



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 206842 - 2735434 - v2.0

15/12/2022

## **Remblayage de carrières souterraines par des déchets inertes**

Guide de bonnes pratiques – Aspects géotechniques

## **PRÉAMBULE**

Le présent document a été réalisé au titre de la mission d'appui aux pouvoirs publics confiée à l'Ineris, en vertu des dispositions de l'article R131-36 du Code de l'environnement.

La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations utilisées.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La mission ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser ce document après cette date.

Au vu de ses missions qui lui incombent, l'Ineris, n'est pas décideur. Les avis, recommandations, préconisations ou équivalents qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre des missions qui lui sont confiées, ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur dans sa prise de décision. Par conséquent, la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour chaque utilisation du document en dehors de l'objet de la mission.

Nom de la Direction en charge du rapport : Direction Sites et Territoires

Rédaction : PINON Catherine - ZAIER IMEN

Vérification : FRANCK CHRISTIAN; POULARD FREDERIC

Approbation : Document approuvé le 15/12/2022 par DUPLANTIER STEPHANE

Liste des personnes ayant participé à l'étude : WATELET JEAN-MARC et GOMBERT PHILIPPE, ingénieurs à la Direction Sites et Territoires

## Table des matières

1	Contexte et objectifs .....	6
2	Définitions .....	6
3	Cadre réglementaire général .....	8
4	Démarche suivie et retours d'expérience .....	9
4.1	Description de la démarche .....	9
4.2	Principaux retours des inspecteurs DREAL .....	9
4.3	Principaux enseignements issus des exploitants .....	9
5	Influence du remblayage sur la stabilité des ouvrages souterrains .....	11
5.1	Rôles et principes du remblayage .....	11
5.2	Influence sur la stabilité du toit .....	12
5.3	Influence sur la stabilité des piliers .....	12
6	Critères liés à la carrière souterraine .....	13
6.1	Configurations géologiques et géométriques .....	13
6.2	Contexte hydrogéologique .....	14
6.3	Stabilité de l'ouvrage souterrain .....	14
6.4	Autres facteurs externes .....	15
7	Critères <i>a minima</i> sur les matériaux de remblais .....	15
7.1	Provenance .....	16
7.2	Nature et granulométrie .....	16
7.3	Matériaux refusés .....	18
7.4	Cas des carrières de pierres ornementales .....	18
8	Techniques de mise en place des remblais .....	19
8.1	Acheminement du remblai par des engins mécanisés .....	19
8.1.1	Rôle et principe .....	19
8.1.2	Domaines d'utilisation .....	20
8.1.3	Mise en œuvre .....	21
8.1.4	Principaux avantages et inconvénients .....	23
8.2	Acheminement automatisé du remblai par un convoyeur .....	23
8.2.1	Rôle et principe .....	23
8.2.2	Champs d'application .....	24
8.2.3	Mise en œuvre .....	24
8.2.4	Principaux avantages et inconvénients .....	26
8.3	Cas des carrières de pierres ornementales .....	26
8.4	En situation d'urgence .....	27
8.5	Performances .....	27
9	Critères de réaménagement du site .....	28
10	Contrôles .....	28
10.1	Avant l'arrivée des déchets inertes sur site .....	29
10.2	À l'entrée des déchets inertes sur site .....	29
10.3	Lors du déversement des terres extérieures .....	29
10.4	Lors du régalaage des matériaux inertes .....	30

10.5	Tout au long de l'opération de remblayage (contrôles statistiques ou inopinés).....	30
10.6	En fin de remblayage.....	30
10.7	Après remise en état du site.....	30
10.8	Procédure de suivi.....	30
11	Points à examiner dans un dossier d'autorisation.....	31
12	Synthèse des bonnes pratiques liées à la stabilité géotechnique des remblais de déchets inertes en carrière souterraine.....	33
13	Conclusion.....	34
14	Références.....	35
15	Liste des annexes.....	37

## Table des figures

Figures 1	: Quelques termes relatifs à l'exploitation des carrières souterraines.....	7
Figure 2	: Exemple d'une plateforme de transit pour le déversement du remblai sur la carrière de gypse de Montmorency (95).....	10
Figure 3	: Quelques techniques de traitement d'une cavité [29].....	11
Figure 4	: Processus d'auto-comblement d'un fontis.....	12
Figure 5	: Conséquence d'un effondrement en masse.....	13
Figure 6	: Exemple de remblayage « peu efficace » avec des déchets de taille dans une carrière de pierres ornementales.....	19
Figure 7	: Déversement dans la carrière souterraine de Livry-Gargan (95).....	20
Figures 8	: Remblayage direct par le fond avec des engins mécanisés dans la carrière de gypse de Montmorency (95).....	20
Figure 9	: Exemple de ventilateurs couplés en carrière souterraine.....	21
Figure 10	: Exemple de remblayage au sein de la carrière de gypse de Grozon (39).....	22
Figure 11	: Front de remblayage au sein de la carrière de gypse de Montmorency (95).....	22
Figure 12	: Exemple de remblayage au sein d'une carrière de gypse (77).....	22
Figure 13	: Principe de base de la technique de remblayage entièrement mécanisée [43].....	24
Figures 14	: Principe de la technique de remblayage par un système de convoyeurs et lance de projection [45].....	25
Figures 15	: Principales composantes du dispositif de remblayage entièrement automatisé : a) déchargement du matériaux et b) support articulé, relié à l'orifice de déchargement, et permettant de combler les vides [42].....	25
Figures 16	: a) Navigation d'un camion automatique de chargement, transport et déchargement dans une mine souterraine complexe via une opération à distance, b) Opérateur contrôlant le camion souterrain depuis la surface ©TeleOp Multi.....	26
Figures 17	: Exemples de remblayage avec des déchets de taille en carrières de pierres ornementales.....	27
Figure 18	: Finalité du remblayage des carrières [20].....	28

## Résumé

La réglementation prévoit que le remblayage des carrières doit être géré de manière à assurer la stabilité physique des terrains remblayés, et que ce remblayage ne doit pas nuire à la qualité du sol ainsi qu'à la qualité et au bon écoulement des eaux. Cependant, les modalités de l'utilisation des matériaux pour le remblayage du point de vue des risques géotechniques associés (stabilité en phase de remblayage jusqu'au long terme après exploitation) ne sont pas précisées par la réglementation.

L'objectif de ce guide est de proposer des bonnes pratiques pour assurer, pour les carrières souterraines en activité, une utilisation optimale des déchets inertes pour le remblayage, afin de limiter les risques géotechniques associés à celui-ci. La typologie des déchets pouvant être utilisés pour le remblayage et les aspects environnementaux liés à leur emploi n'entrent pas dans le champ de ce guide. Dans ce guide, des recommandations liées à la stabilité géotechnique des remblais de déchets inertes sont proposées, pour la gestion et la mise en œuvre de la technique de remblayage en carrière souterraine en activité, mais également pour les contrôles.

Ainsi, concernant les aspects liés à la carrière (zone d'accueil et de dépôt du remblai), la configuration géométrique de l'exploitation souterraine et son état géotechnique vont conditionner la faisabilité de la technique de remblayage en souterrain. S'agissant des conditions de stabilité liées au remblai, il est préconisé de déterminer la nature, la granulométrie et la teneur en eau des déchets inertes afin de garantir leur aptitude au terrassement, de limiter les remblais à dominante rocheuse (comme ordre de grandeur, les blocs de taille supérieure à 20 cm doivent représenter tout au plus 20 % du volume total de remblai, le reste étant des matériaux plus fins) pour garantir un comblement effectif de vides résiduels, d'intégrer les phénomènes de tassements différentiels dans le dimensionnement des volumes de remblais à déposer, et d'être vigilant quant à l'utilisation de déchets inertes spécifiques (gypse, argile, déchets inertes de granulométrie très faible...).

Dans ces conditions, et contrairement aux versées des carrières à ciel ouvert, la stabilité des fronts de remblai en carrière souterraine est rarement problématique (les volumes et les hauteurs de remblai étant moindres et la présence de parements rocheux « en place » assurant un support et un confinement au remblai).

### **Pour citer ce document, utilisez le lien ci-après :**

Institut national de l'environnement industriel et des risques, -Guide de bonnes pratiques sur les critères de stabilité des remblais, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 206842 - 2735434 - v2.0, 15/12/2022.

### **Mots-clés :**

Carrières souterraines, Géotechnique, Mouvement de terrain, Diagnostic de stabilité.

# 1 Contexte et objectifs

L'arrêté du 22 septembre 1994 modifié relatif aux exploitations de carrières pose le principe fondamental que le remblayage de celles-ci, lorsqu'il est rendu nécessaire par les conditions d'exploitation ou lorsqu'il est entrepris de manière volontaire pour recycler des déchets inertes notamment, doit être géré de manière « à assurer la stabilité physique des terrains remblayés, et ne doit pas nuire à la qualité du sol ainsi qu'à la qualité et au bon écoulement des eaux » (annexe A).

L'arrêté du 22 septembre 1994 définit également les typologies de déchets inertes pouvant être utilisées pour le remblayage des carrières. Cependant, les modalités de l'utilisation des matériaux pour le remblayage du point de vue des risques géotechniques associés (stabilité en phase de remblayage jusqu'au long terme après exploitation) ne sont pas précisées par la réglementation.

L'objectif de ce guide est de proposer des bonnes pratiques pour utiliser de manière optimale et sécuritaire des déchets inertes en carrière souterraine, afin de limiter les risques géotechniques associés aux opérations de remblayage et de garantir la stabilité physique des terrains remblayés.

Ce guide aborde donc uniquement les bonnes pratiques liées à la stabilité géotechnique des remblais de déchets inertes. La typologie des déchets pouvant être utilisés pour le remblayage et les aspects environnementaux liés à leur emploi n'entrent pas dans le champ de ce document. De plus, le guide se concentre uniquement sur les carrières souterraines. Un document concernant les carrières à ciel ouvert a été publié en 2021 [10].

Basé sur des retours d'expérience de remblayage réalisés sur différents sites et sur l'influence du remblayage dans la stabilité des cavités souterraines, ce guide présente une synthèse des bonnes pratiques (liées à la configuration de l'exploitation et au remblai lui-même) à adopter, ainsi que les principaux points à examiner dans un dossier comprenant des opérations de remblayage en souterrain. Ce document constitue un référentiel pour donner, aux inspecteurs des DREAL, des bases afin d'instruire les dossiers (autorisation et modification) et mieux organiser les contrôles sur sites.

Notons également que l'utilité de ce guide est démontrée par l'augmentation des volumes de déchets inertes produits en France et la nécessité de les valoriser. En effet, une enquête de 2017 a révélé que 65 % des 227 Mt de déchets du BTP produits en France sont recyclés ou valorisés, dont 14 % sous forme de remblayage de carrières.

## 2 Définitions

Ces quelques définitions et abréviations seront utilisées dans la suite du guide.

**BTP** : Bâtiments et Travaux Publics.

**Chambres et piliers** : les chambres sont les espaces dans lesquels a été extraite la roche. Les piliers sont les masses de gisement laissées en place (non extraites) de manière à stabiliser l'exploitation (Figures 1).

**Cloche de fontis** : ciel tombé (Figure 4) qui évolue progressivement par éboulement des bancs du ciel en prenant une forme de tronconique ou semi-elliptique (voûte).

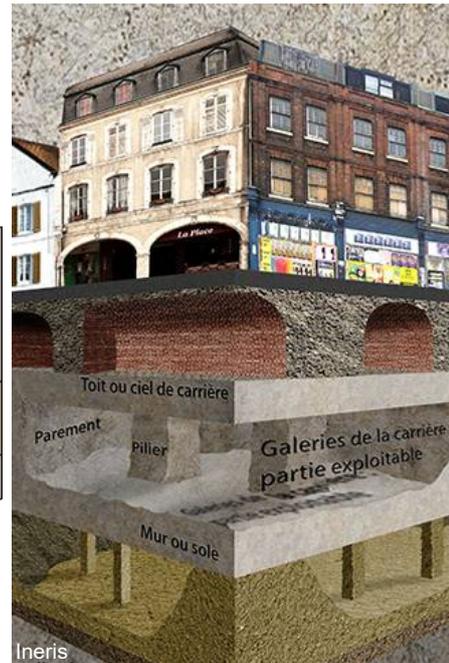
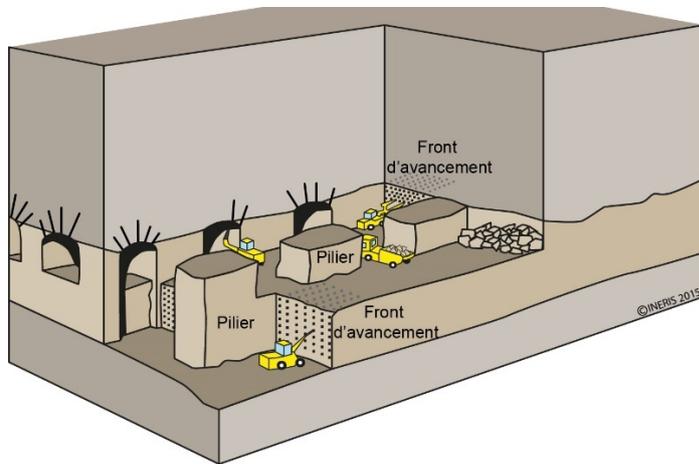
**Clavage** : opération finale de comblement visant à obstruer tous les vides résiduels.

**Comblement (ou remblayage)** : remplissage d'une cavité (Figure 3) au moyen de matériaux d'apport (remblais).

**Déchet** : « toute substance ou tout objet, ou plus généralement tout bien meuble, dont le détenteur se défait ou dont il a l'intention ou l'obligation de se défaire » (Code de l'environnement - Article L541-1-1).

**Déchet inerte** : on entend par déchet inerte, au sens de ce guide, la catégorie de déchet utilisable pour le remblayage des carrières telle que définie au II de l'article 12.3 de l'arrêté du 22 septembre 1994, et le cas échéant à l'article 12.4 pour les carrières de gypse et d'anhydrite (annexe A).

**Fontis** : cratère conique formé en surface par l'effondrement brutal et inopiné des terrains, à l'arrivée en surface d'une cloche de fontis (Figure 4).



Figures 1 : Quelques termes relatifs à l'exploitation des carrières souterraines

**Front de taille (ou d'avancement)** : surface verticale suivant laquelle on attaque la couche à exploiter (Figures 1).

**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 toit.

**Gisement** : formation géologique exploitée.

**Glissement** : mouvement de matériaux meubles au sein d'une pente, le long d'une zone de rupture définie par une surface continue (dont la forme peut être circulaire, plane ou parfois complexe). On évoque le terme de *glissement profond* lorsque la surface de rupture se trouve à une ou quelques dizaines de mètres de profondeur, et de *glissement superficiel* lorsque cette surface est sise à quelques mètres de profondeur. Une pente de matériaux meubles peut être également sujette à des *mouvements superficiels*, terme regroupant des phénomènes qui ne sont pas associés à l'existence d'une surface de rupture bien définie : ce peut-être des reptations de sols ou matériaux par modification de leur comportement mécanique en présence d'eau, ou encore du ravinement d'une pente par l'eau.

**Intégratrice (pente)** : pente globale d'un flanc rocheux, d'une pente réaménagée, ou d'un remblai, intégrant à la fois les talus/fronts unitaires et les banquettes/risbermes intermédiaires.

**Mur (ou sole)** : limite inférieure d'un banc ou d'une exploitation, correspond au « sol » de la chambre (Figures 1).

**Nappe d'eau (phréatique)** : accumulation d'eau souterraine circulant au sein d'un milieu poreux ou fissuré, appelé aquifère, reposant sur un substratum imperméable ; la nappe phréatique est la première nappe d'eau rencontrée dans le sous-sol.

**Recouvrement** : ensemble des terrains rencontrés au-dessus d'une carrière.

**Remblayage (ou Comblement)** : remplissage d'une cavité (Figure 3) au moyen de matériaux d'apport (remblais).

**Stériles** : terme qui désigne les roches déplacées pour atteindre le gisement, y compris au stade de la préproduction, ou encore les roches non valorisables dudit gisement. Il peut donc s'agir de stériles francs (forage de puits ou traçage de galeries au rocher par exemple) ou de stériles minéralisés (teneur en éléments valorisables inférieure à la teneur économiquement exploitable au moment du dépôt).

**Tassement** : déplacement vertical d'un matériau meuble par sollicitation externe (charge anthropique, poids des matériaux sus-jacents), et qui est fonction de son comportement intrinsèque.

**Toit (ou ciel) de carrière** : banc rocheux laissé au toit d'une carrière formant son plafond naturel (Figures 1).

**Vides résiduels** : ensemble des vides subsistant au toit, après le comblement d'une carrière souterraine (absence de clavage).

**Zone d'accueil (du remblai)** : dans le cas présent, zone de la carrière où le remblai sera mis en place de manière pérenne, soit, selon le cas, l'excavation et les fronts la délimitant, le plan d'eau, leur pourtour le cas échéant.

**Zone de chalandise (du remblai)** : dans le cas présent, zone géographique d'influence d'où provient la majorité des terres de remblai.

### 3 Cadre réglementaire général

**L'arrêté ministériel du 22 septembre 1994 modifié** par l'arrêté de 30 septembre 2016, **relatif aux exploitations de carrières**, fixe les prescriptions applicables aux exploitations de carrières soumises à autorisation. L'objectif du régime d'autorisation est d'organiser l'exploitation des carrières et de garantir leur remise en état, de manière à limiter leur impact sur l'environnement. Dans ce contexte, qu'il s'agisse de valoriser des déchets inertes et/ou de contribuer à la limitation des impacts des carrières souterraines (en termes de mouvement de terrain en surface notamment) et/ou de sécuriser les ouvrages souterrains, certaines exploitations souterraines peuvent mettre en œuvre le remblayage des vides souterrains.

Cet arrêté permet une approche homogène en ce qui concerne les déchets inertes externes admis en remblayage de carrières en adoptant les règles de l'arrêté du 12 décembre 2014 relatif aux conditions d'admission des déchets inertes en ISDI [19]. Il définit, dans l'article 12.3 (annexe A) :

- le remblayage des carrières « est géré de manière à assurer la stabilité physique des terrains remblayés ». Il ne doit pas nuire « à la qualité du sol ainsi qu'à la qualité et au bon écoulement des eaux » (cf. I de l'article 12.3) ;
- les déchets utilisables pour le remblayage sont « les déchets d'extraction inertes, qu'ils soient internes ou externes » et les « déchets inertes externes » (cf. II de l'article 12.3) ;
- l'exploitant doit tenir à jour « un plan topographique permettant de localiser les zones de remblais ». Il doit aussi s'assurer « que les déchets inertes ne sont pas en mesure de dégrader les eaux superficielles et les eaux souterraines et les sols » (cf. III de l'article 12.3) ;
- l'exploitant « étudie et veille au maintien de la stabilité de ces dépôts » (cf. III de l'article 12.3).

L'article 12.4 consacre un paragraphe spécifique aux carrières de gypse ou d'anhydrite. Le remblayage de ce type de carrière peut, selon cet article, être réalisé par « des rebuts de fabrication provenant des usines de production de plâtre, de plaques ou de produits dérivés contenant du plâtre et qui sont non recyclables dans des conditions technico-économiques acceptables, des terres et matériaux extérieurs à la carrière contenant naturellement du gypse ou de l'anhydrite et des déchets d'extraction internes à la carrière ». Ce type de déchet doit être employé uniquement « dans les trous d'excavation à des fins de remblayage ». En revanche, « l'emploi des déchets et produits précités est interdit pour le remblayage des carrières destinées à être ennoyées ou pour lesquelles un contact avec une nappe phréatique est possible, en tenant compte du niveau des plus hautes eaux connu ».

Le remblayage des carrières ennoyées est envisageable (sauf pour les carrières de gypse et d'anhydrite précitées) en se limitant aux déchets strictement inertes (sauf intérêt particulier dûment justifié par le pétitionnaire) au sens de l'annexe I de l'arrêté du 12 décembre 2014 (Annexe B) relatif aux conditions d'admission des déchets inertes dans les installations de stockage de déchets inertes, en réalisant une caractérisation systématique des matériaux. Il est exclu de risquer une fermeture des captages en aval. Dans le cas de l'exploitation d'une nouvelle carrière, l'étude d'impact transmise dans le dossier de demande d'autorisation environnementale devra comprendre une étude spécifique sur l'utilisation de déchets inertes externes en tant que remblai ennoyé [19].

Les opérations de remblayage des carrières souterraines par des déchets inertes peuvent intervenir à plusieurs moments de la vie du site :

- en période d'exploitation, pour assurer la stabilité à court terme de l'ouvrage souterrain ;
- en fin d'exploitation pour protéger les terrains de surface et sécuriser les ouvrages débouchant en surface, compte tenu de la vocation ultérieure du site (article 12.2 de l'arrêté du 22 septembre 1994) ;
- en urgence, à tout moment, en cas d'instabilités géotechniques détectés sur les piliers ou au toit de l'exploitation souterraine.

## 4 Démarche suivie et retours d'expérience

### 4.1 Description de la démarche

Pour aboutir à l'élaboration de ce guide, les retours d'expérience et les points de vue d'exploitants et les attentes des DREAL ont été recueillis. Ces contacts ont donné lieu à plusieurs échanges téléphoniques en 2021 et à la visite, en avril 2022, de la carrière souterraine de gypse de Montmorency (95) exploitée par la société PLACOPLATRE.

Le point de vue des inspecteurs des DREAL et celui des exploitants de site ont été très utiles et complémentaires. Les inspecteurs DREAL sont en attente d'éléments techniques leur permettant de se prononcer sur une demande d'autorisation de remblayage ou d'analyser des informations reçues provenant de l'exploitant. Les exploitants, qui connaissent généralement leur site (hormis les cas particuliers de changement de titulaire, ou d'arrivée d'un nouveau responsable de carrière engendrant une certaine méconnaissance du site et de son historique) ont davantage besoin de bonnes pratiques liées à la mise en place du remblai et à la gestion des mouvements de terrain engendrés.

Un document de bonnes pratiques sur cette thématique, regroupant les points à vérifier, les critères à respecter, les méthodes à utiliser a été jugé utile et profitable, du côté des exploitants comme de celui des DREAL.

Les enseignements et remarques des exploitants concernés en France sont synthétisés ci-dessous, y compris les contraintes (chalandise, transport...) qui ont pu empêcher d'autres exploitants à mettre en œuvre ces actions.

Nous remercions particulièrement Monsieur BOUCHET (PLACOPLATRE), Monsieur VIALON (SAMIN<sup>1</sup>) et Mme Madame LIETARD pour leur disponibilité, leurs précieux témoignages et la mise à disposition de leurs documents techniques.

