³) pour délimiter la zone à combler, puis un comblement par mortiers gravitaires (30 000 m³), mis en place à travers des forages tubés en PVC (cendres volantes avec 75 kg/m³ de ciment et sablons avec 125 kg/m³ de ciment) : prix de l'ordre de 60 €/m³ ;
 - comblement complémentaire sous un passage supérieur (1190 m³) : comblement cendres volantes avec ciment et clavage sous pression (1 MPa) : prix supérieur 300 €/m³.

7.7 REMPLISSAGE PAR MOUSSES THERMODURCISSABLES

La technique de remplissage des vides par des mousses thermodurcissables, issue d'applications particulières du domaine minier, est appliquée ponctuellement pour le traitement des carrières depuis un peu plus d'une dizaine d'années. On retiendra qu'elle est essentiellement utilisée là où les méthodes traditionnelles de comblement trouvent leurs limites, pour des raisons de mise en œuvre ou de sécurité (péril imminent). Technique plutôt onéreuse, son application est réservée aux cavités d'assez faible volume (quelques milliers de m³, au maximum).

Il s'agit d'une technique récente et innovante sur laquelle le retour d'expérience livre des premières connaissances intéressantes sur plusieurs sites, mais qui demeurent encore limitées dans le temps (recul d'une dizaine d'années). La pérennité de la technique n'est donc pas encore acquise.

On notera que cette technique a été appliquée en France sur plus d'une dizaine de sites dont, à titre d'exemples, Pontoise (Val d'Oise) sur deux zones de carrières de 600 et 1100 m³, Conflans-Ste-Honorine (Yvelines) sur 340 m³, plusieurs zones du Nord de 80, 350 et 1250 m³, une zone de 2200 m³ en Gironde.

7.7.1 ROLE ET PRINCIPE

Le remplissage des vides à l'aide de mousse a pour principal objectif de combler complètement les vides avec un produit capable de durcir rapidement. Le but du remplissage est d'empêcher toute évolution de la dégradation des piliers et éviter les chutes de toit ou la création d'une montée de voûte.

Ce traitement permet également de participer à un système d'étanchéité particulier des terrains ou à la réalisation de barrages de protection spécifiques.



Figure 57 : Remplissage d'un fontis par de la mousse thermodurcissable et mise en place d'une couverture végétale (Conflans Ste-Honorine, Val-d'Oise)

Le principe du remplissage par mousse est de faire pénétrer dans les vides du massif rocheux (cavités souterraines, poches, vides résiduels, vides karstiques, vides fissuraux ou intergranulaires, etc.), un produit aussi pénétrant que possible (fluide peu visqueux) capable de durcir. Les caractéristiques des produits sont adaptées à la fonction recherchée.

La pénétration de ces mousses exige parfois une certaine pression d'injection en fonction de la géométrie des vides et des conditions de site rencontrées (nature des terrains, géologie, profondeur, environnement, etc.).

7.7.2 NATURE DES PRODUITS

Les mousses polyuréthanes n'étant plus utilisées actuellement voire interdites pour des raisons de sécurité, on retiendra les deux composés suivants :

a) Mousses formophénoliques

Les mousses à base de résine de phénol-formaldéhyde ont une bonne stabilité dimensionnelle et un rapport élevé entre la résistance mécanique et le poids. Elles sont généralement utilisées en masse spécifique variant de 40 à 65 kg/m³.

b) Mousses urée-formol

Les mousses à base de résine d'urée-formaldéhyde ont été mises au point en Europe dans les années 1950. Elles sont généralement constituées sur le chantier à partir d'un mélange de résine urée-formol, d'un agent gonflant et d'air comprimé. Les résines sont d'abord diluées dans l'eau pour ensuite être transformées en mousse au moyen d'air comprimé. Un durcisseur est ajouté à la mousse provoquant le démarrage du processus de polymérisation et le durcissement définitif.

Ces mousses, appelées également « mousses dures », constituent un matériau relativement peu coûteux qui peut-être fabriqué à une faible masse spécifique (8 à 160 kg/m³).

Elles constituent les mousses de remplissage des vides de carrières les plus courantes.

7.7.3 ASPECTS TECHNIQUES ET MISE EN ŒUVRE

La mise en place nécessite peu de matériel : des pompes doseuses (à pistons) dont le débit peut varier de 8 à 25 l/min, des flexibles, un mélangeur statique muni d'une canne d'injection pour diriger le jet. Les produits sont stockés dans des bidons ou conteneurs. La préparation de la mousse peut être réalisée sur le site. Cet équipement léger peut se situer jusqu'à 100 m de la zone à combler.

Le mélange des composants se fait sur place et est directement envoyé vers la cavité par les flexibles ou à travers des forages équipés de tubes lisses.

Pour les mousses à base d'urée-formol, les composants sont comprimés dans des tuyaux séparés vers un appareil mélangeur et appliqués ensemble. Le moussage de la solution aqueuse de résine urée-formol s'effectue à l'aide d'air comprimé ou d'azote et, une fois mélangé avec le durcisseur (eau + composants chimiques), la réaction débute au bout de 40 à 60 secondes.

Généralement, les cavités sont traitées de l'intérieur et comblées en injections inversées. Cette technique consiste à introduire des tuyaux d'injections dans les vides les plus lointains, et à pousser la mousse en rabattant vers la sortie. Ce principe a pour avantage de remplir les moindres recoins avant de progresser vers la sortie. La progression de la mousse peut être facilement et volontairement limitée par des barrages légers pour isoler les zones à ne pas combler sans avoir à construire de lourds murs de barrage.

Pour les cavités inaccessibles, il est possible d'injecter le produit à travers des forages ($\phi = 100$ à 130 mm).

Le choix d'un type particulier de produit doit tenir compte des facteurs suivants :

- de la durée de vie;
- du fluage et de la déformation à long terme ;
- de la résistance. Pour 4 m d'épaisseur de sol à soutenir, cette résistance est normalement de l'ordre de 800 à 900 kN/m.

7.7.4 PERFORMANCES

Les mousses permettent un comblement total et rapide des vides souterrains, ce qui est l'objectif premier recherché.

Au niveau de la résistance mécanique, les mousses formophénoliques et urée-formol peuvent supporter, en principe, une pression de l'ordre de 50 à 500 kPa. En fait des essais réalisés au LRPC d'Aix-en-Provence ont donné des résistances en compression qui ne dépassaient guère 100 kPa.

Dans le cas d'un remplissage à partir de forages depuis la surface, la pompe permet un transport relativement aisé du produit (inférieur toutefois à 500 m).

7.7.5 DOMAINES D'UTILISATION

Ces techniques ne sont intéressantes pratiquement et économiquement que là où les méthodes conventionnelles trouvent leurs limites d'application :

- terrains totalement inaccessibles ou en très mauvais état comme les carrières souterraines partiellement effondrées ;
- état précaire des cavités, conditions dangereuses du site (bordure de falaise instable, etc.) ;
- zones difficiles d'accès ;

- cavités à traiter en urgence (délai très court) sous habitation ou voie publique, là où les autres traitements sont difficiles ou trop long à mettre en œuvre (remblais classiques).

Il faut noter que les mousses à base de phénol-formol et celles à base d'urée-formol ne peuvent être utilisées en milieu aqueux (sous la nappe).

7.7.6 PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Les principaux avantages de cette méthode est sa rapidité et sa simplicité de mise en œuvre. L'unité d'injection a une emprise réduite sur le chantier et minimise les nuisances pour les riverains. L'opération ne nécessite pas de pause de prise entre deux injections. Ces méthodes permettent aussi de réduire les pertes grâce au temps de prise rapide. Leur faible poids permet aussi de ne pas engendrer de fortes contraintes dans des terrains instables. Ces mousses présentent une possibilité d'extension de 25 à 50 fois le volume initial de produit. Le moussage instantané évite la réalisation de coffrage étanche.

Par contre, le principal inconvénient de ces mousses réside dans leur relativement faible résistance mécanique (au mieux de l'ordre de 50 à 100 kPa). On ne possède aucune garantie sur leur comportement à long terme, notamment au contact des eaux acides (le retour d'expérience est actuellement de 10 ans). Le coût de mise en œuvre s'avère généralement élevé. De plus, le caractère toxique par inhalation de ces produits suppose des conditions spécifiques de protection du personnel lors de sa mise en place. Les mousses ont tendance à subir un retrait au cours du séchage (environ 2 %). Elles sont sensibles aux UV et doivent être obligatoirement protégées sur toutes les zones exposées à ces rayons (à l'aide d'une géomembrane ou d'un remblai végétal). On doit également tenir compte de leur caractère exothermique.

Sur le plan environnemental, les mousses dures (urée-formol) ne présenteraient pas d'effets polluants évidents, ce qui a permis leur utilisation sur les sites mentionnés précédemment. Des essais de lixiviation ont montré que seul le taux d'hydrocarbures dissous et émulsionnés est assez fort. Compte tenu de l'utilisation du produit, cette contamination est toutefois négligeable.

7.7.7 ASPECTS ECONOMIQUES

Le remplissage par mousses une opération onéreuse essentiellement de par la nature et la qualité des produits. Ce traitement est réservé aux sites particulièrement difficiles.

7.7.8 CONTROLE DU TRAITEMENT

Le contrôle s'opère de façon essentiellement visuel en phase opératoire. Des contrôles peuvent également être effectués a posteriori pour vérifier le tassement du produit, visuellement lorsque cela est possible ou à l'aide de forages et diagraphies.

8. METHODES DE TRAITEMENT PAR SUPPRESSION DES VIDES

Les techniques désignées comme techniques de « suppression des vides » consistent, soit à décaisser, soit à supprimer les vides souterrains par abattage (mécanisé ou par explosif), des terrains de couverture et/ou des piliers.

Indépendamment du décaissement simple par terrassement mécanisé qui appartient plutôt au domaine des travaux publics, on distingue deux modes classiques d'abattage :

- la méthode par comblement - terrassement ;
- la méthode par foudroyage contrôlé des piliers.

Ces méthodes sont donc des méthodes « destructrices » et par conséquent non utilisables directement en site urbanisé.

8.1 LA METHODE DE COMPLEMENT-TERRASSEMENT

8.1.1 ROLE ET PRINCIPE

La méthode a pour objectif d'opérer :

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

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

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

8.1.2 NATURE DES PRODUITS

Les produits de remblais sont fournis prioritairement par les matériaux abattus de la couverture et parfois par d'autres produits, déchets de toute provenance, amenés sur le site pour compléter éventuellement le comblement (cas de vides particulièrement importants sous faible couverture).

Il s'agit de produits bruts, éventuellement criblés, naturellement inertes, ne présentant pas de risque de pollution sur l'environnement. La qualité, là encore, importe peu du moment que ces matériaux ne sont pas trop argileux, contiennent un minimum de produits organiques et ne soient pas de trop grande dimension pour que le tassement différé n'induisse pas un vide résiduel intolérable.

8.1.3 MISE EN ŒUVRE

Les travaux sont réalisés entièrement par des engins mécaniques depuis la surface (figure 45). On peut distinguer différentes phases opératoires :

- une phase de décapage des terrains de surface suivie d'abattage à partir d'un front. Le travail est réalisé par une pelle mécanique qui ne laisse subsister qu'une « planche » de terrain de quelques mètres seulement au-dessus des voûtes des cavités ;

- une phase de décaissement de cette planche, à l'aplomb de chaque cavité, l'engin restant bien évidemment en retrait par rapport au vide ;
- une phase de remplissage qui s'effectue au moyen de la pelle en récupérant les matériaux de remblai issus du front d'abattage laissé libre devant la cavité.