### 4.2 Principaux retours des inspecteurs DREAL

Du retour d'expériences mené en 2021 auprès des DREAL, il ressort qu'en France, la technique de mise en sécurité par remblayage, pour les exploitations souterraines en activité, reste limitée : seules les carrières de gypse de la région parisienne et une carrière souterraine dans l'Ain semblent concernées. Les autres exploitations souterraines sont considérées comme suffisamment stables et/ou les exploitants ne cherchent pas à mettre en œuvre ces types de traitement, au moins de manière systématique et organisée, car il faut qu'il y ait un réel marché d'approvisionnement en remblai (déchets inertes).

Soulignons toutefois que les carrières souterraines de pierres ornementales mettent en œuvre le remblayage « par le fond », ponctuellement sous des enjeux, en n'utilisant uniquement leurs propres déchets de taille (déchets de sciure et blocs non commercialisables ou encore fraction fine des matériaux extraits concassés) et leurs engins habituels d'exploitation. Ces comblements font rarement l'objet de procédures spécifiques. Outre la fonction de traitement des vides, il y a également un aspect économique à « abandonner » ces déchets de taille, en souterrain, au plus près de leur point de production.

Il ressort également que les opérations de remblayage en carrière souterraine se heurtent aux préoccupations environnementales et principalement à la protection des espèces animales et à leurs habitats (chiroptères en particulier pour lesquels les carrières souterraines constituent des gîtes privilégiés).

### 4.3 Principaux enseignements issus des exploitants

D'une manière générale, les exploitants concernés (sociétés PLACOPLATRE et SAMIN) soulignent que :

- les exploitants respectent des règles « internes » lors de la mise en place de déchets inertes : procédure d'accueil de déchets inertes avec, en particulier, « demande d'acceptation préalable (D.A.P.) » plusieurs jours avant l'arrivée des remblais, traçabilité et archivage de la provenance des remblais... ;

---

<sup>1</sup> Société d'Exploitation de Sables et Minéraux.

- actuellement, pour ce type d'opération, la distance de la zone de chalandise autour du site est faible : moins de 20 km en moyenne (pour les carrières de gypse de la région parisienne, 50 % des camions viennent de chantiers situés à moins de 6 km à 8 km du site). Il s'agit d'une contrainte forte pour organiser l'approvisionnement plus ou moins constant et régulier du remblai ;
- les remblais inertes sont issus de chantiers de travaux public ou de terrassement car le matériau doit être « pelletable » (et « roulant »), pas trop boueux, sans gros blocs (50 cm ou moins et mélangé à des fines) et avec une certaine cohésion ;
- la gestion du transport (en surface et en souterrain) du remblai est complexe : gabarit (adapté à la hauteur limitée des galeries), motorisation (conforme au RGIE<sup>2</sup>) et circulation des camions (affluence à certaines heures de la journée, tonnage et vitesse limités, ventilation, pistes carrossables et cheminements spécifiques pour éviter les croisements, les virages serrés...), établissement et respect des consignes de sécurité en souterrain (masque auto-sauveteur...) ;
- la mise en place d'une plateforme de transit est une option intéressante car elle permet d'assurer une meilleure organisation et d'apporter une sécurité et une attractivité supplémentaires au site. Il s'agit de quais de déchargement (Figure 2), en surface de préférence, destinés à recevoir les camions extérieurs et à alimenter, via une chargeuse, les camions-benne adaptés aux opérations de remblayage en souterrain. Les chauffeurs routiers peuvent gagner du temps en effectuant plusieurs allers-retours par jour ;



*Figure 2 : Exemple d'une plateforme de transit pour le déversement du remblai sur la carrière de gypse de Montmorency (95)*

- les contrôles sur les caractéristiques mécaniques et la mise en place des remblais sont exercés ponctuellement, et essentiellement visuels (dans une moindre mesure, olfactifs<sup>3</sup>). Les contrôles relatifs à la qualité environnementale sont plus stricts.

En outre, comme il s'agit de sites en exploitation, l'exploitant doit piloter simultanément deux types d'opérations : l'extraction du gisement et le remblayage des vides laissés par l'extraction. Ce sont deux activités très différentes avec des engins, un planning et du personnel distincts et spécifiques. Il est aussi envisageable (ce n'est pas le cas dans les exemples français) qu'ils aient à gérer deux types de matériaux : les stériles issus de l'exploitation et les déchets inertes reçus. Certains choisissent de les mélanger par couches successives alors que d'autres les disposent dans des zones distinctes.

Dans ce contexte, pour garantir dans le temps, le volume et la qualité du matériau de remblai et de sa mise en place (savoir-faire), et pour se libérer des contraintes de recherche, de gestion (notamment commerciale) et de transport, certains exploitants font le choix de sous-traiter les opérations de remblayage (de la gestion des remblais en surface jusqu'à la mise en place dans les galeries) dans le cadre de contrats renouvelables.

Enfin, notons qu'aucun cas d'instabilités géotechniques des remblais lors de leur mise œuvre n'a été remonté au cours des échanges. Le principal point d'attention remonté porte sur la nécessaire vigilance au cours des phases de remblayage afin de ne pas laisser d'espaces vides et non remblayés entre des chambres intégralement remblayées (qui sont par la suite rendues inaccessibles).

<sup>2</sup> Règlement Général des Industries Extractives.

<sup>3</sup> Pour détecter la présence d'éventuels polluant (type HAP) ou de bois/végétaux en décomposition ou d'autres déchets notamment ménagers.

# 5 Influence du remblayage sur la stabilité des ouvrages souterrains

## 5.1 Rôles et principes du remblayage

Parmi les techniques de traitement d'une cavité (Figure 3), celles relatives au remblayage visent à [18][29][35][37] :

- améliorer la stabilité locale et générale des ouvrages souterrains en obtenant un niveau de sécurité suffisant en souterrain, adapté aux conditions d'exploitation et à l'influence du temps (pérennité) ;
- diminuer notablement la probabilité, l'intensité et la gravité du risque de mouvements de terrain en surface, même en cas de déstabilisation généralisée des cavités (affaissement possible en surface, mais atténué).

Pour les carrières souterraines (en exploitation notamment), le remblayage, généralement opéré depuis le souterrain, a pour but d'assurer la stabilité des ouvrages souterrains au-delà de toute échelle de temps et de tout dimensionnement.

La méthode repose donc sur deux principes fondamentaux : une diminution effective du volume des vides (Figure 3) et un confortement des piliers pour diminuer leur potentialité de rupture sous l'effet du poids des terrains de recouvrement.

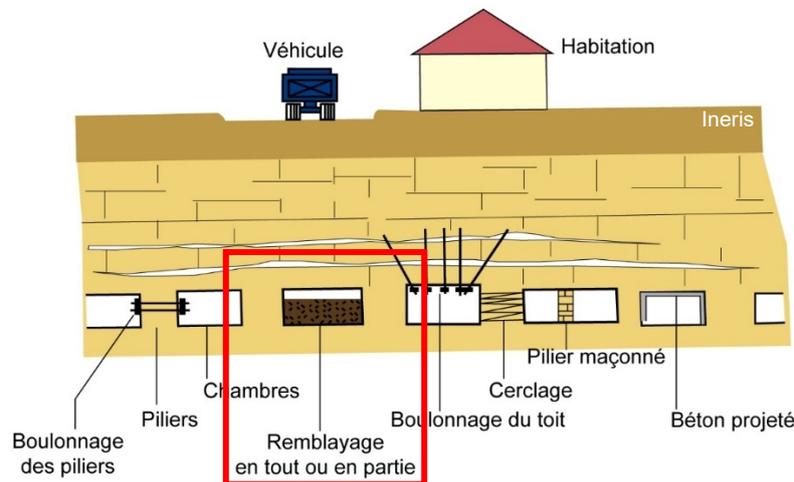


Figure 3 : Quelques techniques de traitement d'une cavité [29]

Le remblayage peut être soit partiel soit total.

Un **remblayage partiel** consiste à opérer un remplissage progressif de la cavité jusqu'à une hauteur prédéterminée. Un vide résiduel parfois important peut être laissé en partie supérieure de la cavité tout en répondant aux attentes de limitation des impacts en surface.

Un **remblayage total** limitera le processus de dégradation localisée comme les chutes de bloc, l'écaillage des parements de piliers ou les éboulements du toit à la condition que les vides résiduels laissés après le remblayage soient minimes ou clavés. Il permet ainsi d'éliminer l'aléa fontis et ses conséquences en surface dans tous les cas de figure.

Si les prescriptions définies préalablement en matière de stabilisation des terrains sus-jacents 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 réalisés à partir de la surface, par des forages en petit diamètre ou à partir de tubes d'injection placés au préalable en voûte des ouvrages souterrains. Le maillage est adapté classiquement à la géométrie des ouvrages souterrains (au centre des carrefours des galeries) facilement identifiable dans ces conditions de site. Cette opération empêche normalement tout mouvement perceptible en surface et le plus souvent mise en œuvre dans des zones destinées à la construction.

## 5.2 Influence sur la stabilité du toit

Le déclenchement d'une instabilité au toit d'une cavité souterraine (ou fontis) est dû à la dégradation locale et à la rupture des bancs des terrains de recouvrement, souvent à la faveur de fractures préexistantes, qu'elles soient naturelles ou mécaniques<sup>4</sup>. Toutefois, grâce au remblayage, ces dégradations peuvent être interrompues dans leur évolution (phénomène de fontis) lorsque le volume foisonné de la cloche d'éboulement, éventuellement « additionné » au volume remblayé, correspond au volume du vide initial (on parle alors d'auto-comblement par foisonnement, Figure 4). Ce résultat n'est possible que lorsque les conditions de recouvrement sont favorables (caractéristiques de foisonnement des terrains, hauteur suffisante du recouvrement, absence d'aquifère...).

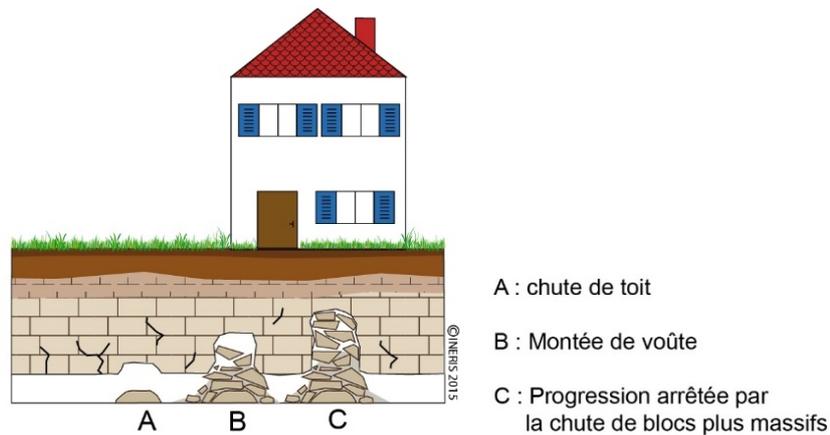


Figure 4 : Processus d'auto-comblement d'un fontis

L'auto-comblement dépend principalement de trois facteurs : le volume de vide initial, la forme de la cloche de fontis et la nature des terrains de recouvrement (qui détermine la capacité de foisonnement des terrains rompus).

Il est pratiquement impossible d'intervenir pour modifier les deux derniers paramètres. En revanche, on peut améliorer les conditions d'auto-comblement grâce à la réduction du volume de vide, notamment par remblayage de la cavité. Des calculs analytiques et/ou des modélisations numériques permettent d'évaluer la hauteur de vides résiduels maximum après remblayage, nécessaire pour garantir le phénomène d'auto-comblement d'un fontis [18].

Pour exemple, dans la carrière souterraine de Montmorency (95), les vides résiduels laissés après le remblayage sont minimales : 1 m maximum théorique, 50 cm maximum tolérés dans le cadre de l'autorisation d'exploiter et 10 à 20 cm de vides résiduels laissés en pratique au toit des galeries après les opérations de remblayage.

De fait, un remblayage partiel peut permettre de limiter les éboulements du toit et d'éviter qu'un fontis ne débouche en surface et entraîne des conséquences sur la sécurité des enjeux en surface.

Un remblayage total (voire complété d'un clavage), quant à lui, empêchera la formation de fontis, d'une cuvette d'affaissement et de tassements.

## 5.3 Influence sur la stabilité des piliers

Le remblayage peut également modifier la distribution des contraintes induites par l'exploitation et jouer sur le comportement mécanique des ouvrages souterrains et notamment sur la stabilité des piliers.

Le remblayage autour des piliers augmente leur résistance grâce à l'effet de frettage (ou contrainte de confinement) et permet de diminuer leur élancement<sup>5</sup>. Cette contrainte, fonction du compactage du remblai, est certes significative, mais limitée (environ 0,05 MPa) d'après plusieurs expérimentations in situ [3]. En revanche, les remblais ceinturant ainsi les piliers évitent toute dégradation évolutive et

<sup>4</sup> À noter que des cavités naturelles, préexistantes dans le gisement avant son exploitation, peuvent être, dans certains cas spécifiques et une fois recoupées par les exploitations, des points d'initiation de phénomènes de fontis.

<sup>5</sup> Rapport de la hauteur du pilier sur sa largeur.

dommageable de ces structures. Il a aussi été montré que le confinement varie en fonction de la hauteur du pilier, il est plus important à la base du pilier qu'au sommet.

De fait, le remblayage des vides permet également d'éviter le phénomène d'effondrement en masse (perte progressive de résistance globale des piliers ou encore rupture d'un pilier de section portante trop réduite pouvant également entraîner un report de charge sur les piliers voisins qui peuvent se rompre à leur tour par « effet domino », Figure 5).



Figure 5 : Conséquence d'un effondrement en masse

## 6 Critères liés à la carrière souterraine

Les caractéristiques hydrogéologiques du massif, ainsi que la configuration générale des vides sont des éléments importants à prendre en compte dans les opérations de remblayage, tant au point de vue de la stabilité que du point de vue de la mise en place des remblais. Les principaux critères facilitant le remblayage en carrière souterraine (le plus souvent mis en œuvre au sein d'exploitation souterraine en activité) et permettant d'assurer une stabilité à long terme du site sont listés ci-dessous.

### 6.1 Configurations géologiques et géométriques

Bien que très minoritaires en nombre par rapport aux carrières d'exploitation à ciel ouvert, on recense en France, en 2022, une quarantaine de carrières souterraines en activité, réparties sur l'ensemble du territoire national (pour environ 4000 carrières à ciel ouvert). À ce jour, quelques projets de nouvelles exploitations souterraines sont envisagés.

Les matériaux les plus exploités de nos jours sont en volume :

- tout d'abord le gypse (utilisé pour fabriquer le plâtre) ;
- la pierre de taille (calcaire, pierre marbrière) ;
- le calcaire marneux utilisé comme pierre à ciment.

Il est impossible de donner une typologie générique de carrière souterraine, puisque chaque site d'exploitation est unique, par sa configuration, son contexte géologique, hydrogéologique et géotechnique.

La conception et le dimensionnement des exploitations souterraines sont étudiés en fonction de différents paramètres et notamment :

- la nature géologique des gisements (dépôts sédimentaires, gisements intrusifs) ;
- les caractéristiques géométriques des gisements (puissance, pendage, profondeur, régularité...);
- les paramètres géomécaniques des terrains, gisement et recouvrement (résistances, cohésion...).

De fait, entre autres classifications relatives à la nature ou l'usage du matériau extrait, l'UNICEM définit deux principaux types de carrières [39] :

- les carrières de roches meubles : à savoir les carrières de matériaux granulaires de type gravière ou les carrières de roche plus tendre, voire de sol de type marne ou argile ;

- les carrières de roches massives, d'origine sédimentaire (calcaire, craie, grès...), magmatiques (granite, roches volcaniques...) ou métamorphiques (schiste, gneiss...).

On peut par ailleurs retenir quatre usages principaux : les granulats, les matériaux pour cimenteries, les minéraux industriels et les pierres de taille et ornementales.

Le mode de remblayage par le fond n'est pas adapté à toutes les configurations de site d'exploitation. Compte tenu des contraintes de rendement (mécanisation intensive) et de sécurité du personnel, cette méthode nécessite des conditions en termes de dimensions et d'accessibilité :

- les galeries et chambres d'exploitation doivent être suffisamment grandes en hauteur et en largeur pour permettre le passage d'engins ou de systèmes mécaniques ;
- l'accès à la carrière suppose souvent une entrée de plain-pied (en cavage), pour faciliter le passage du matériel et du personnel.

Ainsi, certaines carrières souterraines sont, dès le départ (au moment de la demande d'autorisation d'exploitation), dimensionnées pour accueillir du remblai ; la configuration de certaines autres rendra très complexe, voire impossible le remblayage par le fond.

Le remblayage des carrières souterraines doit se concevoir dès les phases de dimensionnement d'un projet d'exploitation souterraine.

## 6.2 Contexte hydrogéologique

Contrairement aux mines qui peuvent être creusées très profondément sous le niveau des nappes et nécessiter de ce fait de lourds moyens d'exhaure de l'eau, les carrières souterraines s'arrêtent souvent au-dessus ou au ras de la nappe phréatique. La plupart d'entre elles vont ainsi se trouver hors d'eau, à l'exception de certaines zones particulièrement fissurées qui peuvent être temporairement parcourues par des circulations d'eau d'infiltration, notamment à l'occasion d'épisodes pluvieux intenses. Néanmoins, certaines carrières vont être confrontées à une problématique d'ennoyage selon l'une des modalités suivantes :

- un ennoyage permanent lorsque des travaux se prolongent en profondeur en suivant le pendage d'une couche exploitée ou qu'ils se répartissent sur plusieurs étages ; dans ce cas, tout ou partie de la carrière souterraine se trouve en permanence sous le niveau de la nappe phréatique ;
- un ennoyage temporaire lorsque la nappe phréatique vient baigner les parties basses d'une carrière souterraine en hautes eaux ; ce phénomène peut se produire annuellement ou pluri-annuellement, par exemple à l'occasion des périodes de précipitations décennales ou centennales, et durer plusieurs semaines, plusieurs mois, voire plusieurs années.

On notera en outre que, dans le cadre du changement climatique en cours, on peut s'attendre localement à des fluctuations plus fortes du niveau des nappes phréatiques, en réponse à des événements hydroclimatiques extrêmes (forte sécheresse, crue ou pluie intense). Ces phénomènes pourraient ainsi induire tantôt le dénoyage temporaire des parties hautes de certaines carrières souterraines inondées, tantôt l'ennoyage temporaire des parties basses de carrières sèches creusées juste au-dessus du niveau de la nappe phréatique.

Ainsi, lorsque les vides à remblayer ne peuvent pas être considérés comme constamment hors d'eau, la nature et/ou la méthode de remblayage devra prendre en compte le risque d'ennoyage ou d'infiltration d'eau.

En présence de remblai, les eaux souterraines vont venir circuler dans le remblai ou saturer la zone remblayée. L'infiltration et le ruissellement sont des mécanismes de nature à modifier les caractéristiques des remblais et à déstabiliser les remblais s'ils prennent de l'importance et s'ils ne sont pas maîtrisés. D'un point de vue géotechnique, cela pourrait théoriquement provoquer des glissements ou des tassements, voire de la dissolution, si le remblai renferme une certaine proportion de matériaux solubles (craie, calcaire, gypse...).

## 6.3 Stabilité de l'ouvrage souterrain

Une étude de stabilité générale accompagne tout projet de carrière souterraine. Ces calculs permettent de définir un dimensionnement d'exploitation optimal afin de limiter tout impact dommageable, notamment vis-à-vis des instabilités géotechniques et des mouvements de terrain. Dans certains cas, ces dimensionnements requièrent de remblayer les vides résiduels afin de prévenir tout potentiel phénomène d'instabilité sur le site.

Au cours de la vie de l'exploitation, les calculs et dimensionnement initiaux peuvent être ajustés et de fait impacter les opérations de remblayage (schéma et planning de remblayage). Le suivi précis de la carrière souterraine (plan détaillé, historiques des désordres...) et de son environnement est important pour évaluer la stabilité des futures zones remblayées, en identifiant :

- les caractéristiques géométriques de l'exploitation, souvent non anodines car guidées par la présence de formations ou accidents géologiques favorables ou défavorables ;
- les instabilités constatées et si possible leurs causes ;
- l'écoulement et les arrivées d'eau dans le proche périmètre et au sein de la carrière ;
- la présence d'éventuels vieux travaux (antérieurs à l'extraction actuelle) dont la stabilité est à vérifier (qu'il conviendra, si besoin, de sécuriser en priorité) et qui pourrait interagir avec les opérations de remblayage (zones instables à traverser pour rejoindre le secteur à remblayer, arrivées d'eau...).

Il est par ailleurs nécessaire de connaître les zones de remblayage déjà existantes sur le site, ainsi que les éventuelles instabilités qui les ont affectées.

En cas d'incertitude sur l'origine et la nature des matériaux apposés au préalable, des essais in-situ (sondages destructifs, sondages carottés, essais pressiométriques et pénétrométriques) sont éventuellement à envisager.

Ces connaissances sont acquises lorsque l'exploitant n'a pas changé et lorsque le transfert d'informations entre les responsables de carrière successifs a été opéré dans de bonnes conditions. La perte de connaissance peut en revanche être constatée lorsqu'il y a changement de titulaire et que le relais d'information ne s'est pas produit.

Il est généralement nécessaire de déterminer les zones à remblayer avant la mise en place des terres en souterrain et d'effectuer une première phase préparatoire de mise en sécurité minimale du site. Des conditions locales défavorables, comme la présence de fractures ouvertes ou des dégradations naturelles du toit, peuvent affecter ponctuellement la stabilité des ouvrages (et surtout le toit) et menacer la sécurité du personnel. Il appartient à l'exploitant d'être vigilant et de prendre les mesures conservatoires qui s'imposent en présence de difficultés géotechniques non prévues. Ces mesures peuvent être préventives (observations, relevés, endoscopie, etc.) et/ou confortatives (purge des blocs instables, abattage des parements dangereux, boulonnage local, brochage de parement, etc.), quitte à adapter le schéma et le planning de remblayage en conséquence, pour éviter la formation d'un désordre plus important.

## 6.4 Autres facteurs externes

Enfin, il n'est pas exclu la présence d'éventuelles cavités souterraines, naturelles ou anthropiques, à proximité (en-dessous ou à côté) de la carrière souterraine en exploitation. Le vieillissement naturel des cavités souterraines entraîne une perte de résistance qui peut avoir des effets (fractures, débouillage...) sur la carrière en exploitation et son mode de sécurisation par remblayage.

Généralement la connaissance par l'exploitant des anciennes cavités anthropiques est acquise, mais tel peut ne pas être le cas de cavités de dissolution (vides dans des horizons gypseux ou salins, karsts calcaires...). Il est recommandé de caractériser de manière optimale (a minima une cartographie) ces cavités naturelles, avant d'envisager si nécessaire de les remblayer.

## 7 Critères *a minima* sur les matériaux de remblais

Beaucoup de matériaux sont autorisés en remblayage de carrière sous réserve de respecter certaines conditions. Il faut ainsi garantir :

- l'innocuité vis-à-vis de l'environnement. Les matériaux de remblayage sont susceptibles d'être mis au contact des eaux souterraines, ils ne doivent donc pas relarguer d'éléments de nature à polluer les nappes souterraines. Ils doivent être aussi inertes que possible d'un point de vue physico-chimique et n'engendrer aucune pollution. Cette caractérisation ne fait pas l'objet de ce guide ;
- la non-solubilité dans l'eau (remontée de nappe, eaux d'infiltration) ;
- la stabilité chimique ;
- la stabilité mécanique (pas de retrait-gonflement, par exemple).

L'arrêté du 22 septembre 1994 modifié, précise qu'outre les déchets d'extraction inertes, il est possible d'utiliser des déchets inertes externes à l'exploitation de la carrière tels que ceux définis dans l'Annexe B de ce document.

Ainsi, le remblai est généralement composé par des résidus naturels et non contaminés provenant des chantiers de terrassement (sables, graviers, blocs rocheux...) ou des déchets recyclés et triés issus du secteur BTP (mortier, béton, rebus de ciment, briques non réfractaires, enrobés routiers, verres...). Il est produit « sur » les chantiers de BTP, parfois, par concassage, tamisage ou malaxage, ou souvent par tout-venant en tenant compte d'une distribution granulométrique prédéfinie [37].

Toutefois, le remblayage des carrières doit « être géré de manière à assurer la stabilité physique des terrains remblayés. Il ne doit pas nuire à la qualité du sol, ainsi qu'à la qualité et au bon écoulement des eaux », d'après l'arrêté du 22 septembre 1994.

Il y a donc une double condition pour l'acceptabilité des remblais en carrières souterraines : la nature du matériau d'une part, et les conditions de sa mise en œuvre d'autre part. Ainsi la conformité du matériau de remblai à l'arrêté du 12 décembre 2014 n'entraîne pas une acceptabilité automatique dans n'importe quelle carrière qui relève de la responsabilité de l'exploitant [19].

## 7.1 Provenance

Le premier critère d'acceptation des remblais sera sa provenance, analysée à partir d'une base cartographique de la région, faisant état du fond géochimique du secteur (et indiquant la présence ou pas d'une pollution potentielle).

L'arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières et au remblayage des carrières, art.12, pose les conditions d'utilisation des déchets inertes pour les apports extérieurs :

- l'arrêté d'autorisation de la carrière fixe la nature, les modalités de tri et les conditions d'utilisation des matériaux extérieurs admis sur le site ;
- pour chaque dépôt, un bordereau de suivi indique la provenance, la destination, les quantités, les caractéristiques, les moyens de transport utilisés, la conformité des matériaux à leur destination.

Le volume global des déchets inertes est imposé par Arrêté Préfectoral, mais la cadence d'approvisionnement est variable, selon le nombre, la distance et l'envergure des chantiers d'où proviennent les déchets. Il se peut notamment que l'exploitant fasse face à une arrivée massive de déchets sur une courte période ou au contraire, subisse des périodes d'apport beaucoup plus calmes.

La nature, l'aspect et la granulométrie du remblai utilisé, vont conditionner le volume maximal et la qualité du remplissage. En effet, un phénomène de tassement différé est inéluctable après la mise en place du remblai.

D'après les retours d'expérience, il est ainsi recommandé de solliciter, auprès du producteur de déchets, une demande d'acceptation préalable, au moins une semaine avant la date prévisionnelle du démarrage du chantier, comprenant les éléments suivants :

- informations administratives sur le demandeur, le producteur des déchets, et le ou les transporteurs ;
- informations relatives au type de chantier et son calendrier prévisionnel, à la classification et la quantification des déchets.

### Remarque :

En région parisienne, la qualité des remblai reçus ne pose généralement pas de problème car il existe peu de solutions d'évacuation des terres provenant des chantiers en cours et la menace de leur exclusion est fortement dissuasive (ce n'est pas forcément le cas en dehors de la région parisienne).

## 7.2 Nature et granulométrie

Lorsque des déchets inertes arrivent sur un site, les caractéristiques importantes sont la nature et la granulométrie. Or, la composition et la granulométrie des déchets inertes sont assez variées. Il peut s'agir par exemple de matériaux plus ou moins grossiers résultant des travaux publics ou issus du secteur du bâtiment.

Notons d'abord que les blocs de grandes dimensions (supérieurs à 50 cm, pour ordre de grandeur) sont à proscrire afin de laisser un minimum de vides résiduels. Pour les mêmes raisons, il peut être demandé que les matériaux issus de démolitions préalablement triées soient mélangés à des terres et n'excèdent pas de l'ordre de 20% du total des matériaux de remblayage mis en place dans les galeries.

Compte tenu de la technique de mise en place du remblai (le plus souvent poussés par des engins depuis le souterrain), Il est indispensable que le matériau soit apte au terrassement (« pelletable »), c'est-à-dire ni liquide, ni boueux.

Aucune étude ne propose de recommandations sur les caractéristiques géomécaniques pour les remblais en carrière souterraine mais l'analyse bibliographique et les retours d'expérience actuels montrent que, en carrières souterraines :

- de manière générale, les déchets inertes sont favorables à la stabilité s'ils sont peu argileux, si les éléments qui les constituent sont suffisamment résistants à l'écrasement et si leurs caractéristiques mécaniques n'évoluent pas après la mise en œuvre [6]. À titre d'exemple, certaines marnes, fortement consolidées lorsqu'elles sont en place, perdent leur résistance une fois extraites et remaniées ;
- il est primordial que les caractéristiques géotechniques des matériaux de remblayage en carrière souterraine ne soient pas altérables par la présence éventuelle d'eau (remontée de nappe, eaux d'infiltration). Afin d'assurer la pérennité du remblai dans le temps, celui-ci ne devra pas renfermer de matériaux solubles de type évaporites (sel, gypse, anhydrite), à l'exception du cas spécifique des carrières de gypse ou d'anhydrite. En second lieu, en vertu de l'arrêté du 22 septembre 1994 qui stipule que l'écoulement des eaux ne doit pas être perturbé par le remblayage, celui-ci devra également obéir au concept de « transparence hydraulique », c'est-à-dire ne pas opposer de résistance à l'écoulement des eaux. On évitera alors les remblais « massifs » et on optera plutôt pour des matériaux drainants présentant une forte perméabilité (blocs rocheux, graves, sables) mais sans toutefois contenir d'éléments trop fins (limons) susceptibles d'être emportés à terme par les éventuelles eaux en circulation ;
- au cas où la teneur en eau du matériau serait trop élevée, il est envisageable de réaliser sur site un mélange de remblais humides avec du matériau plus sec (d'où l'intérêt d'une plateforme d'accueil des remblais) ;
- les matériaux utilisés en remblai dans les carrières souterraines ont généralement un angle de frottement de l'ordre de 30 à 40° et une faible cohésion ;
- pour le talutage du remblai, il n'y a pas de pente prédéfinie à respecter (*les hauteurs limitées de secteurs remblayés, 8-10 m au maximum par passe, et l'absence de talus « libres », les zones remblayées étant le plus souvent contraintes par 3 faces de piliers ou de parements, les configurations d'instabilité de pente sont peu probables*). Pendant la phase de remblayage, la pente doit toutefois être compatible avec la circulation des engins de chantier ;
- le remblai en place est normalement surconsolidé, peu évolutif dans le temps. La couche superficielle de remblai assure la stabilité et la résistance de la voie d'accès des engins mécaniques. Elle est souvent plus compactée, en raison de l'effet dynamique créé par la circulation des engins [32].

Soulignons que dans une carrière souterraine où le remblayage est pratiqué depuis plusieurs décennies, des essais de laboratoire ont mis en évidence le caractère hétérogène du remblai « en place », en termes de composition granulométrique, de teneur en eau et de caractéristiques mécaniques [12], sans pour autant révéler de signes d'instabilité.

#### **Remarques sur le « Guide des Terrassements Routiers », dit GTR :**

Comme dans le guide pour le remblayage des carrières à ciel ouvert [10], il serait possible de s'inspirer de la classification des matériaux du « Guide des Terrassements Routiers », dit GTR, réalisé par le SETRA et le LCPC [33] (Annexe C et Annexe D) pour gérer, en souterrain, l'affectation des matériaux dans les différentes parties du remblai. Toutefois, en général et d'après les retours d'expérience, les configurations rencontrées en carrière souterraine (volume et hauteur de remblai plus faibles, confinement des remblais entre parois de galeries) se prêtent moins aux phénomènes de glissement de talus qui sont connus et redoutés pour les verses des carrières à ciel ouvert et pour lesquels le rapprochement au GTR est nécessaire.

À noter que si l'on se rapporte à cette classification (annexe D), on peut d'ores et déjà évoquer que la grande majorité des déchets de travaux publics arrivant en carrière appartiennent aux catégories A (sols fins), B (sols sableux et graveleux avec fines), C (sols comportant des fines et des gros éléments), et R (roches). Il est rare de constater l'approvisionnement de matériaux insensibles à l'eau (D), ceux-ci, de par leur propreté, étant généralement réemployés et non mis en dépôt.

Plus les chantiers de provenance sont importants en taille, et/ou disparates, plus les matériaux se sont mélangés au préalable, selon l'historique du site où les travaux publics ont été entrepris (présence

d'anciens remblais par exemple), ou se mélangent durant le stockage en zone source ou lors de l'arrivée et le déversement sur le site de la carrière.

On peut ainsi considérer que la catégorie C est la plus représentée. Ce sont des matériaux dont le diamètre maximal des éléments constitutifs dépasse 50 mm, mais dont le comportement géotechnique et l'aptitude au terrassement sont intimement liés à la proportion de matériaux de dimension inférieure à cette valeur de 50 mm qui les constituent. Si cette proportion est supérieure à 60-80 %, le matériau est régi par les matériaux fins à graveleux, de catégorie A ou B. Si elle est inférieure à 60-80 % ce sont les éléments grossiers qui régissent le comportement du matériau et son aptitude au terrassement.

### 7.3 Matériaux refusés

D'après les retours d'expérience actuels [19] et la réglementation en vigueur, les matériaux suivants sont refusés comme remblai en carrières souterraines :

- les déchets dangereux listés à l'annexe 2 de l'article R. 541-8 du Code de l'Environnement relatif à la classification des déchets dangereux ;
- les déchets ménagers ou assimilés ;
- les encombrants ;
- le bois ;
- les huiles ;
- les métaux ;
- le plâtre (sauf rebus de fabrication de l'usine plâtrière) ;
- les emballages (plastiques, polystyrène, papiers, cartons) ;
- les déchets organiques fermentescibles (déchets de tonte d'espaces verts) ;
- les déchets non pelletables, dont les liquides et les boues, y compris celles de l'industrie des bétons ;
- les déchets de flocage, calorifugeage, faux-plafonds contenant de l'amiante et tout autre matériau contenant de l'amiante friable ;
- les déchets d'amiante-ciment ;
- les déchets d'amiante ;
- les dalles vinyle-amiante ;
- la peinture au plomb ;
- les déchets du second œuvre (tuyauterie, menuiserie, câblage, chauffage, revêtement de sol, complexe d'étanchéité...) ;
- les enrobés bitumineux contenant du goudron (notamment les enduits de surface des parkings, et voies d'accès d'avions, de poids lourds, d'engins agricoles, les gares routières, et les aires de services) ;
- les déchets industriels provenant d'installations classées ;
- les déchets radioactifs ;
- les déchets non refroidis, explosifs ou susceptibles de s'enflammer spontanément.

### 7.4 Cas des carrières de pierres ornementales

Certaines carrières souterraines qui exploitent des pierres ornementales (calcaire, marbre...) utilisent leurs propres déchets de taille (déchets de sciure et blocs non commercialisables ou encore fraction fine des matériaux extraits concassés) pour remblayer leurs galeries souterraines.

De fait, la nature du remblai sera la même que la roche encaissante mais avec des caractéristiques « mécaniques » moindres car le matériau est remanié.

Notons toutefois que le volume de déchets de taille n'est, dans la plupart des cas, pas suffisant pour remplir la totalité des cavités existantes (Figure 6 suivante et Figures 17 plus avant), ce qui limite son efficacité. Le remblayage est ainsi priorisé sous des enjeux de surface, dans des zones souterraines particulièrement instables ou encore dans des parties de carrière qui ne servent plus.



Figure 6 : Exemple de remblayage « peu efficace » avec des déchets de taille dans une carrière de pierres ornementales

## 8 Techniques de mise en place des remblais

Le remblayage direct à partir du souterrain consiste à combler une cavité souterraine, par la mise en place de remblai, souvent à sec. Ils existent diverses techniques de remblayage en souterrain. Le choix va dépendre :

- des conditions d'accessibilité en souterrain par des engins mécanisés (camions, chargeurs, bulldozers, convoyeurs à bande...) et de sécurité des opérateurs ;
- des matériaux de remblayage disponibles et des moyens de transports adaptés ;
- des caractéristiques géométriques des cavités souterraines et des conditions opératoires (hauteur des galeries, profondeur, topographie, environnement, etc.) ;
- des aspects financiers.

En fonction des machines utilisées pour le transfert des matériaux de remblayage, le système de remblayage peut être classé en deux catégories :

- acheminement par passage d'engins mécanisés ;
- acheminement automatisé par convoyeurs.

Les principaux avantages et inconvénients de chaque technique sont détaillés ci-après. Le type de remblayage retenu doit permettre de remblayer les vides exploités à un rythme compatible avec le calendrier d'exploitation.

### 8.1 Acheminement du remblai par des engins mécanisés

#### 8.1.1 Rôle et principe

Il s'agit d'une technique de remblayage, simple, par mise en place, à sec, de produits acheminés et déversés par des engins mécaniques (camions, chargeurs et bulldozers). Ce mode de remblayage est principalement utilisé pour remblayer les grandes cavités souterraines accessibles, bien ventilées et peu dégradées (Figure 7 et Figures 8).

La mise en place du remblai par des engins mécanisés est une méthode non destructive et non agressive qui permet de remblayer le plus possible le volume des vides souterrains par divers matériaux bruts et sans ajout de liant hydraulique.



*Figure 7 : Déversement dans la carrière souterraine de Livry-Gargan (95)*



*Figures 8 : Remblayage direct par le fond avec des engins mécanisés dans la carrière de gypse de Montmorency (95)*

### 8.1.2 Domaines d'utilisation

La mise en place du remblai par des engins mécanisés est parfaitement adaptée à tous types de massif rocheux (calcaire, craie, gypse...) et permet de soutenir la masse rocheuse environnante, de renforcer les piliers destinés à soutenir les terrains sus-jacents, de sécuriser les activités de production et d'atténuer le risque d'affaissement du sol en surface.

Ce mode de remblayage en souterrain n'est pas adapté à toutes les configurations de site d'exploitation. Compte tenu des contraintes de rendement (mécanisation intensive) et de sécurité du personnel, cette méthode n'est envisageable que si elle reste économiquement favorable au regard des conditions suivantes :

- état des ouvrages : la carrière devrait être la moins dégradée possible afin que les risques pour la sécurité du personnel et les coûts supplémentaires de protection ne soient pas trop importants. Il est, en effet, souvent nécessaire de déterminer les zones à remblayer avant la mise en place des terres en souterrain et d'effectuer une première phase préparatoire de mise en sécurité minimale du site par purge des blocs instables, abattage des parements dangereux ou boulonnage localisé des zones dégradées du toit ou des piliers. Le remblayage peut alors s'opérer sans difficulté ;
- aspects dimensionnels et accessibilité : les galeries et chambres d'exploitation doivent être suffisamment grandes en hauteur et en largeur (au minimum 4 m de largeur et 3,5 m de hauteur) pour permettre le passage des engins. Dans certains cas, il est possible d'envisager des engins de taille plus petite (au moins 2 m de largeur et plus de 2,5 m de hauteur), mais avec de performances moindres. L'accès à la carrière nécessite une entrée de plain-pied, en cavage, pour permettre le passage des engins ;
- aspect ventilation : des conditions d'hygiène et sanitaires de l'atmosphère sont exigées pour le personnel opérateur de remblai. Elles consistent à assurer une ventilation suffisante des chantiers et à lutter contre les poussières émises par l'exploitation et les opérations de remblayage [35]. Le principe général est d'apporter de l'air frais en quantité suffisante vers toutes les parties de la carrière en activité via des ventilateurs principaux (Figure 9) et secondaires (ventubes) et d'évacuer l'air usé vers la surface à travers des ouvrages (puits) de retour.

Il est à noter que de telles conditions de sécurité sur ces chantiers (accessibilité, confortement, repérage, aérations...) supposent l'expertise de sociétés spécialisées ayant une connaissance et une maîtrise des travaux en souterrains qui préconiseront d'éventuels travaux préliminaires.



Figure 9 : Exemple de ventilateurs couplés en carrière souterraine

### 8.1.3 Mise en œuvre

La mise en œuvre proprement dite du remblayage en souterrain à l'aide d'engins mécanisés est relativement simple. Elle consiste en :

- une éventuelle phase préparatoire (boulonnage, purge...) de la zone à remblayer et des galeries d'accès ;
- l'acheminement direct des produits en souterrain, par camions, via les galeries d'accès ;
- le déversement du remblai au sol de la galerie, si la hauteur de celle-ci est suffisante (Figure 7) :
  - dans le cas de secteurs de petite hauteur, le sol de la galerie peut être localement surcreusé, pour permettre aux camions de décharger les remblais. Il est également possible d'utiliser des camions avec des bennes à éjecteur (Figures 8) qui permettent de s'affranchir de la hauteur de galerie ;
  - dans le cas de secteurs de grande hauteur ou repris en sous pied, les remblais sont mis en place en deux passes de déversement successives afin d'optimiser la reprise et le poussage de remblais et de limiter la longueur des rampes.
- la reprise par des bulldozers, des bouteurs ou des chargeurs (Figures 8) sur chenilles, qui par une rampe aménagée sur le remblai déjà mis en place, poussent les matériaux, les amènent jusqu'en couronne des galeries à remblayer (bourrage final, Figure 10 à Figure 12) et les stabilisent grâce à plusieurs passages répétés ;
- un éventuel traitement final par clavage lorsque le compactage du remblai utilisé ne garantit pas la stabilité des terrains sus-jacents. Cette opération empêche normalement tout mouvement perceptible en surface, dans des zones destinées à la construction et prévient toute rupture des bancs de toit.

Il n'y a pas de compactage proprement dit : le tassement du matériau s'effectue par passages successifs et répétés de l'engin de poussage. Les matériaux sont poussés jusqu'au toit de la galerie en veillant à ne pas toucher les parois rocheuses.



Figure 10 : Exemple de remblayage au sein de la carrière de gypse de Grozon (39)



Figure 11 : Front de remblayage au sein de la carrière de gypse de Montmorency (95)



Figure 12 : Exemple de remblayage au sein d'une carrière de gypse (77)

La stratégie de remblayage consiste souvent à mener plusieurs chantiers de remblayage parallèlement, en rabattant sur les entrées. Une attention particulière doit être apportée au poussage des remblais à l'« arrière » des piliers. En effet, tout le pourtour des piliers doit être recouvert de remblai (et pas uniquement les parements parallèles aux travées de remblayage) ; l'objectif étant de laisser le minimum de vide en souterrain.

Il est possible de prioriser les zones à remblayer en fonction de critères définis à l'avance (notamment en termes de stabilité). Un plan de remblayage est indispensable pour gérer au mieux le flux de matériaux de remblai, les zones sensibles en termes de stabilité, les cheminements d'accès aux chantiers de remblayage, aux chantiers d'exploitation qu'ils soient actuels ou à venir.

Certains exploitants mettent également en place, simultanément, 2 quartiers distincts de remblayage (l'un plus éloigné de l'entrée que l'autre) pour mieux répartir les engins de transport et éviter les risques de saturation de points de déversement (en contrepartie, les conditions d'aération doivent intégrer cette spécificité).

Pour la sécurité et la qualité du remblayage, l'équipe en charge des opérations de remblayage comprend notamment un « placier » dont le rôle consiste à accueillir (au point de déversement en souterrain ou sur la plateforme de transit en surface) et à orienter le déchargement des camions de terrassement. Il vérifie (contrôle visuel et olfactif) également le matériau de remblai avant et après son déchargement. Si le contenu ne correspond pas au type de déchet prévu, le matériau est refusé et repris.

Les camions circulant en souterrain doivent respecter la réglementation notamment le RGIE<sup>2</sup> (moteur thermique et extinction automatique en particulier) mais également les consignes et règles de sécurité diffusées par l'exploitant (tonnage et vitesse limités, interdiction de descendre du camion, masque auto-sauveteur et moyens de communication adaptés au souterrain<sup>6</sup> obligatoires...). Ces règles doivent être

<sup>6</sup> Talkie-walkie par câble rayonnant ou poste de téléphone fixe.

détaillées, soit dans un plan de prévention, soit dans un protocole de chargement/déchargement spécifique.

Pour éviter les confusions et les accidents, il est recommandé de préparer et de baliser (barrières, fléchage, éclairage, panneaux d'affichage, panneaux de signalisation...) à l'avance le sens de circulation des camions au sein de la carrière en veillant :

- à séparer le flux des camions entrant, de celui des camions sortants ;
- à distinguer, si possible, les voies de circulation des engins liés à l'exploitation proprement dite de la carrière, de celles des engins liés aux opérations de remblayage.

Les pistes doivent être dimensionnées, bien entretenues et empruntées par un personnel averti.

La mise en place d'une plateforme de transit (pour le stockage temporaire du remblai) permet d'assurer une meilleure organisation des opérations de remblayage. Il s'agit de quais de déchargement, en surface de préférence, destinés à recevoir les camions extérieurs et à alimenter, via une chargeuse, les camions-benne adéquats aux opérations de remblayage en souterrain. Cette solution nécessite un investissement financier et foncier mais permet d'apporter une sécurité supplémentaire au site (seul du personnel formé et équipé, et des engins adaptés sont autorisés à pénétrer dans la carrière souterraine). Il s'agit d'une plateforme de transit, elle n'a pas vocation à stocker du matériau au-delà d'une journée, afin notamment d'éviter d'exposer le matériau aux intempéries (pluie, vent).

#### **Remarque :**

Notons que dans certaines mines souterraines (anciennement exploitées), le remblayage à l'aide d'engins mécanisés pouvait être complété d'une phase finale, par l'intermédiaire de personnel qualifié qui, muni de lances, projetait du remblai mélangé à de l'eau afin d'améliorer le comblement des vides résiduels au sein du remblais. Cette pratique, particulièrement adaptée aux configurations de mines souterraines (galeries étroites et de hauteur limitée) n'a plus cours dans les carrières souterraines actuelles.