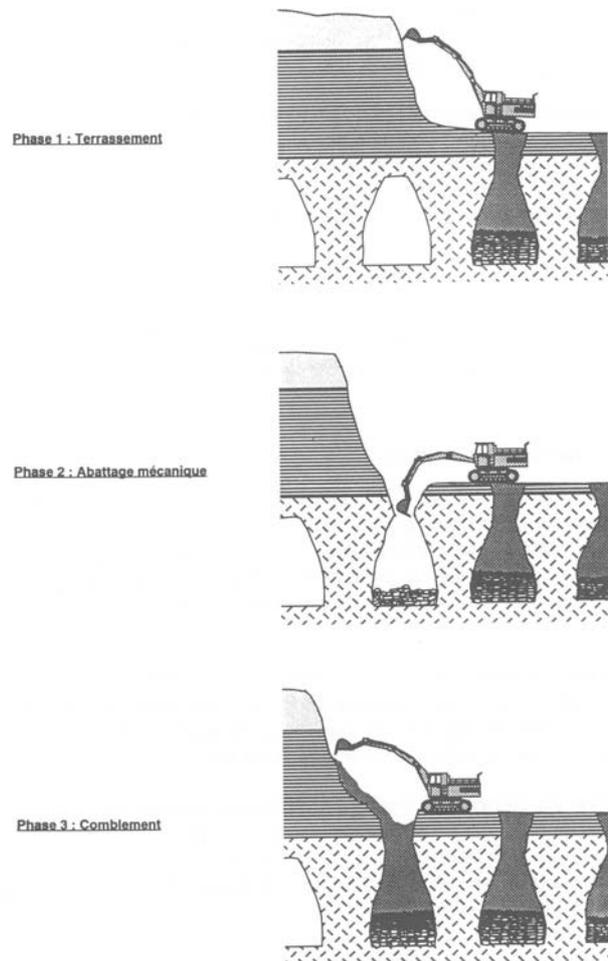


Figure 58 : suppression des vides par la méthode Terrassement-Comblement

La cavité totalement remplie peut alors être franchie par l'engin qui entame un nouveau cycle de remblaiement dans la cavité suivante.

8.1.4 PERFORMANCES

Les performances de cette méthode sont intéressantes dans la mesure où chaque cavité est traitée de façon bien individualisée à partir de sa voûte.

Le remplissage du vide peut être considéré comme presque total si le compactage final est correctement effectué et que les vides résiduels possibles latéralement sont également bien pris en compte dans le schéma opératoire.

Sans traitement particulier de consolidation (par injections par exemple), les tassements différés sont néanmoins possibles, voire inévitables (le comblement étant effectué à sec).

8.1.5 DOMAINE D'UTILISATION

Cette méthode est utilisable directement depuis la surface pour combler les carrières même inaccessibles, à condition que la hauteur du recouvrement ne soit pas trop importante. Cette hauteur n'est en fait limitée que par les capacités techniques des engins mécaniques (pelles). Elle se situe autour d'une vingtaine de mètres, au maximum.

En outre, le caractère destructif de la méthode interdit, a priori, son utilisation dans les zones urbanisées.

Par contre, cette technique peut s'utiliser sur tous les types de terrains, accessibles ou non, en bon ou mauvais état. L'exigence de sécurité des chantiers peut néanmoins poser des difficultés.

8.1.6 PRINCIPAUX AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Cette méthode est particulièrement intéressante tant sur le plan pratique (opérations entièrement mécaniques) que sur le plan économique (les remblais sont disponibles in situ à partir des terrassements). Le domaine d'utilisation est malheureusement assez limité compte tenu des limites de la faisabilité avec la profondeur. En outre, une bonne connaissance de la géométrie de l'exploitation et de la position des vides est recommandée pour que la méthode soit efficace.

Si cette méthode peut se révéler parfois délicate sur le plan de la sécurité, en raison de la circulation des engins à l'aplomb de vides, elle présente un minimum de sources de nuisances vis-à-vis de l'environnement extérieur au chantier (mis à part le bruit ou les poussières). Les inconvénients liés au transport des matériaux ou aux opérations de foration (inhérents aux méthodes de comblement traditionnelles) sont en principe totalement levés.

Enfin, cette méthode nécessite des précautions particulières pour le traitement de la zone périphérique entourant la surface traitée. On peut agir soit par un traitement actif de cette zone (injections), soit en laissant une bande de protection (marge de reculement) en prenant, par exemple, un angle limite de sécurité de 45° (étude de sol préalable à faire).

8.1.7 ASPECTS ECONOMIQUES

Réservée exclusivement au remblaiement des cavités sous faible hauteur de recouvrement, la méthode de comblement par terrassement se révèle être extrêmement avantageuse sur le plan économique. Le prix d'une telle opération correspond essentiellement aux travaux de terrassement mécanisés. Les produits de remblais sont extraits et traités sur place et ne posent donc pas de problèmes d'approvisionnement ou de transport.

Dans certains cas, toutefois, il peut être nécessaire de compléter les volumes à combler par des produits extérieurs, produits de déchets ou terres de remblais. Mais, loin d'apporter un surcoût notable, ces remblais extérieurs peuvent apporter une recette complémentaire potentiellement intéressante sur le plan financier.

Le traitement des carrières du moulin, à Montfermeil, a été opéré de cette façon avec un apport complémentaire de remblais extérieurs pour un coût final extrêmement modique. A titre purement indicatif, les estimations du financement donnaient, pour combler 300 000 m³ de vides sur 5 hectares, à environ 20 m de profondeur, des coûts moyens de l'ordre de 5 à 6 €/m³ soit 30 €/m².

8.2 LES METHODES PAR FOUROYAGE

Les méthodes de suppression des vides de carrières par foudroyage se caractérisent par un abattage systématique des piliers à l'explosif par des opérations de minage – torpillage. Le but est de provoquer l'effondrement total des terrains de recouvrement. Elles s'opèrent non pas en une seule fois (sur la totalité de la zone concernée) mais par phases successives parfaitement planifiées à l'avance.

Ce sont des opérations extrêmement délicates, voire périlleuses, qui exigent d'être réalisées par du personnel spécialiste expérimenté. Elles engendrent, de surcroît, un certain nombre de nuisances et, parfois, des risques de dégâts sur l'environnement qui résultent principalement :

- des vibrations du sol induites par les tirs de mines et qui peuvent provoquer des désordres aux constructions ;
- des perturbations dans l'écoulement des eaux du fait de l'effondrement des terrains de recouvrement ;
- des désordres sur les terrains de surface effondrés formant de larges crevasses ou des bombements. Désordres également sur la végétation susceptibles de conférer au paysage un aspect désagréable (arbres penchés dans tous les sens).

Il faut, en fait, distinguer **deux méthodes de foudroyage** :

- la méthode dite d'**affaissement dirigé**, qui a été largement employée depuis les années 1950 comme méthode d'exploitation du gypse en région parisienne (à l'Ouest, sur le massif de l'Hautil et la butte de Montmorency, mais aussi à l'Est) ;
- la méthode de **foudroyage post-exploitation**, encore au stade purement exploratoire ou expérimental, dont le but est de provoquer l'effondrement total des anciennes carrières souterraines par torpillage des piliers non dimensionnés initialement dans cet objectif.

8.2.1 LA METHODE DE FOUROYAGE PAR AFFAISSEMENT DIRIGE

Cette méthode, dérivée de la méthode par traçage et défilage des mines de fer et de charbon, n'est applicable que lorsqu'elle est planifiée dès le départ dans la stratégie et le schéma d'exploitation général (figure 46).

Elle ne peut en aucun cas s'appliquer aux carrières anciennes déjà exploitées, et par conséquent échappe au cadre de cette étude.

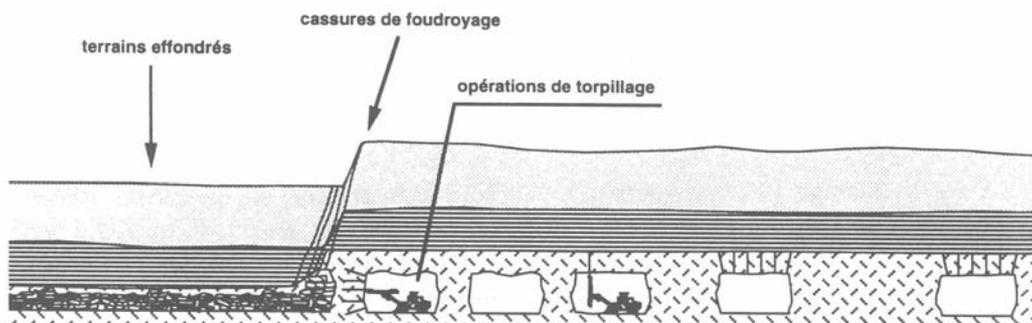


Figure 59 : foudroyage des terrains par la méthode d'affaissement dirigé

Précisons néanmoins, pour mémoire, que cette méthode repose sur trois phases essentielles :

- une phase de traçage de galeries principales découpant de gros piliers surdimensionnés ;
- une phase de dépilage consistant à venir recouper les gros piliers sur chaque face en ne laissant subsister que quatre petits piliers, quelquefois « dégraissés » pour ne laisser que des piliers résiduels juste capables de supporter la dalle de toit ;
- une phase de minage - torpillage à l'explosif des piliers résiduels opérée sur un ensemble de plusieurs piliers (1/2 hectare environ en surface) ; le torpillage final provoque un effondrement quasi instantané des terrains en surface.

Compte tenu du volume des piliers effondrés et du foisonnement des terrains, on considère généralement que l'affaissement maximal en surface et d'environ la moitié de l'ouverture (hauteur) des galeries.



Figure 60 : Figures d'arrachement sur les bords de la zone foudroyée avant le remodelage des terrains

Des opérations bien menées conduisent à un remplissage pratiquement total des vides, mais le foisonnement des terrains de couverture entraîne inévitablement des tassements différés en surface qui interdisent toute construction en surface en l'état si l'on ne procède pas à des traitements particuliers du sous-sol ou à des protections des construction (fondations ou autres).

8.2.2 LA METHODE DE FOUROYAGE POST-EXPLOITATION

Comme on vient de le voir, la méthode de foudroyage par torpillage des piliers en carrière souterraine abandonnée n'est pas encore véritablement opérationnelle.

Diverses expérimentations ont été menées dans des conditions de site particulières et favorables, comme, par exemple, sur le chantier de l'A14 (Nanterre-Orgeval) ou sur une partie de l'exploitation de Villiers-Adam (ciments Lafarge).

Pour le passage de l'autoroute A14 à Carrières-sur-Seine, où le recouvrement des carrières de Calcaire grossier est égal à leur hauteur (soit seulement quelques mètres),

l'abattage a été réalisé par torpillage à l'explosif depuis le fond, les carrières étant accessibles. Un traitement blocométrique au du brise-roche a été ensuite nécessaire avant de reprendre les matériaux en terrassement.

Dans le cas de Villiers-Adam, il s'agit d'une véritable opération de foudroyage. Le torpillage a été conduit de manière à provoquer un effondrement limité (type fontis) mais parfaitement contrôlé avec un seul souci : ne pas risquer le déclenchement d'un effondrement plus étendu (généralisé). Les opérations de foudroyage menées par phases progressives ont été effectuées avec un certain succès dans la mesure où les conditions de site, parfaitement connues par ailleurs, se prêtaient à la méthode de façon optimale (taux de défruitement limité à 50 %, faible recouvrement compris en 5 et 25 m de marnes, mécanisme de rupture du toit adapté au mode de foudroyage recherché).