### **8.1.4 Principaux avantages et inconvénients**

La méthode est plutôt simple, peu onéreuse et fiable. Cette technique peut être qualifiée de « douce », car il n'y a pas d'utilisation de pression, ni d'eau. Il est important de souligner que cette méthode peut également s'adapter à tout type de terrain et est opérable à toutes profondeurs.

La gamme très étendue des matériaux utilisables et l'absence de traitement préalable ou d'adjonction d'autres produits sont des points économiquement avantageux.

Il est nécessaire d'avoir des conditions de site favorables : les accès doivent être suffisamment grands pour permettre le passage des engins. La technique sera donc difficilement opérable en carrières de petites dimensions ou de géométrie complexe. Enfin, les conditions de travail peuvent s'avérer pénibles voire dangereuses (risque de chute de blocs, d'éboulement et/ou atmosphères nocives, insalubres...). Elles exigent donc un personnel compétent et qualifié.

L'utilisation et la mise en place de remblai par engins depuis le souterrain peut présenter un coût inférieur aux autres méthodes de remblayage. Elle offre également l'avantage de la maîtrise des volumes à combler, du fait de la possibilité de cibler une partie du site pour le remblayage, par l'installation de murs au préalable, lorsque les vides sont accessibles et présentent un état général satisfaisant.

## **8.2 Acheminement automatisé du remblai par un convoyeur**

### **8.2.1 Rôle et principe**

Les systèmes de convoyeurs peuvent être utilisés pour transporter des matériaux de remblayage dans des exploitations souterraines (ou à ciel ouvert) et ils sont particulièrement utilisés dans les exploitations minières. Nous n'avons pas trouvé d'exemples d'utilisation de convoyeurs dans des carrières souterraines et le retour d'expérience ci-après ne concerne que les mines souterraines (mines de charbon en Chine essentiellement).

Le principe de fonctionnement d'un convoyeur à bande consiste à mettre en mouvement une bande transporteuse afin de déplacer en continu du remblai depuis un point A vers un point B. La bande transporteuse est contrôlée en permanence avec des caméras et des systèmes d'alerte pour assurer la sécurité de l'activité de remblayage. Elle peut transporter des matériaux extérieurs inertes de toutes sortes. La taille maximale des agrégats peut être très grande (généralement de 15 à 30 cm), mais elle ne doit pas dépasser 1/5<sup>ème</sup> de la largeur du convoyeur afin d'éviter les déversements latéraux [24].

Un système de convoyeur vertical continu est généralement utilisé pour le transport des matériaux solides de remblayage. Ensuite, l'acheminement vers le site de remblayage souterrain s'effectue par un convoyeur à bande et un dispositif de remblayage en place s'occupera de combler les vides [42]. Les principes de base de ce mode de remblayage sont illustrés sur la Figure 13.

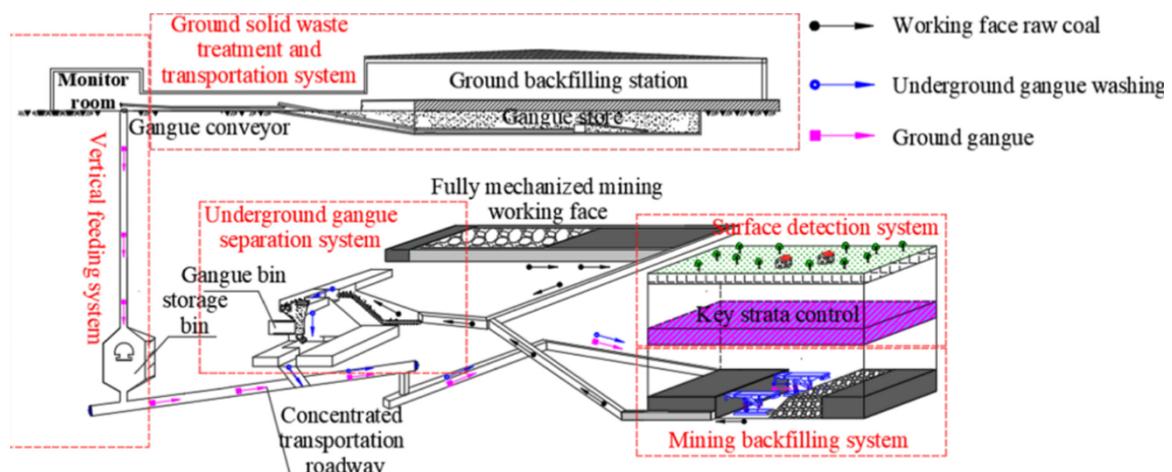


Figure 13 : Principe de base de la technique de remblayage entièrement mécanisée [43]

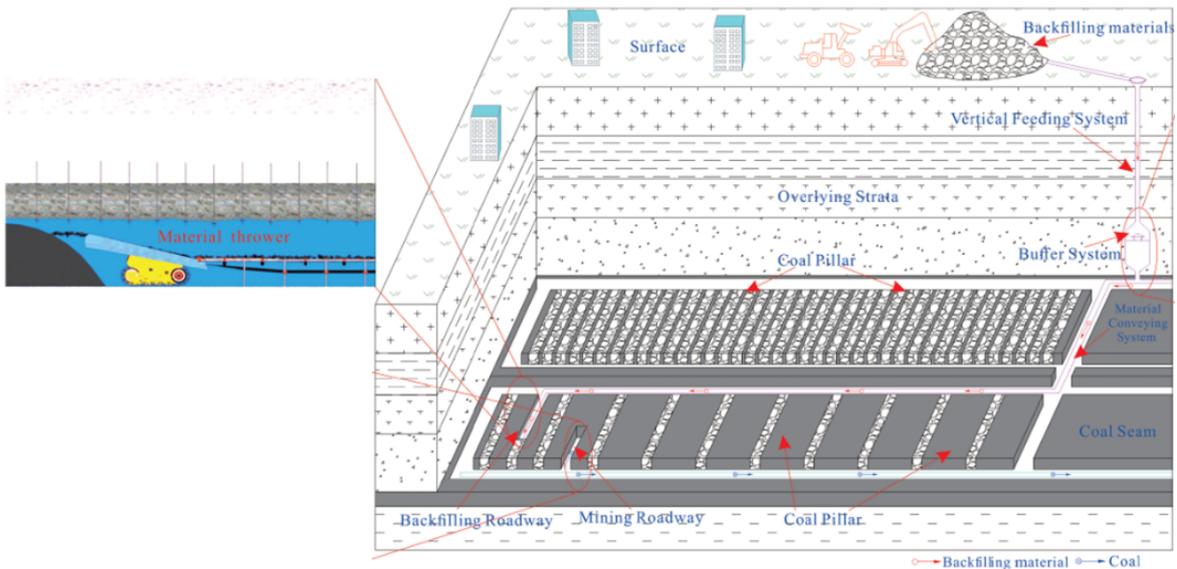
## 8.2.2 Champs d'application

Cette technique automatisée est le plus souvent utilisée sur des sites ne disposant pas d'un espace et d'un accès suffisant pour accueillir des équipements de grande taille, comme c'est le cas pour les configurations de type chambre et pilier. Cependant, un chemin d'accès linéaire et direct à la zone de remblayage est requis pour limiter le nombre de composants de circulation nécessaires à l'installation.

## 8.2.3 Mise en œuvre

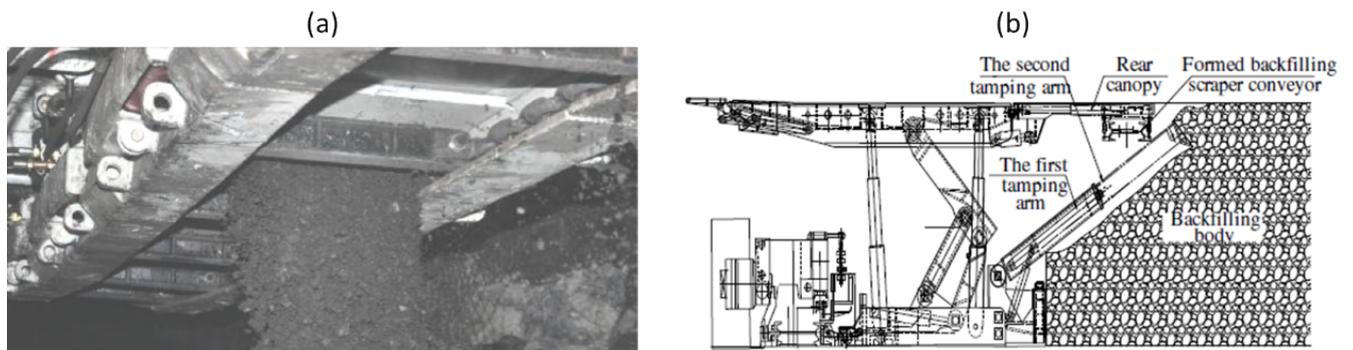
Plusieurs options de mise en place du remblai peuvent être employées selon la configuration du site d'exploitation et le coût d'investissement :

- 1<sup>ère</sup> option : à la sortie du convoyeur à bande, les matériaux de remblayage sont chargés dans des camions-bennes qui font des allers-retours entre la zone de déversement en souterrain et la zone à remblayer. Les vides sont ensuite remplis en poussant le remblai avec un bulldozer. Cette option est la plus réalisable car elle permet de réduire les risques liés au prolongement successif du convoyeur et de s'appuyer sur les engins mécaniques en cas de difficultés ponctuelles rencontrées dans la mise en service du convoyeur ;
- 2<sup>ème</sup> option : l'orifice de déchargement du convoyeur (accroché au toit des galeries) débouche directement dans la zone à remblayer. Le convoyeur et son orifice peuvent être déplacés et allongés au fur et à mesure de la progression du remblayage. Le remblai est ensuite ramassé et poussé par un bulldozer ou projeté par une lance (Figures 14) ;



Figures 14 : Principe de la technique de remblayage par un système de convoyeurs et lance de projection [45]

- 3<sup>ème</sup> option : il s'agit d'une technologie récente comprenant un système de support hydraulique relié directement au convoyeur et spécialement conçu pour auto-combler les vides. Ce dispositif est équipé de bras situés à côté de l'orifice de déchargement du convoyeur, qui se relaient pour pousser et compacter les matériaux déchargés (Figures 15). Cette technologie avancée est récemment appliquée dans des sites d'exploitation minière de charbon en Chine ;



Figures 15 : Principales composantes du dispositif de remblayage entièrement automatisé : a) déchargement du matériaux et b) support articulé, relié à l'orifice de déchargement, et permettant de combler les vides [42]

- 4<sup>ème</sup> option : à la sortie du convoyeur à bande, l'utilisation d'un camion télépiloté capable de charger, transporter et décharger les matériaux de remblayage est en cours d'essai dans plusieurs exploitations minières souterraines en Australie, Suède, Canada, Chili et Afrique du Sud [22]. Ces camions peuvent être pilotés manuellement ou automatiquement. Le chargement du remblai est généralement effectué à distance depuis une salle de contrôle (Figures 16) et le système automatique sert principalement au transport vers la zone de remblayage et au compactage. Ce système permet à l'opérateur de contrôler simultanément, depuis la surface, jusqu'à 3 camions en souterrain, ce qui augmente à la fois la productivité et la sécurité du personnel.



Figures 16 : a) Navigation d'un camion automatique de chargement, transport et déchargement dans une mine souterraine complexe via une opération à distance, b) Opérateur contrôlant le camion souterrain depuis la surface ©TeleOp Multi

#### 8.2.4 Principaux avantages et inconvénients

L'installation d'un convoyeur à bande permet de transporter de grandes quantités de remblai en souterrain (augmentation de la productivité) et de préserver l'environnement en limitant les émissions de CO<sub>2</sub> causées par le flux de camions.

Un convoyeur bande peut assurer le transport de remblai sur de longues distances (une seule machine ou plusieurs machines connectées en série pour former une ligne de transmission à grande distance). Il permet également de réduire le besoin en main d'œuvre en souterrain, leur déplacement et ainsi d'améliorer la sécurité du personnel.

Bien que les coûts d'investissement associés à l'installation de ce mode de remblayage puissent être similaires ou supérieurs à celui des camions de transport, des économies importantes peuvent être réalisées en coûts de fonctionnement sous réserve d'un entretien régulier du matériel.

La mise en place d'un convoyeur à bande sur de longues distances (plusieurs kilomètres) reste confrontée à des difficultés techniques. Elle nécessite un cheminement rectiligne ou à légères inclinaisons et une configuration minutieuse pour un fonctionnement fiable. Chaque ligne de transmission du convoyeur est fixe et complexe à modifier. S'il faut changer souvent l'emplacement des points de chargement et de déchargement, il est nécessaire de d'installer le convoyeur sur un rack spécial et d'utiliser son mouvement pour s'adapter aux exigences de livraison.

De plus, certains matériaux ne sont pas aussi faciles à transporter par un convoyeur que le sable ou le gravier. Soulignons aussi que chaque type de convoyeur ne peut généralement transporter que certains matériaux et avec une certaine capacité de transport.

#### 8.3 Cas des carrières de pierres ornementales

Dans le cas des carrières souterraines de pierres ornementales (calcaire, marbre...) qui mettent en œuvre le remblayage avec leurs propres déchets de taille et leurs engins habituels d'exploitation (Figures 17), les blocs ou pierres, qui n'ont pas vocation à être commercialisés, sont imbriqués les uns sur les autres ou entreposés en souterrain plutôt que transportés en surface. Les matériaux sont poussés dans des galeries en cul de sac, ou encore ponctuellement sous des enjeux (voirie par exemple).

Ces remblayages font rarement l'objet de procédures bien cadrées. Il n'y a, a priori, pas de personnel dédié à cette tâche à plein temps (pas de placier) et le temps consacré ne permet pas une mise en place optimisée. Il n'y pas de clavage et le volume de vide résiduel en toit de galerie peut être conséquent.



Figures 17 : Exemples de remblayage avec des déchets de taille en carrières de pierres ornementales

## 8.4 En situation d'urgence

En cours d'exploitation, si certaines zones sont identifiées comme plus instables que d'autres (toit ou pilier fragile, parements décollés, poche karstique, fracture défavorable, ...), une sécurisation par une opération de remblayage plus rapide (situation d'urgence, relativement aux autres opérations courantes et régulières de remblayage) peut être mise en œuvre après avoir adapté les consignes de sécurité dans ces zones (circulation, boulonnage, plan de secours...).

Dans ces cas de figure, il est recommandé :

- de noter, de cartographier et de conserver l'historique de ces secteurs détectés comme instables ;
- de prévoir un volume de remblai disponible pour ces situations d'urgences (volume correspondant à un ou deux carrefours remblayés).

Si une zone est considérée comme trop dangereuse pour la sécurité du personnel et des engins de remblayage, il doit être envisagé une modification ponctuelle du mode opératoire de remblayage voir de recourir à d'autres techniques de remblayage, plus automatisées ou depuis la surface (forages, injections...).

## 8.5 Performances

L'efficacité de ces opérations de remblayage depuis le souterrain est directement liée aux caractéristiques de granulométrie du matériau de remblai et à la qualité de sa mise en place et notamment son compactage de façon à minimiser les tassements différentiels inévitables après leur mise en place.

En effet, un remblayage optimum peut être effectué si la granulométrie du remblai est suffisamment étalée, entre silts et petits blocs (en veillant à ce qu'il ne soit pas mis en place plus de 20 % de blocs de taille supérieure à 20 cm, valeurs à prendre comme ordre de grandeur). Toutefois, un tassement différentiel du remblai reste inéluctable, mais par retours d'expérience, le vide résiduel qui en résulte n'est au maximum que de quelques dizaines de centimètres et le plus souvent, en exploitation souterraine en activité, conforme aux objectifs de sécurisation visés.

La mise en place de remblai depuis le souterrain permet de maîtriser au mieux les volumes remblayés, de contrôler avec précision la qualité du traitement et dans certains cas de limiter les emprises traitées.

La mise en place de déchets inertes (comme ceux du BTP) pour le remblayage des carrières s'avère délicate en pratique. Plusieurs paramètres rentrent en compte :

- difficulté à trouver des matériaux, l'idéal est la récupération de matériaux de déblais issus de grands chantiers (terrassement, creusement de souterrain) situés à proximité ;
- économique : les matériaux sont un peu moins chers, mais « ne sont pas gratuits ». Il faut également compter les frais de mise en place. Notons que quelquefois la société paie pour se décharger de ses matériaux ;
- difficulté de gérer des déchets issus de chantier de taille moyenne, il faut un apport suffisant pour que ce soit rentable. Les entrepreneurs de ces chantiers ont à traiter généralement des déchets de classes différentes et donc il est nécessaire d'avoir un contrôle strict des produits entrants. De plus, il ne peut s'agir que d'entrepreneurs locaux car il n'est pas rentable pour l'entrepreneur de devoir se déplacer sur une distance trop importante (en dehors des horaires de chantier).

## 9 Critères de réaménagement du site

L'Union Nationale des Producteurs de Granulats (UNPG) a mené en 2016 une enquête sur le réaménagement de carrières (à ciel ouvert et souterraines) ayant recours au remblayage, afin d'analyser les éventuels changements d'usage des sols ainsi réaménagés [20]. Il en ressort que le recours au remblayage permet surtout de restituer des terres agricoles, de créer des zones à vocation paysagère et d'offrir des îlots de biodiversité (Figure 18). Mais la part de réalisation de plateformes industrielles ou artisanales n'est pas anodine, notamment les projets d'implantation d'ouvrages destinés à la production d'énergie renouvelable (éoliennes, panneaux photovoltaïques) sont en plein essor.

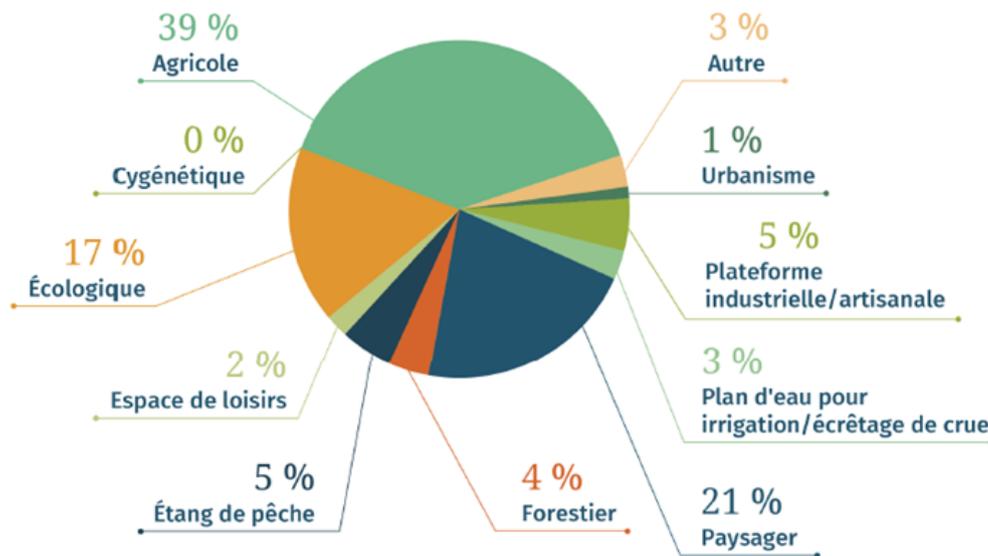


Figure 18 : Finalité du remblayage des carrières [20]

Quel que soit le type d'aménagement final de la surface, il est préférable que sa destination et son usage soient choisis et concertés si possible au début de l'exploitation du site et en tout état de cause, avant les phases de remblayage. Il doit faire l'objet d'une étude spécifique et prendre en compte le site en lui-même mais aussi d'autres critères comme son environnement (urbain ou rural), son accès, les bénéfices de l'aménagement, la présence d'eau, etc. Le remblayage et le réaménagement du site seront idéalement réalisés de manière simultanée et coordonnée avec l'avancée de l'extraction.

La technique de mise en place du remblai est le critère principal qui conditionnent l'aménagement du site en surface. Elle dépend fondamentalement du niveau de mise en sécurité que l'on recherche pour la destination des terrains de surface (zones bâties ou à urbaniser).

Le remblayage des vides avec clavage (cf. §5.2) empêchera normalement tout mouvement perceptible en surface, dans des zones destinées à la construction ou déjà construites.

Tandis que le remblayage partiel ou total, mais sans clavage, sera limité aux espaces verts, zone de loisirs, terrains agricoles ou aux voiries. En effet, il bloquera toute évolution brutale des cavités mais n'empêchera pas les mouvements de surface de type affaissement ou tassement. Ces mouvements de surface ne sont pas préjudiciables à l'utilisation du site ou à la sécurité publique.

## 10 Contrôles

Contrairement aux versants des carrières à ciel ouvert, la stabilité des fronts de remblai en carrière souterraine est rarement problématique dans la mesure où les volumes et les hauteurs de remblai sont moindres et où la présence de parements rocheux « en place » assurent un support et un confinement au remblai.

Actuellement, aucune étude ne propose de recommandations pour le contrôle de la qualité géomécanique des matériaux de remblai en carrière souterraine (mise en place et pérennité dans le temps). Mais les pratiques et procédures d'admission de terres extérieures mises en place par les exploitants méritent d'être présentées ici pour assurer la traçabilité.

Ces informations restent toutefois au stade d'observations ; les éventuelles données relatives aux caractéristiques géomécaniques des matériaux étant difficilement contrôlables (*en général, des essais*

*sont réalisés au début des opérations de remblayage sur des échantillons représentatifs ; de nouveaux essais ne sont alors plus entrepris dans la mesure où le flux de remblais reste qualitativement proche de celui testé initialement).*

Les contrôles environnementaux, qui ne font pas l'objet de ce guide, ne seront évoqués que très brièvement.

## 10.1 Avant l'arrivée des déchets inertes sur site

Au moins une semaine avant la date prévisionnelle du démarrage du chantier, une demande d'acceptation préalable permet de s'assurer de la bonne qualité des terres extérieures en s'appuyant notamment sur les études de sols et sous-sols qui, le cas échéant, ont été réalisées.

Cette demande d'acceptation comprend :

- des informations administratives sur le demandeur, le producteur des déchets, et le ou les transporteurs ;
- des informations relatives au type de chantier et son calendrier prévisionnel, à la classification et la quantification des déchets.

Cette demande préalable peut inclure (notamment pour les chantiers supérieurs à 10 000 m<sup>3</sup>) une visite sur le chantier, préliminaire aux apports, par le contrôleur qualité et/ou le responsable commercial de l'entreprise sous-traitante chargée des opérations de remblayage.

## 10.2 À l'entrée des déchets inertes sur site

À l'arrivée du camion chargé (au poste d'accueil), un bon de dépôt est exigé, établi par le producteur des matériaux et complété par les intermédiaires éventuels, indiquant notamment la date, le chantier de provenance, le numéro d'immatriculation du camion et l'identité du transporteur.

Ce bon est complété à l'accueil du site, par l'ajout du type de matériaux, du volume et du poids (contrôle à la bascule) de la benne. Il sert d'accusé de réception : l'exploitant conserve ce document qui est intégré dans un registre des admissions et des refus.

Afin de permettre la traçabilité des matériaux entrants, toutes ses informations doivent être enregistrées et un suivi informatique est fortement recommandé. Un registre d'acceptation ou de refus des matériaux extérieurs peut ainsi être tenu à jour avec justification, nature et destination des matériaux.

Enfin, un premier contrôle visuel est indispensable à l'entrée du site (avec si possible un enregistrement avec caméra du chargement et de la plaque d'immatriculation). De fait, le camion doit se présenter débâché.

En cas d'un chargement de produits non inertes ou mélangés en trop grande quantité, le remblai est refusé. Le refus est enregistré et consigné dans un registre avec les date et heure d'arrivée, identification du client, plaque d'immatriculation du camion, nom du transporteur, provenance du chantier et les éventuelles observations (justifiant le refus notamment).

Si le chargement paraît douteux mais ne permet pas un refus catégorique, le préposé à la bascule en avertit le contrôleur-qualité et/ou le placier et/ou les conducteurs d'engins en leur spécifiant le chargement (immatriculation, transporteur, société) afin qu'un contrôle complémentaire soit effectué en phase suivante.

## 10.3 Lors du déversement des terres extérieures

Le déversement des terres extérieures peut s'effectuer sur la plateforme de dépotage en extérieur ou directement en souterrain. Dans tous les cas, un second contrôle visuel et olfactif des produits est effectué, à ce stade, par le placier et/ou les conducteurs d'engins.

Si des matériaux non conformes sont identifiés lors du déchargement, le poids lourd sera immobilisé, identifié et immédiatement rechargé.

Si des odeurs inhabituelles (odeurs fortes) sont perçues, le contrôleur-qualité en est averti, afin d'effectuer des analyses éventuelles et envisager la suite de l'acceptation des matériaux en provenance du chantier concerné. Si une pollution des matériaux est avérée, les matériaux seront rechargés et évacués du site.

Dans le cas de matériaux indésirables en quantité réduite (type bois ou ferrailles) ceux-ci devront être triés manuellement et mis dans des bennes spécifiques placées à proximité du lieu de déchargement. Pour cela, une benne pour chaque type de déchet est à prévoir (ferrailles, bois, plastiques, Déchets

Industriels Banals ou DIB...). Elles seront ensuite envoyées sur un CET de classe 2 pour évacuation dans la filière agréée de ces matériaux non admissibles.

#### 10.4 Lors du régalage des matériaux inertes

À ce niveau, se situe le dernier contrôle (visuel et olfactif), lors de l'étalement des matériaux et avant la mise en remblai, par les conducteurs d'engins.

Dans le cas de la présence ponctuelle de matériaux non inertes (bois, plastiques, ferraille...) un tri manuel sera réalisé. Ces matériaux triés seront mis dans une benne spécifique.

#### 10.5 Tout au long de l'opération de remblayage (contrôles statistiques ou inopinés)

Des visites régulières des zones de remblayage doivent permettre d'adapter les futurs travaux en fonction des différences entre le projet et la réalité - natures différentes de matériau, désordres, gestion des eaux (lors d'une phase dite « observationnelle »).

Des contrôles<sup>7</sup> mensuels (par l'exploitant ou le gérant de l'opération de remblayage) et semestriels (par un organisme extérieur) de la qualité chimique des matériaux d'apport sont conseillés pour chaque site afin de vérifier le caractère inerte des déchets.

Enfin, un contrôle sera réalisé en cas de suspicion de pollution avec blocage du chantier si nécessaire. En cas de contrôle positif, les terres suspectes et identifiées seront redirigées vers un centre approprié autre que la carrière souterraine.

#### 10.6 En fin de remblayage

En fin de remblayage (par secteur homogène), en parallèle du levé topographique régulier des secteurs d'extraction en activité, un plan d'avancement des secteurs remblayés doit être tenu à jour, avec une identification des zones remblayées chaque semaine (en lien avec les données du registre des admissions et des refus).

#### 10.7 Après remise en état du site

Dans des cas particuliers (enjeux en surface par exemple), le contrôle de l'efficacité du remblayage peut se faire également à l'issue des travaux. Après remise en état du site d'extraction et en fonction des enjeux en surface, il est possible de vérifier précisément le volume des vides au droit des zones comblées par sondages destructifs et diagraphies (mesures des paramètres et caractéristiques enregistrés pendant la réalisation des sondages). Dans ce cas, la réalisation des sondages doit être effectuée par des entreprises spécialisées.

En cas de restitution des terrains de surface à l'urbanisation ou d'enjeux existants et en fonction des propriétaires des terrains de surface, il convient de confirmer l'absence de vide résiduel pouvant entraîner des désordres en surface.

#### 10.8 Procédure de suivi

La procédure de suivi dont les étapes sont décrites ci-dessus permet d'assurer la traçabilité des terres extérieures depuis le chantier de provenance jusqu'à leur mise en dépôt définitive. Elle permet de suivre, à la journée, le nombre de camions et le volume foisonné de matériaux extérieurs ayant été mis en remblai dans la carrière.

Ce suivi régulier permet de vérifier la cohérence entre le volume de remblai mis en place et le volume de vide existant (en tenant compte du foisonnement du matériau : 0,78 pour les remblais des carrières de région parisienne par exemple).

---

<sup>7</sup> Il s'agit de prélèvement inopiné sur deux chargements de matériaux entrant dans l'exploitation. Ces prélèvements s'effectuent sur des chantiers en cours de terrassement (et en particulier ceux dont les volumes à excaver représentent au minimum 1 000 m<sup>3</sup> de terrain). Ces prélèvements, en double exemplaire, sont nécessaires aux analyses chimiques (hydrocarbures totaux, HAP (hydrocarbures aromatiques polycycliques), métaux, indice phénol, COT (Carbone Organique Total), sulfates et fraction soluble sur les lixiviats) qui ne font pas l'objet de ce guide.

Pour assurer une traçabilité totale, le plan d'avancement du remblayage doit être en étroite liaison avec le registre de suivi des déchets inertes : la zone de stockage des déchets doit être affectée (identification de la galerie ou du secteur à remblayer) et consignée pour chaque camion enregistré.

Lorsqu'une non-conformité est constatée, il convient de :

- adresser une « fiche de liaison » au responsable de la société-client mise en cause ;
- en cas de refus à l'accueil ou après rechargement du camion sur l'aire de remblayage, consigner les informations du bon de dépôt dans le registre ;
- concernant les produits indésirables qui sont triés manuellement sur l'aire de remblayage et mis dans une benne à déchets, conserver une copie du bon d'enlèvement et d'acceptation dans un CET de classe 2.

## 11 Points à examiner dans un dossier d'autorisation

Le Tableau 1 synthétise les grandes lignes des connaissances à acquérir relatives à la zone d'accueil des remblais (la carrière souterraine), aux remblais eux-mêmes et aux techniques de mise en œuvre, exposées aux chapitres 6, 7, 8 et 9.

Tableau 1 : Données à acquérir ou à compléter dans le cadre d'un remblayage en contexte de carrière souterraine en activité

Données à acquérir ou à compléter	Critères de spécificité/complexité Contexte	Investigations adaptées
Configuration géométrique de la carrière	Dimensions et accessibilité des cavités. <i>Exploitation, Post-exploitation</i>	Examen et analyse des documents (plans notamment) et études antérieurs sur la carrière. Observations sur site.
Stabilité de la carrière	Historique du site selon le contexte : Carrières appartenant successivement à différents exploitants, avec perte de mémoire/d'information. Présence d'éventuels vieux travaux. <i>Exploitation, Post-exploitation</i>	Selon le contexte : Examen et analyse des documents et études antérieurs sur la carrière ou dans l'environnement de la carrière.
	Toits et/ou piliers altérés ou fracturés avant remblayage (sécurité des travailleurs). <i>Exploitation</i>	Examen et analyse des études sur la stabilité locale et en grand de la carrière souterraine. Observation des toits et piliers, relevés géologiques, des discontinuités, des désordres, des arrivées d'eau, évaluation des typologies d'instabilité redoutées (cf. chapitre 5). Définition de mesures confortatives si besoin (purge, boulonnage...).
Hydrogéologie du site	Possibilité de carrière temporairement en eau (remontée de nappe). Importance des arrivées d'eau. Aptitude à la dissolution des terrains. <i>Exploitation, Post-exploitation</i>	Selon le contexte : étude hydrogéologique (ou complément d'étude) spécifique à l'échelle du bassin hydrogéologique et de l'environnement de la carrière (définition du schéma d'écoulement des eaux). Éventuellement réalisation de piézomètres.
Autres facteurs externes	Présence ou suspicion de cavités souterraines naturelles (dissolution) ou anthropiques. <i>Exploitation, Post-exploitation</i>	Au cas par cas.

Données à acquérir ou à compléter	Critères de spécificité/complexité Contexte	Investigations adaptées
Caractéristiques du remblai	<p>Nature et granulométrie du remblai, en particulier apte au terrassement (« pelletable »), et limitation de la proportion de gros blocs (supérieurs à 20 cm) à environ 20 % maximum relativement à celle des autres catégories granulométriques.</p> <p>Comportement du matériau incertain par rapport à la technique de remblayage (cf. chapitre 7.2).</p> <p>Pérennité du remblai.</p> <p>Disponibilité du remblai, dans le temps et en volume.</p> <p><i>Exploitation</i></p>	<p>Mise en place d'une procédure d'acceptation du remblai (avant, pendant et après l'arrivée sur site, cf. chapitre 10).</p> <p>Phase initiale d'essais et de caractérisation précise des remblais (en amont des opérations de remblayage).</p> <p>Puis contrôles visuels réguliers sur site.</p>
Gestion de l'eau au niveau du remblai	<p>Éviter des infiltrations massives, les zones de concentration des eaux.</p> <p>Éviter les écrans étanches empêchant la circulation d'eaux souterraines (carrières en eau).</p> <p><i>Exploitation, Post-exploitation</i></p>	<p>Évaluation de la sensibilité à l'eau des matériaux arrivant sur site, soit par acquisition des études antérieures sur les matériaux, soit par réalisation d'essais spécifiques (classification de type GTR).</p> <p>Études spécifiques au cas par cas.</p>
Techniques de remblayage	<p>Hauteur minimale de vides résiduels acceptables, après remblayage.</p> <p>Niveau de mise en sécurité recherché en surface.</p> <p><i>Exploitation</i></p>	<p>Estimation de la hauteur de remontée d'un fontis (cf. chapitre 5.2).</p> <p>Vérification des enjeux existants et futurs en surface (cf. chapitre 9).</p> <p>Vérification de la prise en considération des phénomènes de tassements différentiels des remblais.</p> <p>Sondages destructifs avec diagraphies pour vérifier les vides résiduels, selon le contexte.</p>
	<p>Secteurs instables en carrière.</p> <p><i>Exploitation</i></p>	<p>Observation des toits et piliers, des désordres antérieurs, études des typologies d'instabilité redoutées (cf. chapitre 5).</p> <p>Définition de mesures confortatives si besoin (purge, boulonnage...).</p>
	<p>Éviter la non-adaptation des engins en souterrain et des consignes de sécurité (y compris conditions d'hygiène et sanitaires).</p> <p><i>Exploitation</i></p>	<p>Planification des secteurs à remblayer (notamment par rapport aux secteurs en cours d'extraction).</p> <p>Étude des conditions de ventilation en souterrain comprenant l'activité de remblayage.</p>

## 12 Synthèse des bonnes pratiques liées à la stabilité géotechnique des remblais de déchets inertes en carrière souterraine

Pour assurer les conditions de stabilité des remblais et des terrains environnants, on retiendra, que dans un dossier de carrière souterraine en activité proposant le remblayage avec des déchets inertes, il est recommandé :

### / en phase préparatoire :

- de concevoir le remblayage dès la phase de dimensionnement d'un projet d'exploitation souterraine. Le mode de remblayage par le fond, le plus courant, n'est pas adapté à toutes les configurations de site d'exploitation (conditions d'accès et de stabilité et dimensions des vides) ;
- d'estimer, par une étude de stabilité, et en intégrant les phénomènes de tassements différentiels, la hauteur de remblai pour confiner les piliers et/ou assurer la stabilité des terrains en surface (en fonction de la destination de la surface) ;
- de prendre en compte le risque d'engorgement ou d'infiltration d'eau dans la carrière souterraine ;
- d'intégrer les éventuelles contraintes environnementales (présence de chiroptères dans les cavités par exemple) qui contraindraient la technique de remblayage ;
- de rédiger une procédure « Qualité des Remblais » (cf. chapitre 7) en précisant :
  - de solliciter, auprès du producteur de déchets, une demande d'acceptation préalable comprenant les informations administratives sur le demandeur, le producteur des déchets et le transporteur et les informations relatives au type de chantier en termes de calendrier prévisionnel, classification et quantification des déchets : nature, granulométrie et teneur en eau afin de garantir leur aptitude au terrassement (« pelletable ») ;
  - de limiter les remblais à dominante rocheuse (comme ordre de grandeur, les blocs de taille supérieure à 20 cm doivent représenter tout au plus 20 % du volume total de remblai et les blocs de plus de 50 cm sont à proscrire) ;
  - d'être vigilant quant à l'utilisation de déchets inertes spécifiques (gypse, argile, déchets inertes de granulométrie très faible...) pour prévenir les risques de tassement ou de glissement ou de dissolution de ces matériaux.

### / en phase d'exploitation/remblayage :

- d'effectuer une première phase préparatoire de mise en sécurité minimale du site et s'assurer des conditions de sécurité des chantiers de remblayage (accessibilité, confortement, repérage, aération...) ;
- de prendre en compte et anticiper les situations d'urgence liées en particulier aux instabilités en carrière et de fait, de prioriser et/ou sectoriser, en termes de stabilité, le remblayage en fonction du retour d'expérience ;
- de faire appliquer la procédure « Qualité des Remblais » (cf. chapitre 7) et tenir à jour un registre d'acceptation ou de refus des matériaux extérieurs avec justification, nature et destination des matériaux ;
- de consigner très régulièrement, sur un plan, les secteurs remblayés et les volumes mis en place. Ce suivi permet de vérifier la cohérence entre le volume de remblai mis en place et le volume de vide existant (en tenant compte du foisonnement du matériau). Ce plan d'avancement est à mettre en étroite liaison avec le registre de suivi des entrées des déchets inertes : la zone de stockage des déchets doit être affectée (identification de la galerie ou du secteur à remblayer) et consignée pour chaque camion enregistré ;
- de prévoir un « placier » ou un responsable sur site pour répartir et gérer l'arrivée des matériaux de remblai dans la carrière souterraine ;
- d'organiser des contrôles (visuels, olfactifs...) réguliers (statistiques ou inopinés) des matériaux de remblai, depuis l'entrée du site jusqu'à la fin de l'exploitation ;
- de prévoir, à proximité de la zone de déversement et de celle du régilage des matériaux inertes, un tri manuel et une benne spécifique dans le cas de présence ponctuelle de matériaux non inertes (bois, plastiques, ferraille...) ;
- de prévoir un personnel formé et spécifique pour gérer et réaliser les opérations de remblayage en souterrain ;
- d'éviter de laisser des zones « vides » et d'adapter la technique de poussage des remblais en souterrain pour confiner, jusqu'au toit des galeries, l'ensemble du pourtour du pilier ;

- d'effectuer des passages successifs et répétés d'engins sur le remblai pour le tasser *a minima* et, pendant la phase de talutage du remblai, s'assurer d'une pente compatible avec la circulation d'engins de chantier ;
- d'anticiper les nombreux risques liés aux circulations d'engins en souterrain (accident, incendie, égarement...) en lien avec le respect de la réglementation en cours (Code du Travail, décrets d'abrogation du RGIE, titres valides du RGIE) ;
- conserver, dans la planification des opérations de remblayage, des accès pour les quartiers non encore remblayés et pour les futurs quartiers à exploiter ;
- encourager le transfert de compétences entre exploitants/responsables, en cas de changement de personne.

Nous avons également constaté que sur des chantiers importants de remblayage, le recours à une plateforme extérieure de gestion des remblais apportait une réelle optimisation et une sécurité aux opérations de remblayage.

## 13 Conclusion

Les recherches bibliographiques ainsi que les retours d'expérience des exploitants et des inspecteurs DREAL ont permis d'élaborer ce guide de bonnes pratiques relatif aux conditions de stabilité des remblais et des terrains environnants lors des opérations de remblayage de carrières souterraines par des déchets inertes, lorsque cette opération est rendue nécessaire par les conditions d'exploitation ou lorsqu'il est entrepris de manière volontaire pour recycler ces déchets.

La réglementation définit clairement l'objectif du remblayage de carrière : « assurer la stabilité physique des terrains remblayés » sans nuire « à la qualité du sol » ainsi qu'à « la qualité et au bon écoulement des eaux ». Pour que la stabilité des terrains remblayés soit assurée, plusieurs points doivent être vérifiés : ceux propres au site et ceux propres au remblai.

Concernant les aspects liés à la carrière (zone d'accueil et de dépôt du remblai), la configuration géométrique de l'exploitation souterraine et son état géotechnique vont conditionner la faisabilité de la technique de remblayage depuis le souterrain.

Concernant les conditions de stabilité liés au remblai, il est préconisé de déterminer la nature, la granulométrie et la teneur en eau des déchets inertes afin de garantir leur aptitude au terrassement, de limiter les remblais à dominante rocheuse (comme ordre de grandeur, les blocs de taille supérieure à 20 cm doivent représenter tout au plus 20 % du volume total de remblai, le reste étant des matériaux plus fins) pour garantir un comblement effectif de vides résiduels ; d'intégrer les phénomènes de tassements différentiels dans le dimensionnement des volumes de remblais à déposer et d'être vigilant quant à l'utilisation de déchets inertes spécifiques (gypse, argile, déchets inertes de granulométrie très faible...).

Dans ces conditions et contrairement aux versées des carrières à ciel ouvert, la stabilité des fronts de remblai en carrière souterraine est rarement problématique (les volumes et les hauteurs de remblai étant moindres et la présence de parements rocheux « en place » assurant un support et un confinement au remblai).

Pour les carrières disposant de matériaux stériles du site d'extraction (déchets de taille, rebuts...), il est possible de les utiliser mais ils sont, dans la plupart des cas, en quantités insuffisantes pour permettre un remblayage optimal sur l'ensemble de la carrière.

Il faut souligner que le choix du remblayage depuis le souterrain, au regard de l'utilisation ultérieure du site en surface, doit être anticipé, si possible avant le début de l'exploitation du site (dès la phase projet / dimensionnement) : cela permet de définir la technique de remblayage (comblement total, partiel, clavage), de planifier à long terme les zones de remblayage et de commencer cette phase de remblayage simultanément et de manière coordonnée à l'extraction.

## 14 Références

- [1] Aubert C. et Bazargan-Sabet B., 2013. *Qualité environnementale des matériaux en comblement des cavités (Phase 1). Rapport final.* BRGM.
- [2] Al Heib M., Didier C. et Masrouri F., 2010. *Improving short- and long-term stability of underground gypsum mine using partial and total backfill.* Rock Mech Rock Eng, vol. 43, pp. 447-461.
- [3] Al Heib M., 2006. *Impact du remblayage partiel sur la stabilité des carrières exploitées par la méthode des chambres et piliers.* Rapport Ineris DRS-06-75738/RN01.
- [4] Bennani M., Bouffier C. & Franck C., 2016. *Guide de surveillance des cavités souterraines d'origine anthropique.* Rapport Ineris DRS-16-156834-00810B : <https://www.ineris.fr/fr/guide-surveillance-cavites-souterraines-origine-anthropique>
- [5] Bérard JP., 1999. *Note technique sur la remise en état des carrières en Languedoc-Roussillon.* Rapport BRGM R 40614.
- [6] Bescond B., Havard H., Magnan JP., Mieussens C., 2001. *Conception et exécution des grands remblais.* Synthèse du séminaire de Nantes. Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 243 : 3-18.
- [7] BRGM, 2012. *Que sont les effets de site lithologiques ?* <http://www.planseisme.fr/Complement-explications-effets-de-site.html>
- [8] Callier L. et Charbonnier P., 2002. *Remblaiement de gravières, carrières et plans d'eau - Critères d'appréciation des demandes d'autorisation et contrôles à mettre en œuvre - Application en Lorraine et en Champagne-Ardenne pour la partie du bassin Rhin-Meuse la concernant.* BRGM
- [9] Camelan J-C., 1994. *Remblaiement des carrières souterraines en région parisienne.* Mines et Carrières, Revue de l'Industrie Minérale, pp. 7-78.
- [10] Cherkaoui A., Franck C., 2021. *Remblayage de carrières à ciel ouvert par des déchets inertes - Guide de bonnes pratiques sur les critères de stabilité des remblais,* rapport Ineris-201162-2342192.
- [11] Collet T., Masrouri F. et Didier C., 2003. *Mise en sécurité des carrières souterraines.* GISOS Après-mines, Nancy.
- [12] Collet T., 2001. *Influence du remblayage partiel des carrières souterraines.* DEA Ecole Nationale Supérieure de Géologie.
- [13] Coussy S., Albinet R., Djouad I., Bâlon P., 2017. *Guide méthodologique de comblement de cavités à l'aide de matériaux alternatifs.* Rapport final BRGM/RP-66500-FR.
- [14] Cruden, DM., Varnes DJ., 1996. *Landslide Types and Processes,* Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences, Special Report, 247 : 36-75.
- [15] DDE 60, 2008. *Le remblayage de carrières en activité par des déchets inertes du BTP.* Les Feuilles de l'Oise, n°165, <http://www.oise.gouv.fr/content/download/13625/85041/file/Feuille>
- [16] Degas M., 2008. *Retour d'expérience de mise en pratique des comblements dans les cavités souterraines. Cas du comblement par le fond.* Rapport Ineris DRS-08-95032-15708A.
- [17] Degas M., Watelet JM., 2015. *Document pédagogique d'aide à l'instruction des Demandes de Demande d'Autorisation d'Exploiter (DDAE) des carrières souterraines.* Rapport Ineris DRS-15-148768-08152A.
- [18] Didier C., Tritsch JJ., 1996. *Traitement des carrières souterraines abandonnées par remblayage partiel - application au cas du massif de l'Hautil.* Rapport Ineris SSE-JTr-Cdi/CS-24EA05/R01.
- [19] DRIEE, 2018. *Guide d'orientation : Acceptation des déblais et terres excavées. Version 2.* Service de la prévention des risques et des nuisances, Île-de-France.
- [20] ECV, 2019. *Engagement pour la croissance verte (ECV) relatif à la valorisation et au recyclage des déchets inertes du BTP. 27 avril 2016 – 27 avril 2019.* <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/ECV%20Recyclage%20des%20d%C3%A9chets%20inertes%20du%20BTP%20-%20Bilan%20avril%202019.pdf>
- [21] ENPC, 1977. *Remblais sur sols compressibles.* Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- [22] Gustafson A., 2011. *Automation of Load Haul.* Luleå University of Technology, Sweden.