La technique mise au point comprenait deux phases :

- une phase de dégraissage à l'explosif des piliers (les piliers de 5 m x 5 m étaient réduits à des quilles de 3 m de large) ;
- une seconde phase de foudroyage à l'explosif de la quille résiduelle. Cette dernière opération crée un effondrement localisé du toit provoquant un fontis en surface.

Le traitement des terrains de surface était réalisé ensuite de la façon suivante :

- phase préparatoire : enlèvement de la couverture végétale supérieure ;
- phase de colmatage : remblayage du fontis par terrassement de terres du recouvrement (marnes) ;
- phase de remodelage : remise en place des terres végétales en surface au bull-dozer.

Sur le plan économique, les coûts de ce traitement ont été totalement intégrés dans les coûts généraux d'exploitation et n'ont donc pas été individualisés de façon spécifique.

8.3 LES METHODES PAR PILONNAGE INTENSIF

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

Dans le cas des carrières souterraines abandonnées, il ne s'agit que d'une solution à explorer et à adapter, des essais de ce type ayant déjà été effectués dans le passé, dans le département du Nord.

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

Cette technique aurait en fait deux rôles distincts :

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

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

9. LES METHODES DE TRAITEMENT PAR PROTECTION PASSIVE

Relèvent de la protection passive, les dispositions qui conduisent à modifier la conception des constructions pour les rendre insensibles aux mouvements de terrains. On distingue :

- les renforcements de structure ;
- la réalisation de fondations spéciales (superficielles ou profondes) ;
- les renforcements en sous-œuvre ;
- les méthodes parachutes ,
- les adaptations des réseaux de canalisations et voiries.

9.1 RENFORCEMENT DE STRUCTURE ET FONDATIONS SUPERFICIELLES

9.1.1 ROLE ET PRINCIPE

Le principe est de rendre la construction suffisamment rigide pour qu'en cas d'affaissement localisé de la surface, elle ne présente que des mouvements d'ensemble, et en assure le franchissement en «pont».

9.1.2 MISE EN ŒUVRE

Les éléments de raideur, généralement en béton armé, peuvent être des radiers, longrines pour l'infrastructure, des poutres, chaînages ou voiles pour la superstructure.

9.1.3 PERFORMANCES

L'efficacité dépend de l'estimation que l'on a fait de l'amplitude des déformations pouvant survenir et de la raideur des éléments de renforcement.

9.1.4 DOMAINE D'UTILISATION

Cette solution est, en principe, réservée au cas de petits vides (de dimension inférieure au 1/5ème de la plus grande dimension de l'ouvrage, limitée à 5 m) dont la répartition est inconnue ou dans le cas de terrains décomprimés dans une zone anciennement effondrée.

Applicable aux constructions neuves, elle l'est difficilement pour le bâti existant.

9.1.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Avantages :

Lorsque le risque d'apparition de fontis ne peut être exclu, c'est une solution techniquement facile de mise en œuvre et relativement peu coûteuse. Elle ne peut se pratiquer qu'à la condition que les dimensions attendues des fontis soient limitées (de l'ordre du mètre).

Inconvénients :

Difficulté de définir de façon précise les paramètres à prendre en compte pour la prévision du renforcement. Difficulté d'application aux structures existantes.

9.1.6 ASPECT ECONOMIQUE

Les coûts induits sont de 5 à 15 % du coût de la construction neuve, environ.

9.2 FONDATIONS PROFONDES

9.2.1 ROLE ET PRINCIPE

Isoler la construction des mouvements de terrains par des fondations trouvant leur assise sous le niveau des cavités (figure 61).

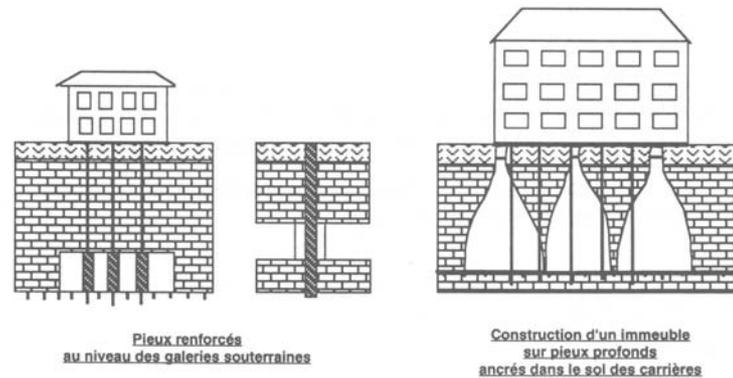


Figure 61 : constructions sur fondations profondes

9.2.2 MISE EN ŒUVRE

On distingue 2 types de fondations profondes :

- les puits bétonnés réalisés manuellement : la traversée des cavités se fait en ceinturant le puits par un anneau maçonné, qui a pour effet d'en stabiliser le ciel, et d'éviter les frottements négatifs ;
- les puits ou pieux réalisés mécaniquement (par forage ou battage). L'utilisation d'engins de forage est limitée par la géologie des terrains ou l'instabilité du ciel ; dans tous les cas, les pieux battus sont interdits en zone urbaine sous-minée. La traversée des cavités se fait, soit en injectant préalablement du béton maigre reforé par la suite, soit en réalisant un chemisage.

Les puits et pieux sont de diamètre suffisant pour éviter les risques de cisaillement (puits : 1,4 m ; pieux : de 0,6 à 1,1 m). La base doit reposer sur une assise saine.



Figure 62 : Pieux de fondation traversant une cavité souterraine

9.2.3 PERFORMANCES

Bonne efficacité en ce qui concerne les structures, mais aucune protection pour les éléments extérieurs.

La pérennité est bonne si les bétons utilisés sont bien adaptés aux terrains (agression chimique).

9.2.4 DOMAINE D'UTILISATION

Méthode utilisable quel que soit le type des cavités, applicable aux constructions neuves, ou exécutable en sous œuvre pour des ouvrages existants.

9.2.5 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Avantages :

- Méthode efficace mais limitée strictement aux structures situées dans l'emprise des travaux ;
- capacité de supporter des charges élevées.

Inconvénients :

- matériel lourd ;
- seule la structure est isolée des mouvements de terrain, ce qui peut entraîner des problèmes de liaison avec les réseaux extérieurs (voirie, canalisations,...) ;
- précautions à prendre pour la traversée des cavités : il faut prévoir une injection gravitaire préalable des vides.

9.2.6 ASPECTS ECONOMIQUES

Selon diverses sources, on estime que le coût d'un pieu foré de diamètre 0,60 à 0,80 m serait, en moyenne, pour des chantiers classiques de constructions, de l'ordre de 150 € à 250 € le mètre linéaire, auquel s'ajoute le prix d'amené et de repli du matériel (5 000 € à 10 000 € par unité). Ce prix qui fixe un ordre de grandeur est très aléatoire. Il est, en effet, extrêmement fluctuant selon la nature du terrain, l'importance du chantier et la profondeur effective atteinte.

9.3 RENFORCEMENT EN SOUS ŒUVRE

9.3.1 ROLE ET PRINCIPE

Les méthodes de renforcement en sous-œuvre sont utilisées :

- pour renforcer des fondations insuffisantes ;
- pour assurer la stabilité des constructions mitoyennes de fouilles plus profondes que leurs fondations.

9.3.2 ASPECTS TECHNIQUES

Il existe différents types de renforcement de fondations insuffisantes :

- consolidation de fondations par amélioration des qualités mécaniques de la surface d'appui (injections) ;
- consolidation par augmentation de la surface d'appui des fondations ;
- consolidation par report de charge sur un terrain plus résistant (pieux sous semelle, remplacement de la semelle primitive par une semelle au niveau voulu, etc.).

Dans le cas de renforcement en sous-œuvre visant à assurer la stabilité des constructions mitoyennes de fouilles plus profondes que leurs fondations, on utilise des étaitements ou des ancrages. Le but est de remplacer progressivement la poussée des terrains enlevés (reprise par parties d'un mur continu si le terrassement a déjà été effectué, par puits dans le cas contraire...).

D'autres techniques de reprise des efforts par vérins existent.

9.4 METHODES PARACHUTES

9.4.1 TECHNIQUES

Différentes techniques de protection passive sont désignées sous le terme de méthodes « parachutes » :

- dans des zones où ne circulent que des piétons (espaces verts, chemins,...), il s'agit de la pose, sous la couche de terre végétale, d'un treillis galvanisé à larges mailles, qui sert de filet pour retenir les personnes en cas d'éboulement ;
- sous les chaussées ou les réseaux, il s'agit de l'utilisation de *géosynthétiques* (membrane composite ou polyester) disposé et ancré sous la structure. Leur bonne résistance à la traction leur permet d'enjamber certaines zones décomprimées et de réduire les déformations à la surface (figure 63). Plusieurs sites équipés de la sorte ont démontré l'efficacité de cette solution pour le remblai d'une route construite sur une zone de fontis (Kempton, 1992).



Figure 63 : Essai d'une membrane géotextile par un camion passant à l'aplomb d'un vide (photo projet RAFAEL, source société BIDIM)

- Un autre technique est celle du géosynthétique pré-tendu (type HUESKER). La pré-tension permet d'anticiper 1% de l'allongement de la géogrille, immobilisée par remblayage, et aussi de supprimer les plis habituels à la pose (label du Comité IVOR,2003).

9.4.2 ROLE ET PRINCIPE

Le rôle d'un géotextile mis en place au sein d'une zone d'éboulement potentiel consiste à supporter les éléments le surplombant en s'appuyant sur l'effet d'arche (figure 64) et à éviter toute déformation inadmissible susceptible de mettre en péril la stabilité du talus et/ou des ouvrages en zone de fontis (routes, éventuellement bâtiments, etc.).

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

Cette solution technique est également envisagée pour la protection des bâtiments exposés aux problèmes de fontis. Des recherches sont actuellement en cours au sein de l'INERIS en

collaboration avec la société BIDIM. Le programme de recherche RAFAEL¹ a déjà permis de démontrer expérimentalement l'intérêt de cette technique et de proposer des méthodes de dimensionnement dans le cas de remblais routiers et ferroviaires sur des zones de fontis (Haza et Khay, 2005).

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

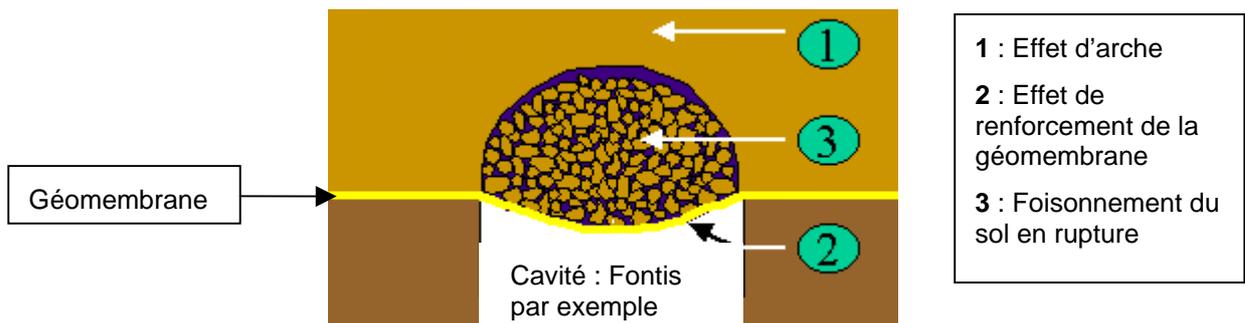


Figure 64 : Illustration de l'effet d'arche mobilisé grâce à la présence de la géomembrane

9.4.3 MISE EN ŒUVRE

Le dimensionnement du géotextile doit garantir la stabilité de l'espace protégé, même après formation du fontis ou de la cuvette d'affaissement. La figure 65 présente la forme et les paramètres pris en compte pour le calcul et le dimensionnement du géotextile. La distance D correspond à la portée du géotextile qui supporte le poids d'une partie du talus où le fontis aurait lieu.