- [23] Lansiaart M., Oden B., 1999. *La remise en état des carrières : principes généraux, recommandations techniques et exemples par type d'exploitation*. Rapport BRGM R-40450.
- [24] Manoon M., 2009. *Systematic Selection and Application of Backfill in Underground Mines (PhD Thesis)*, Freiberg : Bergakademie Freiberg.
- [25] Masniyom M., 2009. *Systematic Selection and Application of Backfill in Underground Mines, Freiberg, Allemagne* : TU Bergakademie Freiberg.
- [26] Mokhtar Ahdouga S., 2018. *Analyse de la stabilité d'un remblai*. Mémoire de Master. <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6518/577.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [27] MTES, l'Industrie Cimentière, UNICEM, 2020. *Guide technique – Les impacts sur les milieux naturels : Déclinaison au secteur des carrières*. [http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/erc\\_-\\_carrieres\\_cle2e872e.pdf](http://webissimo.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/erc_-_carrieres_cle2e872e.pdf)
- [28] Nieto A., 2011. *SME Mining Engineering Handbook, Third Edition*. Soft-Rock (Underground) Mining : Selection Methods, Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, p. 11.
- [29] Pinon C. & Degas M., 2016. *Guide sur les solutions de mise en sécurité des cavités souterraines abandonnées d'origine anthropique*. Rapport Ineris DRS-15-149564-02401B : <https://www.ineris.fr/fr/guide-solutions-mise-securite-cavites-souterraines-abandonnees-origine-anthropique>
- [30] Poulard F., Daupley X., Didier C., Pokryszka Z., D'Hugues P., Charles N., Dupuy J.J. et Save M., 2017. *Exploitation minière et traitement des minerais - Tome 6*. Collection "La mine en France".
- [31] Reiffsteck P., 2015. *Stabilité des pentes. Glissements en terrain meuble*. Techniques de l'Ingénieur. Réf. : C254 V3.
- [32] Salmon R. et Franck C., 2000. *Méthodes innovantes de mise en sécurité d'anciennes cavités souterraines abandonnées - Détermination de l'effet du remblayage partiel sur le comportement des piliers - Rapport d'avancement*. Rapport Ineris DRS-00-25312/R01.
- [33] SETRA, LCPC, 2000. *Guide des terrassements routiers (GTR) – Fascicule 1 : Réalisation des remblais et des couches de forme – Fascicule 2 : Annexes techniques*.
- [34] Tesarik D., Seymour J., Yanske T. et McKibbin R., 1995. *Stability Analysis of a Backfilled Room-and-Pillar Mine*. United States Department of the Interior - Bureau of Mines, Missouri, USA.
- [35] Tritsch J.J., Durville J. et Potherat P., 2004. *Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines : un guide technique*. JNGG, Lille, 2014.
- [36] Tritsch J.J., Durville J. et Potherat P., 2002. *Guide technique : Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines*. Collection Environnement - Risques naturels, LCPC/INERIS/MATE.
- [37] Tritsch J.J., 2007. *Guide de mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : surveillance – traitement*. Rapport Ineris DRS-07-86042-02484A : [www.ineris.fr/centredoc/Guide\\_carrieres.pdf](http://www.ineris.fr/centredoc/Guide_carrieres.pdf)
- [38] Varnes D.J., 1978. *Slope movement type and processes*. Special Report 176 : Landslides : Analysis and Control. Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.
- [39] Voeltzel D., Février Y., 2010. *Gestion et aménagement écologiques des carrières de roches massives. Guide pratique à l'usage des exploitants de carrières*. ENCEM et CNC - UNPG, SFIC et UPC.
- [40] Wen L., Hua W., Hongjie L. et Donghao W., 2018. *Disaster types and environmental engineering issues induced by coal mine goafs instability*. IOP Conf. Series : Earth and Environmental Science, vol. 199, p. 052040.
- [41] Zhang J., Li M., Taheri A., Zhang W., Wu Z. et Song W., 2019. *Properties and application of backfill materials in coal mines in China*. Minerals, vol. 9, n° 153, pp. 1-21.
- [42] Zhang Q., Zhang J., Huang Y. et Ju F., 2012. *Backfilling technology and strata behaviors in fully mechanized*. International Journal of Mining Science and Technology, vol. 22, pp. 151-157.
- [43] Zhang Q., Kang Y., Jixiong Z., Yin W., Xianwei L., Zhongya W., Weijian S. et Xu X., 2022. *Monitoring and measurement analysis of key indexes for the implementation of mining, dressing, backfilling, and controlling technology in coal resources—A case study of Tangshan Mine*. Energy Science & Engineering, vol. 10, pp. 680-693.

- [44] Zhang J.X., Deng X.J., Zhao X., Ju F. et Li B.Y., 2017. *Effective control and performance measurement of solid waste backfill in coal mining*. International Journal of Mining, Reclamation and Environment, vol. 31, pp. 91-104.
- [45] Zhou N., Li M., Zhang J. et Gao R., 2016. *Roadway backfill method to prevent geohazards induced by room and pillar mining: a case study in Changxing coal mine, China*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., vol. 16, pp. 2473-2484.
- [46] Gombert P., Thoraval A., Watelet JM., 2018. *Geomechanical response of an abandoned chalk mine to multi-annual water table fluctuations*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, <https://doi.org/10.1007/s10064-018-1321-7>

## 15 Liste des annexes

Repère	Désignation	Nombre de pages
Annexe A	Articles 12.3 et 12.4 de l'arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières	1 A4
Annexe B	Annexe I de l'arrêté du 12 décembre 2014	1 A4
Annexe C	Classification des matériaux selon leur nature d'après le GTR	3 A4
Annexe D	Tableaux d'une sélection de classes de sol issues du Guide des Terrassements Routiers	11 A4

# Annexes

## ANNEXE A

### Articles 12.3 et 12.4 de l'arrêté du 22 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières

#### 12.3. Remblayage de carrière :

I. - Le remblayage des carrières est géré de manière à assurer la stabilité physique des terrains remblayés. Il ne nuit pas à la qualité du sol ainsi qu'à la qualité et au bon écoulement des eaux.

II. - Les déchets utilisables pour le remblayage sont :

- les déchets d'extraction inertes, qu'ils soient internes ou externes, sous réserve qu'ils soient compatibles avec le fond géochimique local ;
- les déchets inertes externes à l'exploitation de la carrière s'ils respectent les conditions d'admission définies par l'arrêté du 12 décembre 2014 susvisé, y compris le cas échéant son article 6.

III. - Les apports extérieurs de déchets sont accompagnés d'un bordereau de suivi qui indique leur provenance, leur destination, leurs quantités, leurs caractéristiques et les moyens de transport utilisés et qui atteste la conformité des déchets à leur destination.

L'exploitant tient à jour un registre sur lequel sont répertoriés la provenance, les quantités, les caractéristiques des déchets ainsi que les moyens de transport utilisés. Il tient à jour également un plan topographique permettant de localiser les zones de remblais correspondant aux données figurant sur le registre précité.

L'exploitant s'assure, au cours de l'exploitation de la carrière, que les déchets inertes utilisés pour le remblayage et la remise en état de la carrière ou pour la réalisation et l'entretien des pistes de circulation ne sont pas en mesure de dégrader les eaux superficielles et les eaux souterraines et les sols. L'exploitant étudie et veille au maintien de la stabilité de ces dépôts.

L'arrêté d'autorisation fixe la nature, les modalités de tri et les conditions d'utilisation des déchets extérieurs admis sur le site. Il prévoit, le cas échéant, la mise en place d'un réseau de surveillance de la qualité des eaux souterraines et la fréquence des mesures à réaliser.

#### 12.4. - Les dispositions du présent paragraphe s'appliquent aux **exploitations de carrière de gypse ou d'anhydrite**.

Le remblayage de ces exploitations peut, outre les dispositions de l'article 12.3, être réalisé à l'aide :

- des rebuts de fabrication provenant des usines de production de plâtre, de plaques ou de produits dérivés contenant du plâtre et qui sont non recyclables dans des conditions technico-économiques acceptables ;
- des terres et matériaux extérieurs à la carrière contenant naturellement du gypse ou de l'anhydrite,
- des déchets d'extraction internes à la carrière,

sous réserve qu'ils respectent les conditions d'admission fixées par l'arrêté du 12 décembre 2014 susvisé, y compris le cas échéant son article 6 ou que la concentration en contenu total des éléments mentionnés à l'annexe II de l'arrêté du 12 décembre 2014 susvisé reste inférieure à celle du fond géochimique naturel de la carrière.

Les déchets et produits précités ne sont employés que dans les trous d'excavation à des fins de remblayage.

Ils sont également utilisables pour le remblayage des carrières souterraines. Toutefois, dans le cas des rebuts de fabrication non recyclés des sites de production, et afin d'assurer la stabilité physique des zones souterraines remblayées, leur emploi est limité, en masse, à au plus 10 %.

L'emploi des déchets et produits précités est interdit pour le remblayage des carrières destinées à être ennoyées ou pour lesquelles un contact avec une nappe phréatique est possible, en tenant compte du niveau des plus hautes eaux connu.

## ANNEXE B

Annexe I de l'arrêté du 12 décembre 2014

### LISTE DES DÉCHETS ADMISSIBLES DANS LES INSTALLATIONS VISÉES PAR LE PRÉSENT ARRÊTÉ SANS RÉALISATION DE LA PROCÉDURE D'ACCEPTATION PRÉALABLE PRÉVUE À L'ARTICLE 3

CODE DÉCHET <sup>(1)</sup>	DESCRIPTION <sup>(1)</sup>	RESTRICTIONS
17 01 01	Béton	Uniquement les déchets de production et de commercialisation ainsi que les déchets de construction et de démolition ne provenant pas de sites contaminés, triés
17 01 02	Briques	Uniquement les déchets de production et de commercialisation ainsi que les déchets de construction et de démolition ne provenant pas de sites contaminés, triés
17 01 03	Tuiles et céramiques	Uniquement les déchets de production et de commercialisation ainsi que les déchets de construction et de démolition ne provenant pas de sites contaminés, triés
17 01 07	Mélanges de béton, tuiles et céramiques ne contenant pas de substances dangereuses	Uniquement les déchets de construction et de démolition ne provenant pas de sites contaminés, triés
17 02 02	Verre	Sans cadre ou montant de fenêtres
17 03 02	Mélanges bitumineux ne contenant pas de goudron	Uniquement les déchets de production et de commercialisation ainsi que les déchets de construction et de démolition ne provenant pas de sites contaminés, triés
17 05 04	Terres et cailloux ne contenant pas de substance dangereuse	A l'exclusion de la terre végétale, de la tourbe et des terres et cailloux provenant de sites contaminés
20 02 02	Terres et pierres	Provenant uniquement de jardins et de parcs et à l'exclusion de la terre végétale et de la tourbe
10 11 03	Déchets de matériaux à base de fibre de verre	Seulement en l'absence de liant organique
15 01 07	Emballage en verre	Triés
19 12 05	Verre	Triés

(1) Annexe II à l'[article R. 541-8 du code de l'environnement](#).

## ANNEXE C

### Classification des matériaux selon leur nature d'après le GTR [33]

(<https://docplayer.fr/16720117-Arvor-geotechnique-ingenierie-des-sols-et-des-fondations.html>)

Lorsque des déchets inertes arrivent sur un site de remblai (ici remblai routier), les caractéristiques importantes sont la nature et la granulométrie. C'est selon ces deux principaux critères, auxquels s'ajoute la teneur en argile plastique, que le « Guide des Terrassements Routiers », dit GTR, réalisé par le SETRA et le LCPC [33], classe les matériaux dans le cadre de leur utilisation en terrassement routier. Ce document, incontournable pour ce type de travaux, établit les conditions d'utilisation (épaisseur de couche possible, nature du compactage, conditions météorologiques pendant la mise en œuvre...) et leur position dans le remblai. Il donne plusieurs tableaux de classification qui permettent de savoir comment utiliser un type de remblai et dans quelles conditions :

- le premier tableau de classification est reproduit (Tableau 3) : il classe le matériau selon sa nature et sa granulométrie ;
- à partir de ce premier tableau synoptique, les tableaux par type de sol indiquent les sous-classes et les caractères principaux d'emploi en remblai routier et en couche de forme (annexe D).

Bien entendu, les objectifs de performance, en termes de résistance et de tassement acceptable finaux, sont pour un remblai en carrière à ciel ouvert (et dans une moindre mesure en carrière souterraine) beaucoup moins importantes que pour un remblai routier. Néanmoins il nous a paru important de rapporter ces éléments du GTR, pour se rapprocher de la classification des matériaux la plus courante en France, d'une part, et parce que les grands critères de réemploi des matériaux restent similaires, d'autre part.

Si l'on se rapporte à cette classification (annexe D), on peut d'ores et déjà évoquer que la grande majorité des déchets de travaux publics arrivant en carrière appartiennent aux catégories A (sols fins), B (sols sableux et graveleux avec fines), C (sols comportant des fines et des gros éléments), et R (roches). Il est rare de constater l'approvisionnement de matériaux insensibles à l'eau (D), ceux-ci, de par leur propreté, étant généralement réemployés et non mis en dépôt.

Plus les chantiers de provenance sont importants en taille, et/ou disparates, plus les matériaux se sont mélangés au préalable, selon l'historique du site où les travaux publics ont été entrepris (présence d'anciens remblais par exemple), ou se mélangent durant le stockage en zone source ou lors de l'arrivée et le déversement sur le site de la carrière.

On peut ainsi considérer que la catégorie C est la plus représentée. Ce sont des matériaux dont le diamètre maximal des éléments constitutifs dépasse 50 mm, mais dont le comportement géotechnique et l'aptitude au terrassement est intimement lié à la proportion de matériaux de dimension inférieure à cette valeur de 50 mm qui les constituent.

Si cette proportion est supérieure à 60-80 %, le matériau est régi par les matériaux fins à graveleux, de catégorie A ou B. Si elle est inférieure à 60-80 % ce sont les éléments grossiers qui régissent le comportement du matériau et son aptitude au terrassement.

Les roches (catégorie R) arrivant sur site pour remblayage sont pour la plupart des cas des matériaux impropres à leur réemploi : ce sont donc des matériaux fragmentés ou fragmentables, voire évolutifs (gypse, anhydrite, ou autres évaporites) dont la nature est liée au contexte géologique de la région de travaux. Les roches les plus résistantes sont de manière générale réutilisées en enrochements ou pour d'autres usages.

Les déchets du bâtiment appartiennent à la catégorie F7 du GTR (annexe D), dont les éléments déterminants sont la présence d'éléments putrescibles, de plâtre, et l'exécution d'opérations préalables d'élaboration (criblage, concassage, homogénéisation). Si on les rapporte aux autres catégories GTR, une fois ces éléments déterminants connus par l'observation, on peut considérer que les matériaux très fins (catégorie A) ne sont très peu ou pas représentés dans les déchets du bâtiment.

Pour prévoir le comportement mécanique des remblais routiers au cours du temps, le GTR préconise différents essais. Dans le cas des carrières, la précision et la quantité de ceux-ci va dépendre de l'usage final du site. Le LCPC préconise deux approches :

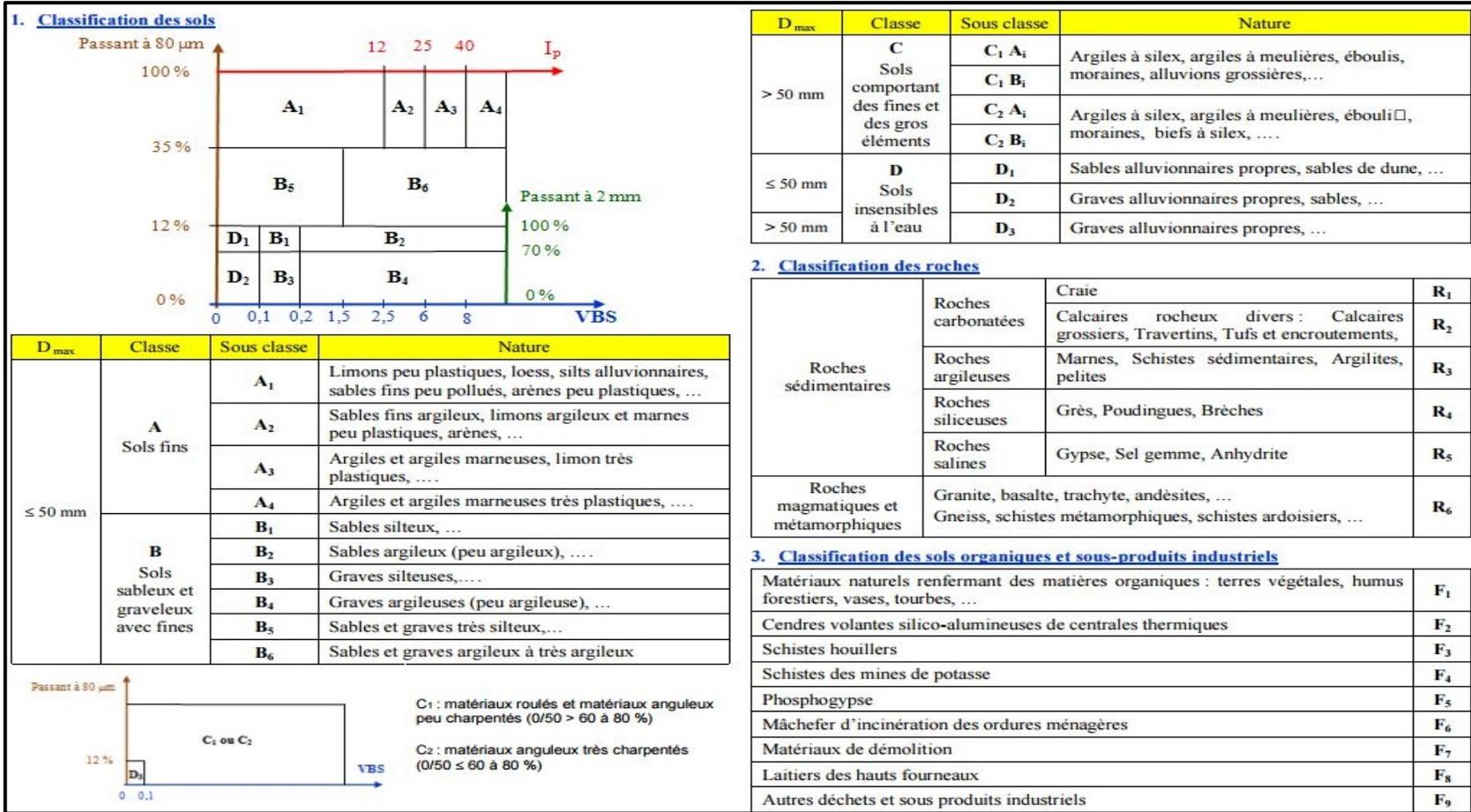
- aucun essai spécifique si le matériau est globalement connu, s'il a déjà été utilisé comme remblai, ou s'il ne présente pas de particularités empêchant son terrassement ou pouvant être source d'instabilités (présence d'argile, sensibilité à l'eau, ...). Ceci est d'autant plus valable si le site d'accueil est connu et ne présente pas de spécificité ;

- une étude spécifique détaillée si le comportement du matériau est incertain par rapport aux contraintes, ou si le site d'accueil présente des indices d'instabilité. La caractérisation du matériau est donc nécessaire (essais géomécaniques). Le Tableau 2 résume les essais géotechniques les plus courants pour caractériser les sols.

Tableau 2 : Différents types d'essais géotechniques selon les caractéristiques recherchées (adapté et complété d'après <https://esiris-group.com/essai-de-mecanique-des-sols/>)

Type d'essai	Objectif	Résultats
<b>Essai d'identification</b>	Classer le sol en fonction de sa granulométrie et de son argilosité	Teneur en eau Masses volumiques des sols fins et des particules solides Granulométrie Valeur au bleu de méthylène (VBM) ; Limites d'Atterberg (limites de liquidité et de plasticité, indice de plasticité Ip)
<b>Essai œdométrique</b>	Apprécier la déformation verticale des sols (tassement)	Courbes de consolidation (tassement de l'échantillon en fonction du temps) Courbe de compressibilité (tassement total en fonction de la contrainte appliquée)
<b>Essai de cisaillement</b>	Mesurer les caractéristiques de rupture d'un échantillon soumis à un cisaillement	Angle de frottement effectif Cohésion effective
<b>Essai triaxial</b>	Mesurer les caractéristiques de rupture d'un échantillon soumis à un cisaillement, <i>en lui appliquant un état de contrainte vertical et radial correspondant à une profondeur et à une sollicitation</i> . Une contrainte hydrostatique (présence d'eau) peut également être appliquée	Angle de frottement Cohésion Etat non drainé ou drainé
<b>Essai d'évaluation d'un sol au traitement</b>	Vérifier que l'association d'un matériau avec de la chaux et/ou un liant hydraulique présente la stabilité dimensionnelle et le comportement mécanique conformes à ce qui est attendu	Données résultantes de la mise en œuvre des essais précédents

Tableau 3 : Tableau synoptique de classification des matériaux selon leur nature d'après le GTR<sup>8</sup>



<sup>8</sup> Légendes : **Passant à ...** : pourcentage en poids du matériau qui passe dans un tamis dont la maille est de ...,  **$D_{max}$**  : Diamètre du plus gros élément, **VBS** : Valeur au bleu de méthylène du sol, qui détermine la quantité et la qualité de l'argile dans le sol, permettant ainsi d'apprécier la sensibilité à l'eau,  **$I_p$**  : Indice de plasticité du sol, parfois utilisé à la place du VBS

## ANNEXE D

### Tableaux d'une sélection de classes de sol issues du Guide des Terrassements Routiers [33]

#### Classe A

#### SOLS FINS

Classement selon la nature					Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe	
D <sub>max</sub> ≤ 50mm et tamisat à 80µm > 35 %	<b>A</b>  <b>sols fins</b>	<b>VBS</b> ≤ 2,5 ou <b>I<sub>p</sub></b> ≤ 12	A <sub>1</sub>	Ces sols changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau, en particulier lorsque leur w <sub>n</sub> est proche de w <sub>OPN</sub> . Le temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est relativement court, mais la perméabilité pouvant varier dans de larges limites selon la granulométrie, la plasticité et la compacité, le temps de réaction peut tout de même varier assez largement. Dans le cas de ces sols fins peu plastiques, il est souvent préférable de les identifier par la valeur de bleu de méthylène VBS, compte tenu de l'imprécision attachée à la mesure de l'I <sub>p</sub> .	<b>IPi</b> ≤ 3 ou w <sub>n</sub> ≥ 1,25 w <sub>OPN</sub>	A <sub>1</sub> th	
			3 < <b>IPi</b> ≤ 8 ou 1,10 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,25 w <sub>OPN</sub>		A <sub>1</sub> h		
			8 < <b>IPi</b> ≤ 25 ou 0,9 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,10 w <sub>OPN</sub>		A <sub>1</sub> m		
			0,7 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 0,9 w <sub>OPN</sub>		A <sub>1</sub> s		
		12 < <b>I<sub>p</sub></b> ≤ 25 ou 2,5 < <b>VBS</b> ≤ 6	A <sub>2</sub>	Le caractère moyen des sols de cette sous - classe fait qu'ils se prêtent à l'emploi de la plus large gamme d'outils de terrassement (si la teneur en eau n'est pas trop élevée). Dès que l'I <sub>p</sub> atteint des valeurs ≥ 12, il constitue le critère d'identification le mieux adapté.	<b>IPi</b> ≤ 2 ou <b>Ic</b> ≤ 0,9 ou w <sub>n</sub> ≥ 1,3 w <sub>OPN</sub>	A <sub>2</sub> th	
			2 < <b>IPi</b> ≤ 5 ou 0,9 < <b>Ic</b> ≤ 1,05 ou 1,1 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,3 w <sub>OPN</sub>		A <sub>2</sub> h		
			5 < <b>IPi</b> ≤ 15 ou 1,05 < <b>Ic</b> ≤ 1,2 ou 0,9 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,1 w <sub>OPN</sub>		A <sub>2</sub> m		
			1,2 < <b>Ic</b> ≤ 1,4 ou 0,7 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 0,9 w <sub>OPN</sub>		A <sub>2</sub> s		
		25 < <b>I<sub>p</sub></b> ≤ 40 ou 6 < <b>VBS</b> ≤ 8	A <sub>3</sub>	Ces sols sont très cohérents à teneur en eau moyenne et faible, et collants ou glissants à l'état humide, d'où difficulté de mise en œuvre sur chantier (et de manipulation en laboratoire). Leur perméabilité très réduite rend leurs variations de teneur en eau très lentes, en place. Une augmentation de teneur en eau assez importante est nécessaire pour changer notablement leur consistance.	<b>IPi</b> ≤ 10 ou <b>Ic</b> ≤ 0,8 ou w <sub>n</sub> ≥ 1,4 w <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> th	
			1 < <b>IPi</b> ≤ 3 ou 0,8 < <b>Ic</b> ≤ 1 ou 1,2 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,4 w <sub>OPN</sub>		A <sub>3</sub> h		
			3 < <b>IPi</b> ≤ 10 ou 1 < <b>Ic</b> ≤ 1,15 ou 0,9 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,2 w <sub>OPN</sub>		A <sub>3</sub> m		
			1,15 < <b>Ic</b> ≤ 1,3 ou 0,7 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 0,9 w <sub>OPN</sub>		A <sub>3</sub> s		
		<b>I<sub>p</sub></b> > 40 ou <b>VBS</b> > 8	A <sub>4</sub>	Ces sols sont très cohérents et presque imperméables : s'ils changent de teneur en eau, c'est extrêmement lentement et avec d'importants retraits ou gonflements. Leur emploi en remblai ou en couche de forme n'est normalement pas envisagé mais il peut éventuellement être décidé à l'appui d'une étude spécifique s'appuyant notamment sur des essais en vraie grandeur.	Ic > 1,4 ou w <sub>n</sub> < 0,7 w <sub>OPN</sub>	A <sub>3</sub> ts	
			Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique.				
			A <sub>4</sub> th				
			A <sub>4</sub> h				
A <sub>4</sub> m							
A <sub>4</sub> s							

Les paramètres inscrits en **caractères gras** sont ceux dont le choix est à privilégier.

## Classe B

# SOLS SABLEUX ET GRAVELEUX AVEC FINES

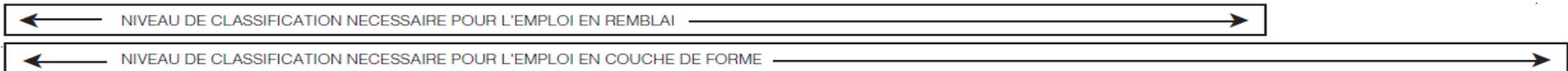
← NIVEAU DE CLASSIFICATION NECESSAIRE POUR L'EMPLOI EN REMBLAI →
← NIVEAU DE CLASSIFICATION NECESSAIRE POUR L'EMPLOI EN COUCHE DE FORME →

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement				
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous-classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe		
D <sub>max</sub> ≤ 50 mm et tamisat à 80 μm ≤ 35%	<b>B</b> Sols sableux et graveleux avec fines	- tamisat à 80 μm ≤ 12% - tamisat à 2 mm > 70% - 0,1 < <b>VBS</b> ≤ 0,2 ou ES > 35	B <sub>1</sub>	Matériaux sableux généralement insensibles à l'eau. Mais, dans certains cas (extraction dans la nappe...), cette insensibilité devra être confirmée (étude complémentaire, planche d'essais,...).  Leur emploi en couche de forme nécessite, par ailleurs, la mesure de leur résistance mécanique (friabilité des sables FS).			FS ≤ 60	B <sub>11</sub>		
			Sables silteux...					FS > 60	B <sub>12</sub>	
		- tamisat à 80 μm ≤ 12% - tamisat à 2 mm > 70% - <b>VBS</b> > 0,2 ou ES ≤ 35	B <sub>2</sub>	Sables argileux (peu argileux)...	La plasticité de leurs fines rend ces sols sensibles à l'eau. Leur temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est court, tout en pouvant varier assez largement (fonction de perméabilité). Lorsqu'ils sont extraits dans la nappe et mis en dépôt provisoire, ils conservent un état hydrique "humide" à "très humide"; il est assez peu probable, en climat océanique, que leur état hydrique puisse s'améliorer jusqu'à devenir "moyen". Leur emploi en couche de forme sans traitement avec des LH nécessite, par ailleurs, la mesure de leur résistance mécanique (friabilité des sables FS).		IPI ≤ 4 ou w <sub>n</sub> ≥ 1,25 w <sub>OPN</sub>  4 < IPI ≤ 8 ou 1,10 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,25 w <sub>OPN</sub>	B <sub>2</sub> th	FS ≤ 60	B <sub>21</sub> th
									FS > 60	B <sub>22</sub> th
								B <sub>2</sub> h	FS ≤ 60	B <sub>21</sub> h
									FS > 60	B <sub>22</sub> h
								B <sub>2</sub> m	FS ≤ 60	B <sub>21</sub> m
									FS > 60	B <sub>22</sub> m
		B <sub>2</sub> s	FS ≤ 60	B <sub>21</sub> s						
			FS > 60	B <sub>22</sub> s						
B <sub>2</sub> ts	FS ≤ 60	B <sub>21</sub> ts								
	FS > 60	B <sub>22</sub> ts								
- tamisat à 80 μm ≤ 12% - tamisat à 2 mm > 70% - 0,1 < <b>VBS</b> ≤ 0,2 ou ES > 25	B <sub>3</sub>	Graves silteuses...	Matériaux graveleux généralement insensibles à l'eau. Mais, dans certains cas (extraction dans la nappe...), cette insensibilité devra être confirmée (étude complémentaire, planche d'essai,...).  Leur emploi en couche de forme sans traitement avec des LH nécessite, par ailleurs, la mesure de leur résistance mécanique (Los Angeles, LA, et Micro Deval en présence d'eau, MDE).				LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B <sub>31</sub>		
							LA > 45 ou MDE > 45	B <sub>32</sub>		

Les paramètres inscrits en **caractères gras** sont ceux dont le choix est à privilégier.

**Classe B (suite)**

**SOLS SABLEUX ET GRAVELEUX AVEC FINES (suite)**



Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement					
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe			
D <sub>max</sub> ≤ 50 mm et tamisat à 80 µm ≤ 35%	<b>B</b> Sols sableux et graveleux avec fines	- tamisat à 80 µm ≤ 12% - tamisat à 2 mm ≤ 70% - <b>VBS</b> > 0,2 ou ES ≤ 25	<b>B<sub>4</sub></b> Graves argileuses (peu argileuses)...	La plasticité de leurs fines rend ces sols sensibles à l'eau. Ils sont plus graveleux que les sols B <sub>2</sub> et leur fraction sableuse est plus faible. Pour cette raison, ils sont en général perméables. Ils réagissent assez rapidement aux variations de l'environnement hydrique et climatique (humidification - séchage). Lorsqu'ils sont extraits dans la nappe, il est assez peu probable, en climat océanique, que leur état hydrique puisse s'améliorer jusqu'à devenir "moyen". Leur emploi en couche de forme sans traitement avec des LH nécessite, par ailleurs, la mesure de leur résistance mécanique (Los Angelès, LA, et/ou Micro Deval en présence d'eau, MDE).	<b>IP</b> I ≤ 7 ou w <sub>n</sub> ≥ 1,25 w <sub>OPN</sub>	B <sub>4</sub> th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B <sub>41</sub> th			
					7 < <b>IP</b> I ≤ 15 ou 1,10 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,25 w <sub>OPN</sub>	B <sub>4</sub> h	LA > 45 ou MDE > 45	B <sub>42</sub> th			
					0,9 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,10 w <sub>OPN</sub>	B <sub>4</sub> m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B <sub>41</sub> h			
					0,6 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 0,9 w <sub>OPN</sub>	B <sub>4</sub> s	LA > 45 ou MDE > 45	B <sub>42</sub> h			
							LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B <sub>41</sub> m			
		w <sub>n</sub> < 0,6 w <sub>OPN</sub>	B <sub>4</sub> ts	LA > 45 ou MDE > 45	B <sub>42</sub> m						
		- tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% - <b>VBS</b> ≤ 1,5 ou I <sub>p</sub> ≤ 12	<b>B<sub>5</sub></b> Sables et graves très silteux...	La proportion de fines et la faible plasticité de ces dernières, rapprochent beaucoup le comportement de ces sols de celui des sols A <sub>1</sub> . Pour la même raison qu'indiquée à propos des sols A <sub>1</sub> , il y a lieu de préférer le critère VBS au critère I <sub>p</sub> , pour l'identification des sols B <sub>5</sub> . Leur emploi en couche de forme sans traitement avec des LH nécessite de connaître leur résistance mécanique (Los Angelès, LA, et/ou Micro Deval en présence d'eau, MDE).	<b>IP</b> I ≤ 5 ou w <sub>n</sub> ≥ 1,25 w <sub>OPN</sub>	B <sub>5</sub> th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B <sub>51</sub> th			
					5 < <b>IP</b> I ≤ 12 ou 1,10 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,25 w <sub>OPN</sub>	B <sub>5</sub> h	LA > 45 ou MDE > 45	B <sub>52</sub> th			
					12 < <b>IP</b> I ≤ 30 ou 0,9 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,10 w <sub>OPN</sub>	B <sub>5</sub> m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B <sub>51</sub> h			
					0,6 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 0,9 w <sub>OPN</sub>	B <sub>5</sub> s	LA > 45 ou MDE > 45	B <sub>52</sub> h			
							LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B <sub>51</sub> m			
					w <sub>n</sub> < 0,6 w <sub>OPN</sub>	B <sub>5</sub> ts	LA > 45 ou MDE > 45	B <sub>52</sub> m			
					- tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% - <b>VBS</b> > 1,5 ou I <sub>p</sub> > 12	<b>B<sub>6</sub></b> Sables et graves, argileux à très argileux	L'influence des fines est prépondérante ; le comportement du sol se rapproche de celui du sol fin ayant même plasticité que les fines du sol avec toutefois une plus grande sensibilité à l'eau due à la présence de la fraction sableuse en plus grande quantité.	<b>IP</b> I ≤ 4 ou w <sub>n</sub> ≥ 1,3 w <sub>OPN</sub> ou I <sub>c</sub> ≤ 0,8	B <sub>6</sub> th		
								4 < <b>IP</b> I ≤ 10 ou 0,8 < I <sub>c</sub> ≤ 1 ou 1,1 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,3 w <sub>OPN</sub>	B <sub>6</sub> h		
								10 < <b>IP</b> I ≤ 25 ou 1 < I <sub>c</sub> ≤ 1,2 ou 0,9 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 1,1 w <sub>OPN</sub>	B <sub>6</sub> m		
0,7 w <sub>OPN</sub> ≤ w <sub>n</sub> < 0,9 w <sub>OPN</sub> ou 1,2 < I <sub>c</sub> ≤ 1,3	B <sub>6</sub> s										
w <sub>n</sub> < 0,7 w <sub>OPN</sub> ou I <sub>c</sub> > 1,3	B <sub>6</sub> ts										

Les paramètres inscrits en **caractères gras** sont ceux dont le choix est à privilégier.

**Classe C**

**SOLS COMPORTANT DES FINES ET DES GROS ELEMENTS**

Classement selon la nature					Classement selon l'état hydrique et le comportement									
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous-classe fonction de la nature	Caractères principaux										
<p>D<sub>max</sub> &gt; 50mm et tamisat à 80 µm &gt; 12% ou si le tamisat à 80 µm ≤ 12% la VBS est &gt; 0,1</p>	<p><b>C</b> <b>Sols comportant des fines et des gros éléments</b></p>	<p>Matériaux anguleux dont la proportion de la fraction 0/50 mm dépasse 60 à 80% et Matériaux roulés La fraction 0/50 mm est un sol de la classe A</p>	<p>C<sub>1</sub>A<sub>1</sub>  Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières...</p>	<p>Le comportement des sols de cette classe peut être assez justement apprécié par celui de leur fraction 0/50 mm.  L'évaluation de la proportion de la fraction 0/50 mm est cependant nécessaire dans le cas des sols constitués d'éléments anguleux. Celle-ci peut se faire visuellement par un géotechnicien expérimenté dès que le D<sub>max</sub> du sol dépasse 200 mm. L'identification des sols de cette classe doit être précisée à l'aide d'un double symbole de type C<sub>1</sub>(A<sub>1</sub>) ou C<sub>1</sub>(B<sub>1</sub>), A<sub>1</sub> ou B<sub>1</sub> étant respectivement la classe de la fraction 0/50 mm du matériau considéré.</p>	<p>Le sous-classement, en fonction de l'état hydrique des sols de cette classe, s'établit en considérant celui de leur fraction 0/50 mm qui peut être un sol de la classe A ou de la classe B.</p> <p>Les différentes sous-classes composant la classe C sont :</p> <table border="1"> <tr> <td>C<sub>1</sub>A<sub>1</sub> C<sub>1</sub>A<sub>2</sub> C<sub>1</sub>A<sub>3</sub> C<sub>1</sub>A<sub>4</sub></td> <td>C<sub>2</sub>A<sub>1</sub> C<sub>2</sub>A<sub>2</sub> C<sub>2</sub>A<sub>3</sub> C<sub>2</sub>A<sub>4</sub></td> <td>état th, h, m, s ou ts</td> </tr> <tr> <td>C<sub>1</sub>B<sub>11</sub> C<sub>1</sub>B<sub>12</sub> C<sub>1</sub>B<sub>31</sub> C<sub>1</sub>B<sub>32</sub></td> <td>C<sub>2</sub>B<sub>11</sub> C<sub>2</sub>B<sub>12</sub> C<sub>2</sub>B<sub>31</sub> C<sub>2</sub>B<sub>32</sub></td> <td>Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique</td> </tr> <tr> <td>C<sub>1</sub>B<sub>21</sub> C<sub>1</sub>B<sub>22</sub> C<sub>1</sub>B<sub>41</sub> C<sub>1</sub>B<sub>42</sub> C<sub>1</sub>B<sub>51</sub> C<sub>1</sub>B<sub>52</sub> C<sub>1</sub>B<sub>6</sub></td> <td>C<sub>2</sub>B<sub>21</sub> C<sub>2</sub>B<sub>22</sub> C<sub>2</sub>B<sub>41</sub> C<sub>2</sub>B<sub>42</sub> C<sub>2</sub>B<sub>51</sub> C<sub>2</sub>B<sub>52</sub> C<sub>2</sub>B<sub>6</sub></td> <td>état th, h, m, s ou ts</td> </tr> </table>	C <sub>1</sub> A <sub>1</sub> C <sub>1</sub> A <sub>2</sub> C <sub>1</sub> A <sub>3</sub> C <sub>1</sub> A <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> A <sub>1</sub> C <sub>2</sub> A <sub>2</sub> C <sub>2</sub> A <sub>3</sub> C <sub>2</sub> A <sub>4</sub>	état th, h, m, s ou ts	C <sub>1</sub> B <sub>11</sub> C <sub>1</sub> B <sub>12</sub> C <sub>1</sub> B <sub>31</sub> C <sub>1</sub> B <sub>32</sub>	C <sub>2</sub> B <sub>11</sub> C <sub>2</sub> B <sub>12</sub> C <sub>2</sub> B <sub>31</sub> C <sub>2</sub> B <sub>32</sub>	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique	C <sub>1</sub> B <sub>21</sub> C <sub>1</sub> B <sub>22</sub> C <sub>1</sub> B <sub>41</sub> C <sub>1</sub> B <sub>42</sub> C <sub>1</sub> B <sub>51</sub> C <sub>1</sub> B <sub>52</sub> C <sub>1</sub> B <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> B <sub>21</sub> C <sub>2</sub> B <sub>22</sub> C <sub>2</sub> B <sub>41</sub> C <sub>2</sub> B <sub>42</sub> C <sub>2</sub> B <sub>51</sub> C <sub>2</sub> B <sub>52</sub> C <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	état th, h, m, s ou ts
		C <sub>1</sub> A <sub>1</sub> C <sub>1</sub> A <sub>2</sub> C <sub>1</sub> A <sub>3</sub> C <sub>1</sub> A <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> A <sub>1</sub> C <sub>2</sub> A <sub>2</sub> C <sub>2</sub> A <sub>3</sub> C <sub>2</sub> A <sub>4</sub>	état th, h, m, s ou ts										
		C <sub>1</sub> B <sub>11</sub> C <sub>1</sub> B <sub>12</sub> C <sub>1</sub> B <sub>31</sub> C <sub>1</sub> B <sub>32</sub>	C <sub>2</sub> B <sub>11</sub> C <sub>2</sub> B <sub>12</sub> C <sub>2</sub> B <sub>31</sub> C <sub>2</sub> B <sub>32</sub>	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique										
		C <sub>1</sub> B <sub>21</sub> C <sub>1</sub> B <sub>22</sub> C <sub>1</sub> B <sub>41</sub> C <sub>1</sub> B <sub>42</sub> C <sub>1</sub> B <sub>51</sub> C <sub>1</sub> B <sub>52</sub> C <sub>1</sub> B <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> B <sub>21</sub> C <sub>2</sub> B <sub>22</sub> C <sub>2</sub> B <sub>41</sub> C <sub>2</sub> B <sub>42</sub> C <sub>2</sub> B <sub>51</sub> C <sub>2</sub> B <sub>52</sub> C <sub>2</sub> B <sub>6</sub>	état th, h, m, s ou ts										
<p>Matériaux anguleux dont la proportion de la fraction 0/50 mm dépasse 60 à 80% et Matériaux roulés La fraction 0/50 mm est un sol de la classe B</p>	<p>C<sub>1</sub>B<sub>1</sub>  Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières...</p>	<p>On peut encore très utilement compléter cette identification en indiquant la valeur du D<sub>max</sub> présent dans le sol.  Ainsi, par exemple, un sol classé : C<sub>1</sub><sup>400</sup> (A<sub>3</sub>) correspond à un sol roulé ou anguleux ayant plus de 60 à 80% d'éléments &lt; 50 mm, dont les plus gros éléments ont une dimension de 400 mm et dont la fraction 0/50 mm est de type A<sub>3</sub>.</p>												
<p>Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%. La fraction 0/50 mm est un sol de la classe A.</p>	<p>C<sub>2</sub>A<sub>1</sub>  Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...</p>	<p>Le comportement des sols de cette classe dépend aussi de la fraction 50/D présente et ne peut plus être assimilé à celui de la seule fraction 0/50 mm.  L'importance de cette influence est toujours difficile à évaluer (fonction de la continuité granulométrique et de l'angularité des éléments grenus) en raison des difficultés pratiques qu'il y a à réaliser des essais de laboratoire sur ces matériaux.  Il est néanmoins utile, comme pour les C<sub>1</sub>, de préciser l'identification des sols de cette classe à l'aide d'un double symbole de type C<sub>2</sub>(A<sub>1</sub>) ou C<sub>2</sub>(B<sub>1</sub>), A<sub>1</sub> ou B<sub>1</sub> étant respectivement la classe de la fraction 0/50 mm du matériau considéré.</p>												
<p>Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%. La fraction 0/50 mm est un sol de la classe B.</p>	<p>C<sub>2</sub>B<sub>1</sub>  Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...</p>	<p>De même cette identification pourra être très utilement complétée par l'indication du D<sub>max</sub> présent dans le sol (Cf. classe C<sub>1</sub>).  Des essais en semi ou vraie grandeur seront souvent nécessaires pour caler l'interprétation des mesures réalisées sur la fraction 0/50 mm.</p>												

## Classe D

## SOLS INSENSIBLES A L'EAU

← NIVEAU DE CLASSIFICATION NECESSAIRE POUR L'EMPLOI EN REMBLAI →								
← NIVEAU DE CLASSIFICATION NECESSAIRE POUR L'EMPLOI EN COUCHE DE FORME →								
Classement selon nature					Classement selon le comportement			
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous-classe fonction de la nature	Caractères principaux	Valeurs seuils retenues		Sous-classe	
VBS ≤ 0,1 et Tamisat à 80 µm ≤ 12%	D <b>Sols insensibles à l'eau</b>	Dmax ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm > 70%	D <sub>1</sub>	Sables alluvionnaires propres, sables de dune...	Ces sols sont sans cohésion et perméables. Leur granulométrie, souvent mal graduée et de petit calibre, les rend très érodables et d'une "traficabilité" difficile.	Leur emploi en couche de forme sans traitement aux LH nécessite, par ailleurs, la mesure de leur résistance mécanique (Los Angeles, LA, et/ou micro Deval en présence d'eau, MDE) ou friabilité des sables (FS).	FS ≤ 60	D <sub>11</sub>
			FS > 60	D <sub>12</sub>				
		Dmax ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm ≤ 70%	D <sub>2</sub>	Graves alluvionnaires propres, sables...	Ces sols sont sans cohésion et perméables. Après compactage ils sont d'autant moins érodables et d'autant plus aptes à supporter le trafic qu'ils sont bien gradués.		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D <sub>21</sub>
			LA > 45 ou MDE > 45	D <sub>22</sub>				
		Dmax > 50 mm	D <sub>3</sub>	Graves alluvionnaires propres...	Matériaux sans cohésion et perméables, inadaptés au malaxage en vue d'un traitement répondant à une qualité "couche de forme". En partie supérieure des terrassements ils peuvent poser des problèmes de réglage, de traficabilité et d'exécution de tranchées diverses.		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D <sub>31</sub>
							LA > 45 ou MDE > 45	D <sub>32</sub>