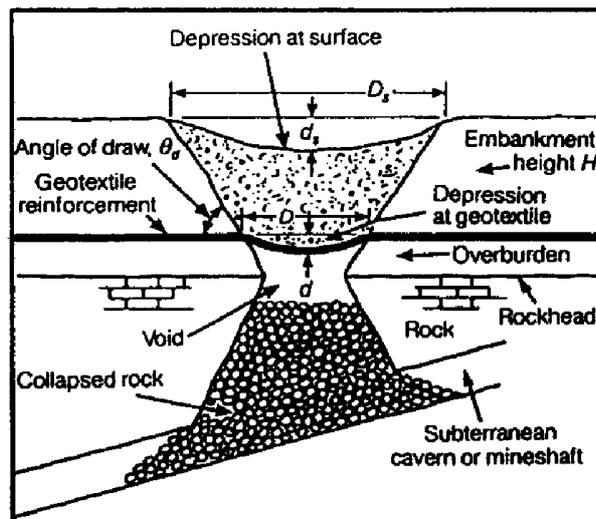


Figure 65 : Mise en place d'une couche de géotextile au-dessus d'un fontis (Krempton, 1992)

¹ Programme expérimental commun à : LIRIGM, SNCF, SCETAUROUTE, CETE et BIDIM-POLYFELT GEOSYNTHETICS

9.4.4 PERFORMANCES

Pour des routes principales, la déformation admissible du sol ne doit pas dépasser 1%. Pour des routes moins importantes, cette déformation admissible peut atteindre 2%.

9.4.5 DOMAINE D'UTILISATION

Ces méthodes sont utilisées que lorsque des vides sont soupçonnés voire même identifiés à condition que des désordres prévisibles demeurent de dimensions limités (fontis d'ordre métrique).

9.4.6 AVANTAGES ET INCONVENIENTS

Cette technique est facile dans sa mise en œuvre et relativement peu onéreuse. Elle évite les ruptures brutales du sol mais pas les déformations consécutives à des effondrements de type fontis.

Elle permet une mise en sécurité des personnes mais n'a pas pour objectif de protéger le bâti.

La mise en place d'une géogrille pré-instrumentée (type GEODETECT, proposée par la société BIDIM) peut permettre d'assurer une surveillance des déformations par fibres optiques.

Une difficulté de la technique réside dans le dimensionnement des caractéristiques de la géomembrane. Dans l'attente d'expérimentations probantes, on utilise une méthode simplifiée de dimensionnement du renforcement par géomembrane (grille et/ou textile), adapté aux routes, qui ne tient pas compte de l'effet d'arche.

9.4.7 ASPECTS ECONOMIQUES

A titre indicatif, on estime l'ordre de grandeur du coût moyen de mise en place d'une géomembrane autour de 5 €/m². En fait, ce prix varie énormément en fonction de l'importance du chantier et ne représente qu'une valeur moyenne purement indicative.

Précisons qu'il est nécessaire également de recouvrir la géomembrane par des terres ou des remblais et procéder à des travaux de terrassement et de réaménagement du site.

9.5 ADAPTATION DES RESEAUX

9.5.1 PRINCIPE

Limiter le risque de rupture des réseaux en cas d'affaissement des terrains par l'utilisation des matériaux les moins «fragiles» pour les canalisations (aciers, béton, amiante ciment...) et de joints souples, ainsi que, si nécessaire, la réalisation de fondations sur poutres dimensionnées en fonction des conditions de fontis.

9.5.2 PERFORMANCES

Des ruptures surviennent quand même en cas d'affaissements importants.

La pérennité des dispositifs est bonne tant que les déformations restent dans les limites acceptables.

9.5.3 DOMAINE D'UTILISATION

Réseaux neufs ou rénovation de réseaux anciens.

10. SYNTHÈSE RÉCAPITULATIVE : CRITÈRES DE CHOIX DES DIFFÉRENTES MÉTHODES DE MISE EN SÉCURITÉ

La description des méthodes de mise en sécurité les plus courantes effectuée dans les chapitres précédents, ainsi que l'analyse des fiches techniques fournies en annexe, montrent que le choix du mode de traitement n'est pas que purement technique ou économique en première analyse. Dans la mesure où ces méthodes ne sont pas universelles, le choix dépend aussi, essentiellement :

- des **objectifs** à atteindre en termes de maîtrise du risque et de destination du site ;
- des **domaines d'utilisation**, c'est-à-dire des configurations de site et des caractéristiques du milieu dans lequel le traitement est envisagé ;
- du **niveau de sécurité admissible** en fonction des enjeux en surface.

Mais également :

- des **aspects techniques** ;
- des **aspects économiques**.

Une analyse synthétique de comparaison des méthodes de mise en sécurité, réalisée à partir des critères de choix essentiels, est donnée sur le tableau 6 suivant.

METHODES DE TRAITEMENT		Inspection visuelle	Surveillance instrumentée	Consolidation des cavités	Remblayage direct par le fond	Remblayage partiel	Remblayage voie sèche ou semi-humide	Remblayage hydraulique	Injections de mortiers ou coulis	Terrassement comblement	Foudroyage par le fond	Pilonnage intensif
Exigence de conservation des cavités	Oui											
	Aucune											
Accessibilité	Oui											
	Non											
Superficie de la zone à traiter	< 3 ha											
	> 3 ha											
Volume ou dimensions des cavités	Faible											
	Importante											
Profondeur	< 15 m											
	15-40 m											
	40-80 m											
	> 80 m											
Type de site et environnement	Urbain											
	Naturel											
Adaptation au niveau de prévention exigé pour des sites donnés	Naturel											
	Urbanisé											
	Urbanisation											
Hygiène et sécurité du personnel												
Nuisances sur l'environnement												
Coûts indicatifs en Euros par m3	10-20											
	20-40											
	40-75											
	75-150											
	150-300											
Bonne adaptation de la méthode au domaine												
Adaptation avec précautions ou travaux complémentaires (Ex : injections de clavage ou des terrains décomprimés, renforcement du bâti, etc.)												
Inadaptation de la méthode au critère												
Sans objet												

Tableau n° 6 : Analyse comparative des méthodes de traitement établie par domaines d'utilisation

10.1 LES OBJECTIFS A ATTEINDRE

Le choix du meilleur traitement, adapté un contexte donné, doit correspondre à des objectifs précis de mise en sécurité qui peuvent être de nature différente, par exemple :

- la menace d'un péril imminent. L'on cherchera en fonction du contexte (zones rurales, zones urbanisées) à prendre les mesures de prévention nécessaires les plus simples et les plus rapides qui s'imposent en premier ressort ;
- la destination du site et les projets qui sont envisagés sur ce site. On distinguera plus particulièrement :
 - la nécessité ou non de conserver les cavités souterraines ouvertes (dans le cadre d'un projet d'aménagement ouvert au public, comme un musée des carrières ou tout autre établissement à caractère troglodytique) ;
 - la réhabilitation des terrains sous-minés dans le cadre d'un projet de valorisation des espaces naturels (zones de loisirs, parcs, espaces verts, etc.) ou d'aménagement à des fins d'urbanisation. Pour les cavités souterraines ne présentant pas l'intérêt d'être conservées ouvertes, les seuls objectifs seront alors de combler simplement les cavités pour éliminer les risques vis-à-vis des populations, ou au contraire de combler totalement et définitivement tous les vides par des traitements de consolidation (remblais cimentés, injections des terrains décomprimés) pour la réalisation d'ouvrages neufs importants en surface.

10.2 LES DOMAINES D'UTILISATION

Chaque technique s'avère utilisable dans un domaine d'application plus ou moins étendu mais jamais dans toutes les configurations de site. Plusieurs facteurs déterminants contribuent à définir le champ d'application du traitement et la sélection de la ou des techniques opérables dans ce cadre.

Accessibilité

La première question essentielle est de connaître les conditions d'accessibilité du site souterrain. Comme nous l'avons vu précédemment, l'accessibilité repose sur la concordance de trois conditions fondamentales :

- pouvoir accéder au fond par des galeries d'accès ou des puits, réalisés et praticables ou même potentiellement réalisables (réouverture du site) ;
- pouvoir évoluer dans un espace souterrain de dimensions suffisantes que ce soit pour circuler librement à pied (surveillance) ou pour procéder à des travaux au fond avec des engins mécanisés encombrants (remblaiement direct, ou opérations de confortement des cavités, etc.) ;
- opérer les travaux dans des conditions d'hygiène et de sécurité suffisamment bonnes.

Ces conditions impliquent une certaine stabilité des «ouvrages» souterrains (toit, piliers, galeries), sans risque de chutes de blocs issus du toit ou des parements, mais aussi une ventilation convenable pour assurer une atmosphère salubre dans l'ensemble des chantiers souterrains (quartiers).

Tout naturellement, l'inaccessibilité au site souterrain interdit donc d'emblée, les méthodes de prévention par visites et inspection visuelle, par surveillance instrumentée, ainsi que les techniques de traitement depuis le fond par renforcement (boulonnage, piliers artificiels, béton projeté, etc.) ou remblaiement direct par engins mécanisés. L'inaccessibilité ne laisse donc place qu'à des solutions de traitement opérables depuis la surface (remblaiement gravitaire, injections, terrassement-comblement, ou foudroyage).

On ne doit toutefois pas omettre la possibilité de foncer un puits d'accès dans les cas où l'enjeu le justifie.

Superficie et volume des vides à traiter

Pour diverses raisons d'opérabilité (travail en hauteur, effet de taille du chantier, etc.), certaines techniques comme la surveillance instrumentée et le traitement par renforcement des ouvrages (confortation du fond) ne sont plus opérationnelles (pratiquement et économiquement) dès lors que la dimension des cavités et leur extension spatiale dépassent une certaine limite variable avec les configurations de site. Ces techniques deviennent ainsi difficiles à mettre en œuvre au-delà de plusieurs hectares et lorsque les dimensions des ouvrages souterrains se montrent importantes (hauteur entre toit et mur supérieure à 5 ou 6 mètres, par exemple).

Hauteur du recouvrement (profondeur)

Dans les sites souterrains inaccessibles, la hauteur du recouvrement contribue, toutes choses égales par ailleurs, un paramètre fondamental du choix des méthodes de traitement depuis la surface.

Certaines méthodes ne sont adaptées qu'à des conditions de faible recouvrement (subsurface) comme le terrassement-comblement ou le pilonnage intensif.

D'autre part, les techniques de remblaiement par déversement gravitaire (voie sèche ou semi-humide), ne sont adaptées qu'à de faibles ou moyennes profondeurs (jusqu'à 30 ou 40 m) pour des raisons de foration (diamètre, tubage, etc.).