**Classe R**

**MATERIAUX ROCHEUX**  
(évolutifs et non évolutifs)

Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique et le comportement			
Nature pétrographique de la roche		Caractères principaux	Paramètres et valeurs seuils retenus	Sous-classe		
Roches sédimentaires	Roches carbonatées	<p><b>R<sub>1</sub></b> Craie</p> <p>La craie est un empilement de particules de calcite dont les dimensions sont de l'ordre de 1 à 10µm. Cet empilement constitue une structure d'autant plus fragile que la porosité est grande (ou inversement que la densité sèche est faible). Les mesures et constatations de chantier ont montré qu'au cours des opérations de terrassement, il y a formation d'une quantité de fines en relation directe avec la fragilité de l'empilement. Lorsque la craie se trouve dans un état saturé ou proche de la saturation, l'eau contenue dans les pores se communique aux fines produites, leur conférant le comportement d'une pâte, qui s'étend rapidement à l'ensemble du matériau, empêchant la circulation des engins et générant des pressions interstitielles dans les ouvrages. Inversement, lorsque la teneur en eau est faible, la craie devient un matériau rigide, très portant mais difficile à compacter. Enfin, certaines craies peu denses et très humides, peuvent continuer à se fragmenter, après mise en œuvre, sous l'effet des contraintes mécaniques et du gel, principalement.</p>	$\rho_d > 1,7$	craie dense	R <sub>11</sub>	
			$1,5 < \rho_d \leq 1,7$ et $w_n \geq 27$	craie de densité moyenne	R <sub>12</sub> h	
			$1,5 < \rho_d \leq 1,7$ et $22 \leq w_n < 27$		R <sub>12</sub> m	
			$1,5 < \rho_d \leq 1,7$ et $18 \leq w_n < 22$		R <sub>12</sub> s	
			$1,5 < \rho_d \leq 1,7$ et $w_n < 18$		R <sub>12</sub> ts	
			$\rho_d \leq 1,5$ et $w_n \geq 31$	craie peu dense	R <sub>13</sub> th	
			$\rho_d \leq 1,5$ et $26 \leq w_n < 31$		R <sub>13</sub> h	
			$\rho_d \leq 1,5$ et $21 \leq w_n < 26$		R <sub>13</sub> m	
			$\rho_d \leq 1,5$ et $16 \leq w_n < 21$		R <sub>13</sub> s	
		$\rho_d \leq 1,5$ et $w_n < 16$	R <sub>13</sub> ts			
		<p><b>R<sub>2</sub></b></p> <p>Calcaires rocheux divers</p> <p>Ex : - calcaires grossiers - travertins - tufs et encroûtements, etc...</p>	<p>Cette classe regroupe l'ensemble de la gamme des matériaux calcaires rocheux. Leurs caractéristiques prédominantes, vis-à-vis de leur utilisation dans des remblais ou des couches de forme, sont la friabilité et éventuellement, pour les plus fragmentables d'entre eux, la gélivité. D'une manière générale, ces matériaux ne sont pas des matériaux rocheux évolutifs et ne posent pas de problèmes particuliers dans leur emploi en remblai. En couche de forme, leur friabilité peut conduire, par attrition ou désagrégation, à la formation de fines pouvant conférer à l'ensemble du matériau un comportement sensible à l'eau sous circulation des engins.</p>	MDE $\leq 45$	calcaire dur	R <sub>21</sub>
				MDE $> 45$ et $\rho_d > 1,8$	calcaire de densité moyenne	R <sub>22</sub>
				$\rho_d \leq 1,8$	calcaire fragmentable	R <sub>23</sub>

**Classe R (suite)**

**MATERIAUX ROCHEUX (suite)**  
(évolutifs et non évolutifs)

Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique et le comportement			
Nature pétrographique de la roche		Caractères principaux	Paramètres et valeurs seuils retenus	Sous-classe		
Roches sédimentaires	Roches argileuses	<p><b>R<sub>3</sub></b> Marnes Schistes sédimentaires Argilites Pelites</p>	Les matériaux de cette classe se caractérisent par le fait qu'ils possèdent une structure (le plus souvent carbonatée) plus ou moins résistante, dans laquelle sont emprisonnés, en proportion très variable (entre 5 et 95% d'après ce qui est généralement admis), des minéraux argileux susceptibles d'être gonflants. Ils se fragmentent plus ou moins à la mise en œuvre, en libérant des fines, plastiques et sensibles à l'eau. La destruction de leur structure peut se poursuivre après la mise en œuvre sous l'action des contraintes mécaniques de l'eau et du gel. Cette évolution se produit d'autant plus, que les matériaux ont été moins fragmentés à la mise en œuvre, et que la granularité obtenue à ce stade est homométrique. Pour les plus fragmentables d'entre eux (classe R <sub>34</sub> ) il convient de caractériser l'état de leur fraction 0/50 mm.	FR ≤ 7 et DG > 20	Roche argileuse : peu fragmentable, très dégradable	R <sub>31</sub>
			FR ≤ 7 et 5 < DG ≤ 20	Roche argileuse peu fragmentable, moyen <sup>1</sup> dégradable	R <sub>32</sub>	
			FR ≤ 7 et DG ≤ 5	Roche argileuse : peu fragmentable, peu dégradable	R <sub>33</sub>	
			FR > 7 et $\begin{cases} w_n \geq 1,3 w_{OPN} \\ \text{OU IPI} < 2 \end{cases}$	Roche argileuse fragmentable	R <sub>34</sub> th	
			FR > 7 et $\begin{cases} 1,1 w_{OPN} \leq w_n < 1,3 w_{OPN} \\ \text{OU } 2 \leq \text{IPI} < 5 \end{cases}$		R <sub>34</sub> h	
			FR > 7 et $0,9 w_{OPN} \leq w_n < 1,1 w_{OPN}$		R <sub>34</sub> m	
			FR > 7 et $0,7 w_{OPN} \leq w_n < 0,9 w_{OPN}$		R <sub>34</sub> s	
	FR > 7 et $w_n < 0,7 w_{OPN}$	R <sub>34</sub> ts				
	Roches siliceuses	<p><b>R<sub>4</sub></b> Grès Poudingues Brèches</p>	Les matériaux de cette classe peuvent être assimilés à des conglomérats de grains de sable (cas des grès) ou de galets (cas des brèches et poudingues), liés entre eux par un ciment naturel de silice ou de calcite. La résistance plus ou moins grande de cette cimentation confère à ces matériaux des comportements variables (risques de réarrangements après mise en œuvre lorsqu'ils ne sont pas suffisamment compactés, en particulier). Si ces roches sont très fragmentables, leur évolution ultime s'arrête aux grains élémentaires cimentés. Certaines d'entre elles contiennent également une fraction argileuse suffisante pour leur conférer un comportement voisin des matériaux de la classe R <sub>34</sub> .	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	Roches siliceuses dures	R <sub>41</sub>
			LA > 45 ou MDE > 45 et FR ≤ 7	Roches siliceuses de dureté moyenne	R <sub>42</sub>	
FR > 7			Roches siliceuses fragmentables	R <sub>43</sub>		
Roches salines	<p><b>R<sub>5</sub></b> Gypse Sel gemme Anhydrite</p>	Du point de vue mécanique, les matériaux de cette classe s'apparentent à ceux des classes R <sub>2</sub> et R <sub>31</sub> , mais en outre ils sont plus ou moins solubles dans l'eau et induisent, de ce fait, dans les ouvrages, des risques de désordre qui seront d'autant plus grands que: - la solubilité du sel soluble est grande, - sa proportion contenue dans l'ensemble du matériau est élevée, - la fragmentabilité à la mise en œuvre est faible (grande perméabilité de l'ouvrage).	teneur en sel soluble $\begin{cases} \leq 5 \text{ à } 10\% \text{ dans le cas du sel gemme}^* \\ \leq 30 \text{ à } 50\% \text{ dans le cas du gypse}^* \end{cases}$	Roches salines peu solubles	R <sub>51</sub>	
		teneur en sel soluble $\begin{cases} > 5 \text{ à } 10\% \text{ dans le cas du sel gemme}^* \\ > 30 \text{ à } 50\% \text{ dans le cas du gypse}^* \end{cases}$	Roches salines très solubles	R <sub>52</sub>		

Les paramètres inscrits en **caractères gras** sont ceux dont le choix est à privilégier.

**Classe R (suite)**

**MATERIAUX ROCHEUX (suite)**  
(évolutifs et non évolutifs)

Classement selon la nature		Classement selon le comportement			
Nature pétrographique de la roche		Caractères principaux	Paramètres et valeurs seuils retenus	Sous-classe	
Roches magmatiques et métamorphiques	<p><math>R_6</math></p> <p>Granite, basalte, trachyte, andésite... Gneiss, schistes métamorphiques, schistes ardoisiers...</p>	<p>Les matériaux entrant dans cette classe peuvent avoir des caractéristiques mécaniques très différentes ; en particulier, leur fragmentabilité et leur friabilité peuvent varier très largement (de faible à très élevée).</p> <p>Les matériaux de la classe <math>R_{61}</math> et la majorité de ceux de la classe <math>R_{62}</math> ne s'altèrent pas au sein des ouvrages, sous l'effet des contraintes mécaniques et de l'eau ; mais en revanche, ceux de la classe <math>R_{63}</math> ont un comportement voisin des classes <math>R_{34}</math> ou <math>R_{43}</math>.</p>	$LA \leq 45$ et $MDE \leq 45$	Roches magmatiques et métamorphiques dures	$R_{61}$
			$LA > 45$ ou $MDE > 45$ et $FR \leq 7$	Roches magmatiques et métamorphiques de dureté moyenne	$R_{62}$
			$FR > 7$	Roches magmatiques et métamorphiques fragmentables ou altérées	$R_{63}$

## Classe F

# SOLS ORGANIQUES SOUS-PRODUITS INDUSTRIELS

Famille de Matériaux	Caractères principaux	Classement du matériau		
		Paramètres retenus	Valeurs seuils	Sous-classe
<p><math>F_1</math></p> <p>Matériaux naturels renfermant des matières organiques.</p> <p>Ex : terres végétales, humus forestier, vases, tourbes...</p>	<p>La présence de ces matériaux est relativement localisée dans des lieux faciles à identifier ; les plus organiques d'entre eux sont facilement reconnaissables à leur couleur noirâtre et à leur odeur caractéristique.</p> <p>Leurs possibilités d'emploi dans les ouvrages de génie civil dépend de leur teneur en matières organiques.</p>	<p>Le paramètre caractéristique de ces matériaux est leur teneur en matières organiques (% MO). Ensuite, il y a lieu de prendre en compte leur comportement géotechnique, au travers des paramètres retenus pour classer les sols en A, B ou C.</p>	$3 \leq \% \text{ MO} \leq 10$	<p><math>F_{11}</math></p> <p>matériaux faiblement organiques : terres végétales, vases,...</p>
			$\% \text{ MO} > 10$	<p><math>F_{12}</math></p> <p>matériaux fortement organiques : humus forestier, tourbes,...</p>
<p><math>F_2</math></p> <p>Cendres volantes silico-alumineuses de centrales thermiques</p>	<p>Ces matériaux constituent le résidu de la combustion du charbon dans des centrales thermiques. Ce sont des matériaux constitués d'éléments fins (<math>60\% &lt; 80\mu\text{m}</math>), relativement homométriques, sphériques, poreux, mais ne présentant aucune plasticité. De ce fait, ils sont sensiblement moins denses que les sols, relativement drainants, et présentent une portance satisfaisante jusqu'à des teneurs en eau dépassant largement la <math>w_{OPN}</math>. Toutefois, au-delà d'une teneur en eau limite, leur portance chute de manière extrêmement brutale.</p>	<p>Le paramètre caractéristique de ces matériaux est le rapport entre leur teneur en eau naturelle et leur teneur en eau optimum Proctor normal.</p>	$IPI \leq 4$ ou $w_n \geq 1,3 w_{OPN}$	<p><math>F_{2th}</math></p> <p>Cendres volantes très humides</p>
			$4 < IPI \leq 10$ $1,2 w_{OPN} \leq w_n < 1,3 w_{OPN}$	<p><math>F_{2h}</math></p> <p>Cendres volantes humides</p>
			$0,85 w_{OPN} \leq w_n < 1,2 w_{OPN}$	<p><math>F_{2m}</math></p> <p>Cendres volantes à teneur en eau moyenne</p>
			$0,75 w_{OPN} \leq w_n < 0,85 w_{OPN}$	<p><math>F_{2s}</math></p> <p>Cendres volantes sèches</p>
			$w_n < 0,75 w_{OPN}$	<p><math>F_{2ts}</math></p> <p>Cendres volantes très sèches</p>
<p><math>F_3</math></p> <p>Schistes houillers</p>	<p>Ces matériaux proviennent des résidus de l'extraction du charbon ; ils sont stockés depuis plusieurs décennies, voire plus d'un siècle dans des terrils à proximité des mines de charbon. Certains d'entre eux ont subi une auto-combustion provoquée par la pyrolyse du charbon résiduel, sous l'action combinée de la pression des terres, de la réaction exothermique de l'eau sur les pyrites et d'un événement extérieur (foudre en général) provoquant l'inflammation. Les schistes brûlés ont des propriétés géotechniques qui s'apparentent à celles des sols et des matériaux rocheux insensibles à l'eau. Les schistes non brûlés s'apparentent assez généralement aux sols sensibles à l'eau.</p>	<p>Le paramètre déterminant pour ces matériaux, est le fait qu'ils aient subi, ou non, une combustion une fois mis en terrils.</p>	<p>Ces schistes sont reconnaissables à leur couleur de rouge à violet</p>	<p><math>F_{31}</math></p> <p>Schistes houillers totalement brûlés</p>
			<p>Ces schistes sont reconnaissables à leur couleur de noir à orange</p>	<p><math>F_{32}</math></p> <p>Schistes houillers incomplètement ou non brûlés</p>

Les paramètres inscrits en **caractères gras** sont ceux dont le choix est à privilégier.

**Classe F (suite)**

**SOLS ORGANIQUES  
SOUS-PRODUITS INDUSTRIELS (suite)**

Famille de Matériaux	Caractères principaux	Classement du matériau		
		Paramètres retenus	Valeurs seuils	Sous-classe
F <sub>4</sub> Schistes des mines de potasse	Ces matériaux proviennent des résidus de l'extraction des minerais de potasse. Ils sont stockés à proximité des mines depuis plusieurs décennies. Ils contiennent une proportion variable de chlorure de sodium (de 5% pour les résidus produits actuellement, jusqu'à 20% pour les résidus stockés). Du point de vue géotechnique, leur comportement à la mise en œuvre peut en grande partie se comparer à celui des sols des classes B <sub>p</sub> et B <sub>s</sub> (éventuellement A <sub>1</sub> et A <sub>2</sub> ). A moyen et long terme, ce comportement présente deux particularités intéressantes : - apparition d'une rigidification du fait d'une prise due à la présence d'anhydrite (dans le cas des schistes de fraîche production) - absence de gonflement au gel, due au NaCl présent.	Le paramètre déterminant pour ces matériaux est leur teneur en chlorure de sodium qui détermine les risques de dissolution et de pollution. Ensuite, il y a lieu de prendre en compte leur comportement au travers des paramètres retenus pour classer les sols.	% NaCl ≤ 10	F <sub>41</sub> Schistes des mines de potasse à faible teneur en NaCl
			% NaCl > 10	F <sub>42</sub> Schistes des mines de potasse à forte teneur en NaCl
F <sub>5</sub> Phosphogypse	Il s'agit d'un gypse artificiel, sous-produit de la fabrication des engrais phosphatés, stockés par voie hydraulique à proximité des unités de fabrication. Du point de vue géotechnique, on peut approximativement comparer son comportement à celui d'un sable fin, anguleux, très propre mais très friable. Du point de vue chimique, il s'agit d'un matériau légèrement soluble dans l'eau (2 g/l) qui renferme certains composés plus ou moins toxiques, mais dont la toxicité peut être quasi annulée par un traitement de neutralisation chimique à la chaux. L'utilisation à proximité d'ouvrages en béton, en arase terrassement et dans les parties de remblai situées en zones inondables, est en général à proscrire (risques de formation d'ettringite ou de dissolution).	Les paramètres déterminants pour ce matériau sont : - le fait qu'il soit ou non neutralisé chimiquement par de la chaux, - la granularité définie par le D <sub>50</sub> , - la teneur en eau.	D <sub>50</sub> > 80µm w <sub>n</sub> ≥ 1,20 w <sub>OPN</sub>	F <sub>51,h</sub> Phosphogypse grossier neutralisé à la chaux, à teneur en eau élevée
			D <sub>50</sub> > 80µm w <sub>n</sub> < 1,20 w <sub>OPN</sub>	F <sub>51,m</sub> et s Phosphogypse grossier neutralisé à la chaux, à teneur en eau faible ou moyenne
			D <sub>50</sub> ≤ 80µm	F <sub>52</sub> Phosphogypse fin et phosphogypse grossier non neutralisé
F <sub>6</sub> Mâchefers d'incinération des ordures ménagères	Ces matériaux peuvent avoir des compositions assez variables dans le temps et suivant la technologie des usines de fabrication. En particulier, leur teneur en matières putrescibles peut varier de 2 à 25 % suivant le degré d'incinération, et leur teneur en éléments métalliques de 5 à 25 % suivant que le matériau a subi ou non, un traitement de démétallisation (triage magnétique, le plus souvent). Il convient également de connaître leurs teneurs en éléments toxiques solubles. Les cendres volantes, provenant du traitement des fumées de combustion, ne doivent en aucun cas être mélangées aux mâchefers, sous peine de supprimer toute possibilité de les réutiliser en technique routière (risques élevés de pollution). Après stockage de plusieurs mois, il se développe une prise qui leur confère un comportement de matériau rocheux tendre (R <sub>1,2</sub> ). D'une manière générale, il convient d'éviter l'utilisation de ces matériaux au contact des ouvrages d'art et dans les zones inondables.	Les paramètres déterminants pour ces matériaux sont : - le degré d'incinération mesuré par la perte au feu à 500°C (PF) - le fait qu'ils aient subi ou non une élaboration (déferrailage, criblage, homogénéisation) et un stockage de plusieurs mois, - leurs teneurs en éléments toxiques solubles.	PF ≤ 5% Teneurs en éléments toxiques solubles inférieures aux valeurs maximales autorisées par la réglementation en vigueur.	F <sub>61</sub> Mâchefers bien incinérés criblés, déferrailés, peu chargés en éléments toxiques solubles et stockés durant plusieurs mois
			F <sub>62</sub> idem F <sub>61</sub> mais de fraîche production	F <sub>62</sub> Idem F <sub>61</sub> mais de fraîche production
			PF > 5% Teneurs en éléments toxiques solubles supérieures aux valeurs maximales autorisées par la réglementation en vigueur.	F <sub>63</sub> Mâchefers mal incinérés ou n'ayant subi aucune élaboration ou fortement chargés en éléments toxiques solubles

**Classe F (suite)**

**SOLS ORGANIQUES  
SOUS-PRODUITS INDUSTRIELS (suite)**

Famille de Matériaux	Caractères principaux	Classement du matériau		
		Paramètres retenus	Valeurs seuils	Sous-classe
F <sub>7</sub> Matériaux de démolition	Ces matériaux ont des compositions extrêmement variables du fait de la disparité de leurs origines et du type de collecte (sélective ou non) appliquée pour les rassembler. Leur identification doit résulter à la fois de l'observation visuelle des stocks (avec exécution de tranchée de reconnaissance, si nécessaire) et d'une enquête sur les origines de la constitution de ces stocks. Leur emploi induit toujours certains risques de gonflement du fait de la présence d'éléments indésirables comme en particulier du plâtre.	Les paramètres déterminants pour ces matériaux sont : - la présence d'éléments putrescibles et de plâtre, - l'exécution d'une opération d'élaboration (criblage, concassage, homogénéisation,...).	Evaluation visuelle	F <sub>71</sub> Matériaux de démolition, sans plâtre, épurés des éléments putrescibles, concassés, criblés, déferrillés, homogénéisés
			Evaluation visuelle	F <sub>72</sub> Idem F <sub>71</sub> , mais pouvant contenir du plâtre
			Evaluation visuelle	F <sub>73</sub> Matériaux de démolition non épurés des éléments putrescibles ou non déferrillés et non criblés
F <sub>8</sub> Laitiers des hauts-fourneaux	Ces matériaux sont des sous-produits de fabrication de la fonte. Leurs caractéristiques géotechniques diffèrent selon le processus de refroidissement utilisé : eau sous pression pour le laitier granulé, eau et air pour le laitier bouleté, air comprimé pour le laitier expansé, refroidissement dans l'air ambiant pour le laitier cristallisé. Le comportement des trois premiers types de laitier s'apparente à celui de sables ou de graves plus ou moins friables, alors que le laitier cristallisé a un comportement de matériau rocheux. Ce sont, à l'origine, des matériaux insensibles à l'eau, mais qui se retrouvent souvent mélangés dans les terrils à d'autres matériaux sensibles à l'eau, tels que des stériles de minerai de fer, par exemple. Ces matériaux peuvent dans certaines circonstances encore mal identifiées générer des gonflements inacceptables.			
F <sub>9</sub> Autres déchets et sous-produits industriels	Il s'agit, par exemple, des laitiers d'aciérie ou d'autre origine sidérurgique, des sables de fonderie, de certains déchets de l'industrie chimique et pétrochimique, etc... La possibilité de réutilisation de ces matériaux particuliers dans des remblais ou des couches de forme, doit, pour chaque cas, faire l'objet d'une étude spécifique, comportant trois aspects : - technique, pour la garantie de stabilité des ouvrages construits, - écologique, pour les risques de diffusion de la pollution, - économique, pour la comparaison avec les matériaux naturels concurrents.			