Par contre, les techniques de comblement par remblayage hydraulique ou par injection gravitaire, opérées en forages petits diamètres et systématiquement avec tubage, sont utilisables jusqu'à des profondeurs importantes de plus de 70 ou 80 m.

Indépendamment de la profondeur, les conditions d'opérabilité sont évidemment fonction de la nature des terrains constituant le recouvrement (roches ou terrains sans cohésion, à caractère pulvérulent, ou fluant, etc.) et de la présence de niveaux aquifères.

Conditions opératoires en zones urbanisées

Les techniques de remblaiement depuis la surface sont évidemment plus difficiles à réaliser en zones urbanisées qu'en zones naturelles. Les méthodes destructives comme le terrassement-comblement, le pilonnage ou le foudroyage sont, elles, totalement à proscrire.

Utilisation en milieu agressif

On entend par milieu agressif, un milieu, ou un massif rocheux, constitué, par exemple, de roches salines ou évaporites (tels le gypse et l'anhydrite, le sel gemme ou les sels potassico-magnésiens) qui développe une action fortement corrosive sur les matériaux courants ferreux (boulons, cintres, grillage, treillis, cerclage, etc.) et d'altération chimique sur les produits cimentés, mortiers et coulis. La présence de venues d'eaux acides, en particulier les eaux séléniteuses (massif rocheux contenant des formations gypseuses), provoque les mêmes phénomènes de corrosion et d'altération chimique.

10.3 LE NIVEAU DE SECURITE ADMISSIBLE

Le mode de traitement du site dépend également fondamentalement du niveau de mise en sécurité que l'on recherche compte tenu de la destination des terrains (tableau 7).

Dans le cas de la mise en **sécurité des populations** dans les **zones dites naturelles** (espaces verts, zones de loisirs) par opposition aux zones urbanisées, il s'agit d'éliminer tout risque d'effondrement plus ou moins brutal susceptible de mettre en péril les personnes. On peut néanmoins considérer de légers affaissements (centimétriques ou

décimétriques) ou tassements différés (à long terme), comme inoffensifs et les tolérer pour le niveau de sécurité minimal. Un simple remplissage des vides peut alors suffire pour limiter tout risque majeur en surface. Les méthodes de remblaiement total, voire partiel, les plus simples (direct par le fond, ou par déversement gravitaire) peuvent convenir à cet effet après une étude préalable de reconnaissance du site.

DESTINATIONS		ZONES NATURELLES	ZONES URBANISEES		PROJET D'URBANISATION	
		Espaces verts	Voies publiques, routes et réseaux divers	Bâti existant	Constructions nouvelles	Constructions nouvelles importantes
CRITERES DE SITE						
CARRIERES ACCESSIBLES PAR LE FOND		Inspection/surveillance et/ou Consolidation ou Remblaiement direct depuis le fond (ou autre remblayage)	Inspection/surveillance et/ou Consolidation ou Remblaiement direct depuis le fond (ou autre remblayage) et adaptation éventuelle des réseaux	Inspection/surveillance et/ou Consolidation ou Remblaiement direct depuis le fond (ou autre remblayage) et éventuel clavage	Consolidation ou Remblaiement direct depuis le fond (ou autre remblayage) avec clavage et/ou renforcement structures	Consolidation ou Remblaiement direct depuis le fond (ou autre remblayage) avec clavage et/ou renforcement structures ou fondations profondes et remplissage des vides
CARRIERES INACCESSIBLES	HR < 35 m	Déversement gravitaire voie sèche ou humide ou Remblayage hydraulique	Déversement gravitaire par voie humide ou Remblayage hydraulique et adaptation éventuelle des réseaux	Déversement gravitaire par voie humide ou Remblayage hydraulique et éventuel clavage	Déversement gravitaire par voie humide ou Remblayage hydraulique avec clavage et/ou renforcement structures ou fondations adaptées	Déversement gravitaire par voie humide ou Remblayage hydraulique avec clavage et/ou renforcement structures ou fondations profondes et remplissage des vides
	HR > 35 m	Remblayage hydraulique	Remblayage hydraulique et adaptation éventuelle des réseaux	Remblayage hydraulique et éventuel clavage	Remblayage hydraulique avec clavage et/ou renforcement structures ou fondations adaptées ou Injection de coulis (renforcement éventuel de structure)	Remblayage hydraulique avec clavage et/ou renforcement structures ou Injection de coulis et fondations adaptées ou fondations profondes et remplissage des vides
	Avec zones effondrées ou terrains décomprimés (fontis)	Remblayage hydraulique ou éventuellement Déversement gravitaire voie humide	Remblayage hydraulique ou éventuellement Déversement gravitaire voie humide et adaptation éventuelle des réseaux	Remblayage hydraulique (avec clavage) ou Injection de coulis	Remblayage hydraulique avec clavage et/ou renforcement structures ou Injection de coulis et de consolidation (renforcement éventuel de structure)	Remblayage hydraulique avec clavage et/ou renforcement structures ou Injection de coulis et de consolidation (fondations adaptées) ou fondations profondes et remplissage des vides
CAVITES NATURELLEMENT EFFONDREES OU EFFONDREES PAR AFFAISSEMENT DIRIGE		Etude de sol et Reconnaissance de vides résiduels potentiels	Etude de sol et Adaptation des réseaux	Etude de sol et Injection de coulis de consolidation (travaux éventuels de reprise en sous-œuvre) ou fondations profondes	Etude de sol et Injection de coulis de consolidation (renforcement éventuel de structure) ou fondations profondes et remplissage des vides	Etude de sol et Injection de coulis de consolidation (renforcement éventuel de structure) ou fondations profondes et remplissage des vides

Tableau n° 7 : Choix des solutions minimales de traitement en fonction de la destination des sites (Classification purement indicative, chaque cas devant faire l'objet d'une étude spécifique)

Dans le cas des **zones urbanisées**, la protection du bâti existant, des voies publiques ou des réseaux impose un niveau de sécurité plus élevé. Il s'agit de limiter les tassements

différés en surface pour empêcher les risques de dégâts sur les structures, superficielles ou enterrées. Les traitements adaptés feront alors appel à des techniques de remblaiement total (par le fond, par déversement gravitaire, ou par remblayage hydraulique) complété, si besoin, par des injections de clavage. Dans certains cas, il faudra compléter ce travail par des mesures de protection des voiries, des réseaux, canalisations et parfois des bâtiments existants par des mesures de protection passive (adaptation des réseaux, renforcement des structures, reprises en sous-œuvre).

Pour les constructions nouvelles, les mesures de protection sont beaucoup plus draconiennes. Il faut éliminer tout risque de tassement, même minime, par la restitution d'une portance suffisante au sol ou édifier le bâtiment sur des fondations profondes reposant sur un horizon favorable en dessous des cavités (le plus souvent remblayées). On pourra procéder également à un comblement des cavités par des techniques conventionnelles (remblaiement direct, déversement gravitaire ou remblayage hydraulique) complétées, le plus souvent, par des injections de clavage. On peut également envisager un remplissage systématique des vides par des injections de mortier ou de coulis. On peut encore procéder à la suppression des cavités à l'aide de techniques destructives (terrassment, foudroyage...) avec comblement et compactage final. Dans la plupart des cas, le traitement sera complété par des mesures de renforcement de structures adaptées ou encore par la réalisation de fondations profondes.

Le choix entre les différentes techniques dépendra des configurations de site (domaines d'application) et des options technico-économiques prises par le maître d'ouvrage et le maître d'œuvre.

10.4 ASPECTS TECHNIQUES

Lorsque plusieurs méthodes restent encore envisageables, une nouvelle sélection est établie à partir de considérations d'ordre purement pratique et technique, en analysant comparativement les avantages et inconvénients qui en découlent.

Compte tenu des **objectifs fixés**, il s'agit ainsi de déterminer, toutes choses égales par ailleurs, la méthode la plus **facile de mise en œuvre**, la moins exigeante sur le plan technologique (opérations de foration, approvisionnement et préparation des produits, moyens nécessaires à la mise en place, reconnaissances préliminaires et contrôles, etc.), la plus **performante** (capacité de remplissage des vides, rapidité, rendement, etc.), la plus **fiable** ou la plus **pérenne**.

Le choix doit être fait selon des critères purement technico-économiques adaptés à l'environnement du site (au sens large du terme). La recherche systématique de la performance ou de l'efficacité, sans considération du contexte, peut s'avérer finalement inadaptée car inutile et aboutir rapidement à un échec sur le plan économique.

Par ailleurs, Il faut considérer les **conditions générales d'hygiène et de sécurité** du personnel (cas du remblaiement direct par le fond en particulier) tout comme les **incidences de la technique sur l'environnement** (transport des produits, bruit, poussières, vibrations, modification du régime hydrologique du site, pollutions de toute nature, etc.).

10.5 ASPECTS ECONOMIQUES

C'est finalement le coût prévisionnel des travaux qui constitue le paramètre déterminant du choix de la méthode retenue. Cette dernière est généralement la plus simple sur les plans technique et pratique et donc la moins onéreuse sur le plan économique.

11. BIBLIOGRAPHIE

- AFTES. – *Recommandations : Choix du soutènement en galerie - Tunnels et ouvrages souterrains*, n° 1, 1974.
- AFTES. – *Recommandations : Emploi des cintres en travaux souterrains - Tunnels et ouvrages souterrains*, n° 27, 1978.
- AFTES. – *Recommandations : Condition d'emploi du boulonnage - Tunnels et ouvrages souterrains*, n° 31, 1979.
- AFTES. – *Recommandations : Conception et dimensionnement du béton projeté utilisé en travaux souterrains - Tunnels et ouvrages souterrains*, n° 81, 1987 et n° 164, 2001.
- AFTES. – *Recommandations : Béton projeté renforcé de fibres : technologie et mise en œuvre - Tunnels et ouvrages souterrains*, n° 126, 1994.
- AFTES. – *Recommandations : Conception et dimensionnement du boulonnage - Tunnels et ouvrages souterrains*, (à paraître).
- AFTES. - *Groupe de travail sur les injections - Tunnels et ouvrages souterrains*, n° 164, mars/avril 2001, pages 68 - 89.
- AUBERT J. - *Contrôle télévisuel des injections de remplissage des anciennes galeries de gypse*. Bull. liaison Labo. P. et Ch., n° 134, Nov.-Déc. 1984, pages 83-85.
- BERTRAND L., BONVALLET J., BOTH J., FEUGA B., WOJTKOWIAK F. - *Etude de l'influence d'un trafic routier de fort tonnage sur la stabilité de carrières souterraines abandonnées en Gironde. Détermination du confortement à mettre en œuvre*. Revue Ind. Minérale, juin 1982, pages 357-370.
- BONVALLET J. - *Techniques de confortement - Perspectives nouvelles*. Troisième journée SDICSA, juin 1984, pages 1-18.
- BOUTITIE J., MEYER J. - *Traitement des terrains*. Tiré de l'ouvrage de Filliat : La pratique des sols et fondations, Ed. du Moniteur, chap., pages 735-785, 1981.
- BURGUN D., DE GUILLEBON B. - *Béton projeté renforcé de fibres de fonte - Application à la réhabilitation d'un collecteur d'assainissement à Nancy* - Extrait de Techniques Sciences Méthodes, 82ème année, n° 1, janvier 1987, pages 1-3.
- CAMELAN J-C. - *Remblaiement des carrières souterraines en région parisienne*. Mines et Carrières - Ind. Minérale, juillet 1994, pages 76-78.
- COLLET T., MASROURI F., DIDIER C. – *Remblayage partiel des carrières souterraines*. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Nancy 2002, pages 1-8.
- COLLET T., MASROURI F., DIDIER C. – *Modélisation de l'influence du remblayage partiel des carrières souterraines*. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur, Lille 2004, pages 331-337.
- DEJEAN M., SCHWARTZMANN R. - *Les excavations souterraines à faible profondeur - Cinq ans d'expérience dans l'évolution et la surveillance de la stabilité*. Assoc. belge des Techniques et de l'Urbanisme souterrain, Bruxelles, 1980, pages 219-235.
- DEJEAN M., SCHWARTZMANN R. - *Stabilité des carrières souterraines abandonnées et réutilisation des sites* - Rapport final - CERCHAR, octobre 1980, pages 1-17.
- DELANNOY C., DRAGON R., SAUDRE I., OLIVIER J., VALON R., BERGERON P., BISSERY P. – *Déviations de MEAUX : des cendres volantes humides pour combler des carrières* - . Revue de l'Industrie minérale, juin 2002, pages 21 – 24.

- DELPORTE R., DHONT C., BIVERT B., SCHWARTZMANN R. - *Mesure - Contrôle/Télé-surveillance des carrières souterraines* - Extrait du Moniteur des B.T.P., n° 50, décembre 1987, pages 175-177.
- DESFORGES M. - *Comblement des carrières* - Stage ENPC «Vivre avec les carrières souterraines», octobre 1988, pages 1-35.
- DUFFAUT P. - *Stabilité des carrières souterraines* - Tiré de l'ouvrage de Filliat : La pratique des sols et fondations, 1981, chap. 18, pages 789-823.
- DURVILLE J-L., HAMEROUX M. - *Stratégies et méthodes de prévention* - Séminaire sur les carrières souterraines abandonnées de Nainville-les-Roches des 8, 9, 10 décembre 1993, Bull. AIGI n° 51, pages 113-127.
- ELLSTEIN R.A. - *Heading failure of lined tunnels in soft soils*. Tunnels & Tunnelling, juin 1986, vol. 18, n° 6, pages 51-54.
- GLORIES P., DEJEAN M. - *Télé-surveillance des ouvrages de génie civil et miniers - Mise au point et essais du dispositif CERCHAR à la mine de Rochovillers*. Revue Ind. Minérale - Les Techniques, mars 1983, pages 131-137.
- GUERIN A. - *Travaux de consolidation de carrières sous l'emprise de l'autoroute H6* - Travaux, urbanisme, voirie, services annexes, mars 1972.
- GUIDE METHODOLOGIQUE PER - *Mesures de prévention - Mouvements de terrain* - La Documentation Française - Ministère de l'Environnement, 1987, 529 p.
- GUIDE METHODOLOGIQUE - *Plans de Prévention des risques naturels (PPR) - « Risques de mouvements de terrain »*. La Documentation Française, 1999, 71 pages.
- GUIDE METHODOLOGIQUE - *Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines* - . Collection Environnement – Les risques naturels. Editions du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 2002, 130 pages.
- HASAN S.E. - *Some problems in the use of land over abandoned mines in Kansas City, USA* - Colloque «Cities and subsurface Use», Bordeaux, octobre 1987, pages 425-430.
- HATON DE LA GOUPILLIERE - Cours d'exploitation des Mines, 3ème éd., Dunod Ed., 1920, 1002 pages.
- HAZA E., KHAY M. – Zone de cavités souterraines : le renforcement par géosynthétique prévient le risque d'effondrement localisé. Actes du Séminaire INERIS – LCPC du 11 mai 2005, pages 257-266. Edition LCPC.
- LE PAS DE SÉCHEVAL H. - *L'inspection générale des carrières* - Mines et Carrières - Ind. Minérale, juillet 1994, pages 48-49.
- HILL III J-L. - *Cutter Roof Failure : An Overview of the Causes and Methods for Control* - Bureau of Mines Information Circular (U.S. Department of the interior), 1986, pages 1-27.
- JOSIEN J-P. - *Surveillance de la stabilité d'une excavation par des mesures de déformation - Choix d'une méthode d'alarme* - Annales des Mines, mars 1977, pages 1-12.
- JOSIEN J-P., SCHWARTZMANN R. - *Aménagement des anciennes cavités : traiter ou surveiller ?* - Annales des Mines, octobre 1987, pages 23-27.
- JOURDAN G. - *Remblai des Carrières d'Issy-les-Moulineaux et Clamart* - Travaux, n° 374, mars 1966, pages 298-303.
- KEMPTON G. T. - *The use of reinforcement geotextiles to support road embankments over areas subjected to mining subsidence*. Highways and transportation, 1992, pages 21-31.
- KRATZSCH H. - *Surface Fracture over Shallow Workings*, 1983, pages 56-58.

LAGABRIELLE R. - *La détection des cavités souterraines* - Notes et Informations Techniques - Bull. liaison Labo. P. et Ch., mai-juin 1994, pages 91-92.

LECLERC P. - *Le franchissement des anciennes carrières de gypse de la butte de Montzaigle par l'autoroute A 104*. Revue générale des routes et des aérodromes, n° 620, juin 1985, pages 19-26.

LEGRAND M. - *Collectivités territoriales et utilisation du sous-sol* - Colloque Internat. Assoc. Française des Travaux Souterrains, Bordeaux, 21-23/10/87, Edit. A.A. BALKEMA, Rotterdam, 1988.

LOUIS C. - *Texte provisoire des recommandations sur les conditions d'emploi du boulonnage* - A.F.T.E.S. - groupes de travail 6 et 7, 1987, pages 22-27.

MONOT G. - *L'Inspection Générale des Carrières et les confortements du sous-sol* - Colloque «Connaître le sous-sol», Lyon, mars 1979, pages 825-839 et Revue des Tunnels et ouvrages souterrains.

MONNOT G. - *L'Inspection Générale des Carrières de Paris et les confortements du sous-sol* - Tunnels et ouvrages souterrains, n° 26, 1978, pages 85-96.

NOTICE TECHNIQUE de l'Inspection Générale des Carrières de Paris - Injection gravitaire, clavage et traitement des fontis, préalables à la mise en œuvre de fondations profondes, de type pieux ou micropieux de type supérieur ou égal à II, en zone sous-minée par d'anciennes carrières souterraines ou à ciel ouvert, 13 pages, 6 janvier 2003.

NOTICE TECHNIQUE de l'Inspection Générale des Carrières de Paris - Travaux d'injection des anomalies liées à la dissolution du gypse antéludien, 13 pages, 10 janvier 2003.

NOTICE TECHNIQUE de l'Inspection Générale des Carrières de Paris - *Travaux de consolidations souterraines exécutés par injection pour les carrières de Calcaire Grossier, de gypse, de craie et les marnières*, 12 pages, 16 janvier 2003.

NOTICE TECHNIQUE de l'Inspection Générale des Carrières de Paris - *Travaux de consolidations souterraines exécutées par piliers maçonnés dans les carrières de calcaire grossier situées en région parisienne*, 23 pages, 15 juillet 2004.

PENG S.S. - *Roof bolting problems in weak roof* - Mining Engineering, juillet 1994, pages 652-653.

PERA J. - *Rôle de l'adhérence du béton projeté sur son support* - Tunnels et ouvrages souterrains, n° 68, mars-avril 1985, pages 51-57.

RINGWALD J-P., BRAUNER C.O. - *Reinforcing concrete model pillars with grouted rock bolts* - Mining Science and Technology, 1989, pages 31-47.

SAMUEL - LAJEUNESSE R. - *Les problèmes de construction sur les anciennes carrières de la région parisienne* - Le Moniteur des T. P. et du Bâtiment, n° 11, mars 1965, pages 19-33.

SCHWARTZMANN R. - *Stabilité des carrières souterraines - Evaluation des coûts d'un éventuel confortement d'une carrière par renforcement des piliers* - CERCHAR, novembre 1975, pages 1-16.

SCHWARTZMANN R. - *Surveillance et analyse de l'évolution des fractures affectant des monuments historiques* - Le Moniteur des T.P. et du bâtiment, n° 31, août 1980, pages 39-41.

SCHWARTZMANN R., BIVERT B. - *Surveillance des carrières souterraines abandonnées par des mesures de déformation* - Revue Ind. Minérale - Mines et Carrières - Les Techniques, août-septembre 1986, pages 293-303.

SCHWARTZMANN R., BIVERT B., DELPORTE R. - *Comportement des cavités souterraines dans la craie - Application à la surveillance des carrières* - . Rapport CERCHAR, 1989, pages 1-20.

SCHWARTZMANN R., FEUGA B. - *La sécurité des anciennes carrières souterraines* Revue Ind. Minérale - Mines et Carrières, février 1989, pages 17-23.

SEMOFI - *Catalogue*.

SIWAK J-M. - *Carrières de craie du Nord de la France - Comportement des piliers et confortation par gunitage* - Thèse de 3ème cycle U.S.T. de Lille, mars 1984.

TEXIER P. - *Les contraintes techniques des sols sous-minés* - Ingénieurs des villes de France, janvier 1976, pages 55-57.

TRITSCH J-J. - *Dispositif de télésurveillance du soutènement des voies larges* - Etude financée par la CECA, mars 1991.

VIDAL V. - *Foudroyage dans l'exploitation de gypse de Port-Maron* - Extrait «Annales des Mines», décembre 1964, pages 823-845 - XII.

VILLARD P., GOURC J-P., BLIVET J-C. – *Prévention des risques d'effondrement de surface liés à la présence de cavités souterraines : une solution de renforcement par géosynthétique des remblais routiers et ferroviaires* - , Revue Française de Géotechnique, n° 99, 2002, pages 23 – 34.

WELSH J-H. - *Computerize, Remote Monitoring Systems for Underground Coal Mines* Bureau of Mines Information Circular (U.S. Department of the interior), 1983, pages 1-11.

WOJTKOWIAK F., RAI M.A., BONVALLET J. - *Etudes expérimentales en laboratoire de différentes méthodes de renforcement des petits piliers de mine* - Bull. de l'Assoc. Internationale de Géologie de l'Ingénieur, n° 32, Paris, 1985, pages 131-138.

WICKERSHEIMER, WEISS - *Notice sur la consolidation des anciennes carrières sous le tracé des lignes métropolitaines dans l'enceinte de Paris* - Annales des Mines, dixième série, Mémoires, tome III, Paris, 1903, pages 587-609.

12. LISTE DES ANNEXES

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe 1	Fiches synthétiques des principales méthodes de traitement : 1. Inspection par examen visuel 2. Surveillance instrumentée 3. Renforcement des ouvrages 4. Remblayage partiel 5. Remblaiement direct depuis le fond par engins mécanisés 6. Remblaiement par déversement gravitaire - Voie sèche 7. Remblaiement par déversement gravitaire - Voie semi-humide 8. Remblayage hydraulique 9. Remplissage et traitement par injections 10. Remplissage par mousses thermodurcissables 11. Terrassement - Comblement	19 pages A4
Annexe 2	Glossaire	4 pages A4

Fiches synthétiques des principales méthodes de traitement

Sommaire

1	Inspection par examen visuel
2	Surveillance instrumentée
3	Renforcement des ouvrages
4	Remblayage partiel
5	Remblaiement direct depuis le fond par engins mécanisés
6	Remblaiement par déversement gravitaire - Voie sèche
7	Remblaiement par déversement gravitaire - Voie semi-humide
8	Remblayage hydraulique
9	Remplissage et traitement par injections
10	Remplissage par mousses thermodurcissables
11	Terrassement - Comblement

Inspection par examen visuel

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

Surveillance instrumentée

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

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

Renforcement des ouvrages

Rôle	<ul style="list-style-type: none">□ Améliorer les conditions de stabilité locales d'un site souterrain□ Maintenir le site souterrain ouvert, dans de bonnes conditions de sécurité□ Eviter le remblaiement systématique□ Mise en sécurité des terrains de surface (Espaces verts, voirie, bâti existant)
Principe	<ul style="list-style-type: none">□ Augmenter la portance (piliers)□ Améliorer la solidarisation entre bancs (toit)□ Assurer un revêtement protecteur (parements et toit)□ Améliorer la cohésion par confinement (piliers et galeries)
Techniques	<ul style="list-style-type: none">□ Adaptation de techniques différentes à des traitements spécifiques, en fonction de :<ul style="list-style-type: none">▪ la nature des ouvrages (piliers, toit, mur, galerie d'accès, etc.)▪ l'état des ouvrages (écaillage, épaufrure, fracturation, rupture, etc.)□ Traitement du toit et des galeries par :<ul style="list-style-type: none">▪ boulonnage (soutien, confinement, renforcement)<ul style="list-style-type: none">▫ ancrage ponctuel mécanique▫ ancrage réparti avec scellement à la résine▪ soutènements porteurs en galeries<ul style="list-style-type: none">▫ maçonnerie▫ cadres▫ revêtements bétonnés (béton projeté ou béton coffré)▪ soutènement des têtes de catiches par dalle bétonnée□ Traitement des piliers<ul style="list-style-type: none">▪ injections de consolidation▪ boulonnage des parements▪ projection de béton ou résine▪ ceinturage - cerclage□ Edification de piliers artificiels□ Maçonnerie<ul style="list-style-type: none">▪ piliers bétonnés coffrés et clavés▪ piliers bétonnés depuis la surface▪ piliers injectés par coulis à rigidification rapide
Domaines d'utilisation	<ul style="list-style-type: none">□ Carrières accessibles non dangereuses□ Nécessité de maintenir l'ouverture des ouvrages□ Traitement local, ampleur limitée des travaux□ Techniques opérables indépendamment de la profondeur et de la nature des terrains de couverture
Performances	<ul style="list-style-type: none">□ Renforcement local des ouvrages souterrains pouvant être extrêmement important en fonctionnement des matériaux et produits utilisés (boulons, tirants, cadres, grillage, treillis, béton, maçonnerie, etc.), et de leur dimensionnement (densité à la pose, longueur, épaisseur, etc.)
Niveau de sécurité	<ul style="list-style-type: none">□ Faible à élevé en fonction de la destination du site (calculs de dimensionnement)

Exigences de la technique	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Certaines techniques exigent un matériel de pose important (engins mécanisés), du personnel compétent (boulonnage, béton projeté, etc.) et des spécialistes pour les calculs de dimensionnement du soutènement
Pérennité	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Dans l'ensemble plutôt faible pour les techniques utilisant des métaux (fonte, acier, etc.), surtout en milieu agressif (sel, gypse). En présence d'eaux séléniteuses (gypse), le béton projeté subit également des altérations géochimiques. La durée de vie des cadres et des boulons serait en moyenne d'une trentaine d'années en conditions normales (mines et carrières non salines)
Contrôle	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Techniques exigeant de nombreux contrôles : à la réception (contrôle qualité des matériaux et produits), à la pose (essais de traction sur boulons, etc.) ou après pose (essais de résistance des bétons projetés ou coulis)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Conservation ou réaménagement des sites (parkings, stockages, musées, abris, ERP, etc.) ❑ Eviter à moindres frais l'exécution de fondations profondes ❑ Techniques minimisant les nuisances sur l'environnement
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Inutilisable avec un trop mauvais état des ouvrages ❑ Difficile ou non pérenne en milieu agressif ❑ Pérennité du matériel (boulons, aciers, bétons, etc.) à long terme ❑ Opérations parfois dangereuses (purgeage, foration, etc.) ❑ Non préconisé pour la construction de bâtiments nouveaux importants ❑ Compétences « techniques minières » exigées ❑ Contrôle a posteriori des travaux ❑ Coût économique souvent prohibitif
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Boulonnage = 45 à 100 €/m² ou 1 500 à 5 000 €/pilier ❑ Grillage et revêtement béton (5 cm) = 40 à 60 €/m² ❑ Revêtement maçonné en galerie = 800 € à 2 500 €/ml ❑ Cadre = 500 à 1000 €/m² ❑ Revêtement en béton projeté (10-15 cm) sur pilier = 80 à 100 €/m² ❑ Ceinturage bétonné (50 cm) des piliers = 10 000 à 15 000 €/pilier ❑ Pilier artificiel = 250 à 400 €/m³ ❑ Coût moyen consolidations maçonnées à Paris de l'ordre de 180 €/m² de terrain traité en surface, soit 1,8 M€/ha ❑ Site de Charente : 350 à 550 k€/ha (carrière facile en bon état)
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Recommandations AFTES : condition d'emploi du boulonnage, 1979 ❑ Recommandations AFTES : conception et dimensionnement du boulonnage (à paraître) ❑ Recommandations AFTES : conception et dimensionnement du béton projeté, 2001 ❑ Recommandations AFTES : emploi des cintres en travaux souterrains, 1978 ❑ Recommandations AFTES : béton projeté et boulonnage, 1979 ❑ Recommandations Traitement des cavités souterraines, Annales de l'ITBTP, 1979 ❑ Notice technique relative aux travaux de consolidation par piliers maçonnés dans les carrières de calcaire grossier situées en région parisienne, Inspection Générale des Carrières (nouvelle version à paraître)

Remblayage partiel

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

Remblaiement depuis le fond par engins mécanisés

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

Inconvénients	<ul style="list-style-type: none">❑ Conditions de site favorables (accès suffisants)❑ Inopérables en carrières de petites dimensions (ouverture, largeur)❑ Difficile pour des géométries complexes❑ Conditions de travail pénibles et dangereuses
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none">❑ Sur chantiers importants, les coûts oscillent entre 20 à 50 €/m³❑ Pour les ouvrages plus complexes = jusqu'à 50 à 80 €/m³❑ Injections de clavage complémentaires = 120 à 180 €/m³ (sur la base 80 % avec 20 % de clavage)
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none">❑ Recommandations pour le traitement des cavités souterraines. Annales de l'ITBTP, 1979

Remblaiement par déversement gravitaire (voie sèche)

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

Avantages	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Méthode efficace et pérenne ❑ Coût économique intéressant pour les fortes profondeurs (> 30 m) ❑ Mise en oeuvre relativement aisée
Limites et Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Profondeur limitée ❑ Foration en gros diamètre ❑ Mauvaise dispersion des remblais ❑ Caractéristiques médiocres des remblais ❑ Tassement des remblais avec le temps (nécessitant souvent une reprise ultérieure du remblaiement)
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Les coûts économiques de ces techniques de remblaiement sont extrêmement variables en fonction de facteurs liés au matériau et aux conditions de foration. <ul style="list-style-type: none"> ▪ chantier importants à profondeur moyenne = 14 à 22 €/m³ ▪ petits chantiers difficiles = 50 à 85 €/m³ ❑ Traitement complémentaire par injections de clavage = 100 à 180 €/m³.
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Recommandations sur le traitement des cavités souterraines, Annales de l'ITBTP, 1979

Remblaiement par déversement gravitaire (voie semi-humide)

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

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

Remblayage hydraulique

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

Avantages	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Méthode efficace et pérenne ❑ Coût économique intéressant pour les fortes profondeurs (> 40 m) ❑ Mise en oeuvre relativement aisée ❑ Relative universalité d'utilisation, adaptabilité des techniques ❑ Remplissage presque total des vides (sauf technique par voie sèche) par la bonne pénétration des mélanges hydrauliques
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Présence de grandes quantités d'eau ❑ Mise en oeuvre progressive par phases (essorage des remblais) ❑ Caractéristiques médiocres des remblais (sans addition de liant hydraulique) ❑ Dégradation possible des ouvrages souterrains (remblayage hydraulique) ❑ Tassements des remblais très importants, et durée très longue de consolidation (plusieurs mois) ❑ Utilisation locale possible derrière des « barrages » de remblais
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Les coûts économiques de ces techniques de remblaiement sont extrêmement variables en fonction de facteurs liés au matériau et aux conditions de foration ❑ Remblayage hydraulique (sans clavage) = 25 à 70 €/m³ ❑ Injections complémentaires de clavage = 120 à 180 €/m³
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Pas de recommandations spécifiques ❑ Recommandations générales sur le traitement des cavités souterraines, Annales de l'ITBTP, 1979

Remplissage et traitement par injection

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

Performances	<ul style="list-style-type: none"> □ Comblement total des vides avec clavage et traitement des zones effondrées, décomprimées, etc. □ Consolidation efficace du sous-sol, exemples de résistances moyennes (28 jours) : <ul style="list-style-type: none"> ▪ mortiers de remplissage = 1 à 2 MPa (espaces verts, voies publiques, bâti existant) ▪ coulis de clavage = 2 à 3 MPa (bâti existant, constructions légères nouvelles) ▪ coulis pour terrains décomprimés = 3 MPa (constructions nouvelles importantes)
Niveau de sécurité	<ul style="list-style-type: none"> □ Maximal, il s'agit d'un traitement définitif et complet des vides avec consolidation □ Tassements résiduels en surface considérés comme négligeables □ Protection active du bâti existant et des constructions nouvelles □ Complément éventuel de traitement des structures en surface par techniques de protection passive
Pérennité	<ul style="list-style-type: none"> □ Pérennité suffisamment bonne du traitement, toutefois les produits cimentés peuvent présenter à terme des problèmes d'altération en présence d'agents agressifs (eaux séléniteuses en particulier)
Contrôles	<ul style="list-style-type: none"> □ Technique imposant des contrôles délicats à tous les niveaux : <ul style="list-style-type: none"> ▪ réception et préparation des mortiers et coulis ▪ contrôles à la mise en place (centrale d'injection) ▪ contrôles des produits après remblaiement (contrôle qualité) □ Importance des campagnes de reconnaissance préliminaire et après injection (sondages avec diagraphies, essais pressiométriques, essais de perméabilité)
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> □ Méthodes très efficaces et sûres réduisant pratiquement totalement tout risque de dégâts mineurs □ Traitement assurant une pérennité suffisante □ Opérabilité sur tous types de site, même difficiles (profondeur, aquifère, etc.)
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> □ Techniques complexes, longues et coûteuses (foration, paramètres de la centrale...) □ Exigence d'un personnel compétent □ Nécessité de reconnaissances préliminaires développées et de contrôles rigoureux pendant et après la mise en place □ Possibilité de risque de dégâts sur des ouvrages ou structures voisins par fuite des coulis, hautement pénétrants, ou par trop forte pression d'injection □ Risque de perturbation du régime hydrologique du site par effet « barrage » □ Risques de pollutions du milieu par les produits □ Pérennité des produits non garantie à long terme (les propriétés de résistance du milieu sont un impératif de la méthode et ne doivent pas être perturbées par des agents externes agressifs)
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> □ Les coûts dépendent essentiellement de la qualité des mortiers et coulis choisis, ainsi que des paramètres de foration (profondeur, type de tubage, maille, etc.), imposés par les configurations de site □ Coûts indicatifs au mètre-cube : <ul style="list-style-type: none"> ▪ injections gravitaires = 60 à 120 €/m³ (sans clavage) ▪ injections de clavage = 120 à 180 €/m³ ▪ injections coulis sous pression = 130 à 180 €/m³ ▪ injections de coulis avec clavage = 180 à 275 €/m³
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> □ Recommandations sur le traitement des cavités souterraines, Annales de l'ITBTP, 1979 □ Recommandations AFTES sur les travaux d'injection pour les travaux souterrains GT n°8, 1975, 1987

Remplissage par mousse thermodurcissable

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

Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Pérennité inconnue, mais probablement limitée (recul actuel : une dizaine d'année) ❑ Faible résistance mécanique (en pratique : 50 à 100 kPa, au maximum) ❑ Tassement de la mousse avec le temps (exige une surveillance) ❑ Sensibilité aux UV et peu de résistance aux intempéries ❑ Acidité résiduelle dans les sols et la nappe avec l'utilisation de mousse formophénolique (augmentation du pH) ❑ Toxicité par inhalation lors de la mise en œuvre (protection du personnel)
Aspects économiques	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Traitement onéreux et réservé aux sites difficiles ❑ Coût final moyen de l'ordre de 100 à 150 €/m³
Références Recommandations	<ul style="list-style-type: none"> ❑ Pas de recommandations spécifiques ❑ Références françaises (Gironde, Nord, Ile et Vilaine, Val d'Oise, Yvelines, Bouches du Rhône) et internationales (Angleterre, Italie)

Terrassement - comblement

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

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

Glossaire

Assise	Ensemble de bancs de pierre possédant les mêmes caractéristiques.
Banc	Couche naturelle de roche se terminant au-dessus et au-dessous par une séparation nette, c'est la plus petite subdivision du terrain.
Blindage	L'ensemble du dispositif de boisage d'un puits comprenant les planches et cerces avec coins de serrage dans le cas d'un puits rond ; les planches, les poteaux, etc. Dans le cas d'un puits carré ou d'une galerie d'avancement.
Blocage	Massif de pierres sèches constitué pour bloquer un ciel tombé, un fontis ou des remblais.
Boisage	Soutènement en bois mis en place pour éviter des éboulements localisés du ciel de carrière.
Bouche	Ouverture, entrée dans une carrière souterraine, ouverture d'un puits.
Bourrage	Remblais mis en place dans une carrière souterraine, pour combler les vides ou stocker les déchets de taille sans avoir à les remonter.
Bousin	Matériau marneux qui constitue un joint de stratifications séparant deux bancs de pierre. « Ebousiner » : consiste à enlever le bousin d'une pierre.
Catiche	Appellation employée dans le nord de la France pour désigner une petite exploitation de craie en forme de bouteille.
Cavage	Cavité souterraine creusée par l'homme.
Entrée en cavage	Entrée d'une carrière, à flanc de coteau.
Ceinture, ceinturage	Anneau maçonné entourant un pilier affaibli, un puits ou encore un ancien fontis.
Chevillage	Ensemble des pièces de bois maintenant les têtes de piliers d'une carrière de gypse.
Cheminée	Puits creusé depuis la surface jusqu'à la carrière pour ventiler ; souvent recouverte d'un abri de maçonnerie.
Ciel	Banc rocheux laissé au toit d'une carrière formant son plafond naturel.

Ciel tombé	Chute de blocs issus du banc de ciel. Ce phénomène préfigure l'amorce d'une cloche de fontis.
Ciel ouvert	Exploitation d'une carrière qui se fait en plein air.
Cloche	Ciel tombé qui évolue progressivement par éboulement des bancs du ciel en prenant une forme de tronconique ou semi-elliptique (voûte).
Cloche de fontis	Evolution de la cloche de ciel tombé au travers du recouvrement susceptible de déboucher en surface (fontis).
Clavage	Opération finale de comblement visant à obstruer tous les vides résiduels. Pour un pilier maçonné, on parlera de « matage ».
Comblement	Remplissage d'une cavité au moyen de matériaux d'apport (remblais), comblement d'une tranchée, d'un fossé, d'un puits. Synonymes : remplissage, remblaiement.
Consolidation	Edification de murs, poteaux ou piliers maçonnés destinés à ralentir l'évolution des dégradations dans une carrière souterraine. On parle également de « confortation » ou de « confortement ». Le terme de « renforcement » s'applique plus spécifiquement à la mise en place de soutènements moins traditionnels tels que le boulonnage ou les cadres métalliques. Le terme de consolidation s'applique également, de façon plus large, aux travaux menés par injection, en particulier dans la région parisienne (notice IGC concernant les travaux de consolidations souterraines exécutés par injection pour les carrières de calcaire grossier, de gypse, de craie et les marnières).
Défaut de masse	Cavités ou puisards remplis de matériaux terreux, inclusion de marne ou d'argile dans la masse rocheuse. Certains carriers les appellent « boules de marne » ou « pots de terre ».
Défermage	Creusement d'une tranchée verticale de faible largeur (« saignée ») dans le front de taille à l'aide d'une lance.

Délit	Joint de stratification qui sépare deux formations sédimentaires consécutives dans une masse calcaire. Par extension : toute fracture naturelle.
Dépilage	Reprise d'extraction d'un pilier de masse, soit en vue d'un foudroyage, soit en vue d'une extraction partielle ou complète, à ciel ouvert, d'une ancienne carrière souterraine.
Diaclase	Fracture naturelle subverticale d'origine tectonique, sans rejet, qui traverse plusieurs couches de terrains. Elle était également désignée de « filière », dans les carrières.
Encaillage	Dégradation mécanique, liée à l'état de contrainte, d'une paroi rocheuse par détachement d'éclats ou « d'écailles ».
Epaufrure	Eclat de pierre emporté sur l'angle d'un pilier.
Epontes	Couches ou horizons constituant le toit et le mur de la couche ou du banc exploité (on dit aussi « ciel », ou « plafond », et « sol » de carrière).
Etage de carrière	Niveau d'exploitation, synonyme d'atelier.
Etau de masse	Partie non exploitée dans une carrière. Si l'étau est de faible épaisseur, on le dénomme aussi « rideau de masse ».
Faciès	Ensemble de caractères lithologiques ou paléontologiques d'une roche qui renseigne sur ses conditions de dépôt et de formation.
Faille	Fracture naturelle d'origine tectonique qui traverse le massif rocheux en décalant les couches (rejet).
Fil	Petites veines ou fissures naturelles peu ou non visibles. Dans certaines pierres, elles facilitent la taille des blocs.
Flexure	Ondulation des couches d'un bassin sédimentaire, liée à la tectonique.
Fontis	Cratère conique formé en surface par l'effondrement brutal et inopiné des terrains à l'arrivée au jour d'une cloche de fontis.
Four	Partie haute d'un front de taille par où les carriers commencent souvent l'extraction.
Front de taille	Surface verticale suivant laquelle on attaque la couche à exploiter.
Front de masse	Limite des exploitations (ciel ouvert ou en souterrain).

Galerie	Voie d'accès utilisé dans l'exploitation des carrières. Les dimensions, très variables, sont déterminées par la hauteur des bancs à extraire, la circulation pour l'évacuation des blocs, la solidité du ciel. Synonyme : « Rues ». Les « allées » sont perpendiculaires aux rues.
Hague	Mur en pierres sèches servant à retenir les bourrages.
Havage	Extraction pratiquée dans le front d'abatage d'une carrière, parallèlement au mur (horizontalement). Synonyme : « Sous cavage ».
Karstique	Dans les régions les eaux d'infiltration dissolvent les calcaires et déterminent les reliefs particuliers (dépressions de surface, grottes, etc.), Les Causses en France montrent des exemples de morphologie karstiques. Par analogie, les dissolutions dans le calcaire peuvent être appelées « Karsts ».
Lance	Long outil servant à creuser les tranchées de défermage verticales.
Levage	Opération de « déroctage » s'effectuant au moyen d'un levier ou d'une « pince » à blocs à partir de la tranchée de souchevage (horizontale).
Lit	Plan lithologique parallèle à la stratification, plus ou moins visible.
Masse	Ensemble des bancs exploitables d'une carrière.
Masse en ciel	Banc exploitable laissé en surépaisseur dans un ciel de carrière.
Masse en pied	Banc exploitable laissé en surépaisseur sur un sol de carrière.
Matage	Opération finale d'édification d'un pilier maçonné visant à obstruer le vide résiduel au sommet du pilier et assurer un bon contact avec le ciel. Le terme de clavage est également employé pour cette opération.
Mur	Limite inférieure d'un banc ou d'une exploitation. Synonyme : « sol » de carrière, parfois « sole » (terme minier).
Nez de pilier	Partie supérieure d'un angle de pilier.
Pied de pilier	Base d'un pilier.
Pilier a bras	Pilier élevé en pierres sèches dans une carrière souterraine pour soutenir le ciel. Synonyme : « cale ».



Pilier tourné	Masse de pierre laissée en place régulièrement pour soutenir le ciel d'une carrière souterraine.
Puisard	Cavité d'érosion remplie de matériaux terreux apportés par les eaux ; on la rencontre dans la masse rocheuse en cours d'exploitation.
Puits d'aé- rage	Puits, généralement de petit diamètre, créant avec d'autres puits un courant d'air destiné à ventiler une carrière.
Puits d'ex- traction	Puits de diamètre important servant à la remontée des blocs.
Puits de service	Puits servant à descente du personnel et à l'acheminement des matériels.
Purger	Action de décoller et de faire tomber des blocs instables.
Recouvre- ment	Ensemble des terrains rencontrés au-dessus d'une carrière.
Remblai- ement	Action de remblayer et plus précisément, résultat de cette action. Accumulation épaisse de matériaux dans une dépression. Colmatage résultant du dépôt de maté- riaux. Synonyme : remblayage.
Remblaya- ge	Fait de remblayer. Action de combler une cavité avec des matériaux rapportés, mais aussi résultat de cette action. Synonymes : remblaiement, comblage, colmatage, rebouchage.
Séléniteux	Qui contient du sulfate de calcium. (De sélénite, ancien nom du gypse).
Souche- vage	opération qui consiste à enlever le « sou- chet » pour faciliter l'extraction du banc supérieur.
Sous-pied	Banc qui forme le sol d'une carrière souter- raine (mur). Lorsque ce banc est exploité à son tour, on parle de reprise en sous-pied.

Stériles	Matières non exploitables, terrains recou- vrant les masses calcaires.
Stot	Portion de gisement avant l'exploitation ou dépilage (Masse).
Toit	Synonyme de ciel de carrière (« toit immé- diat ») ou masse supérieure d'une exploi- tation souterraine (1er banc de toit, 2ème banc de toit, etc.).
Tréfonds	Sous-sol d'un terrain considéré sous l'angle d'une propriété.
Trou de communi- cation	Puits ou passage ouvert dans le banc sépa- rant deux étages.
Trou de service	Ancien nom donné à un puits d'extraction.
Trou de sonde	Trou foré en pied de carrière pour collecter et évacuer l'eau.
Vides rési- duels	Ensemble des vides subsistant au toit, après le remblaiement d'une ancienne car- rière souterraine (absence de clavage).

