



(ID Modèle = 454913)

Ineris - 201162 - 2342192 - v1.0

22/12/2021

Remblayage de carrières à ciel ouvert par des déchets inertes

Guide de bonnes pratiques sur les critères de stabilité des remblais

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 : CHERKAOUI Auxane, FRANCK Christian,

Vérification : GOUZY AURELIEN

Approbation : Document approuvé le 22/12/2021 par DUPLANTIER STEPHANE

Liste des personnes ayant participé à l'étude : GOMBERT Philippe

Table des matières

1	Introduction	7
2	Définitions	8
3	Cadre réglementaire général	9
4	Démarche suivie et retours d'expérience	10
4.1	Description de la démarche	10
4.2	Principaux retours des inspecteurs DREAL	10
4.3	Principaux enseignements issus des exploitants	10
4.4	Gestion des désordres par l'exploitant	11
5	Critères liés à la zone d'accueil du remblai	12
5.1	La géologie du site	12
5.2	La géomorphologie du site	12
5.3	L'hydrogéologie et l'hydrographie du site	13
5.3.1	Typologie des carrières à ciel ouvert	13
5.3.2	Origine des eaux et impacts possibles sur les remblais	13
5.4	L'historique du site	14
5.5	Autres facteurs externes	15
6	Critères liés au remblai	16
6.1	Les caractéristiques du remblai	16
6.2	La morphologie finale du remblai	20
6.3	La gestion de l'eau au niveau du remblai	23
6.3.1	Les circulations d'eau dans le remblai	23
6.3.2	Préconisations pour la gestion des eaux	24
6.4	Les techniques de remblayage	25
6.5	Les contrôles d'exécution et opérations de maintenance du remblayage	26
7	Critères de réaménagement en fonction de la destination finale	28
7.1	Critères de réaménagement en fonction des caractéristiques du remblayage	28
7.2	Critères de réaménagement en fonction des caractéristiques du site initial	30
8	Synthèse des bonnes pratiques pour le remblayage de carrières à ciel ouvert par des déchets inertes	33
8.1	Logigramme et tableau de synthèse	34
8.2	Les attendus d'une étude de stabilité de remblais	36
8.3	Les recommandations d'études et de travaux en situation de post-désordre	38
9	Conclusion	44
10	Références	45

FIGURES

Figure 1	: Performances du recyclage des déchets inertes en France en 2017 (ECV, [10])	7
Figure 2	: Terminologie banquette-front-gradin utilisée dans le guide	8
Figure 3	: Exemple de renforcement en pied par mise en place d'un mur en enrochement	11
Figure 4	: Principales typologies d'exploitation des carrières en relation avec le niveau de la nappe phréatique (d'après DREAL Centre-Val de Loire, 2019)	14
Figure 5	: Principales zones de circulation de l'eau (à gauche cas d'une fosse, à droite cas d'une verse en flanc de carrière)	14

Figure 6 : Zonage sismique de la France (http://www.planseisme.fr).....	15
Figure 7 : Les différents éléments constitutifs d'un remblai (vue en coupe)	17
Figure 8 : Tableau synoptique de la classification des matériaux selon leur nature d'après le GTR (Source : https://docplayer.fr/16720117-Arvor-geotechnique-ingenierie-des-sols-et-des-fondations.html)	18
Figure 9 : Visualisation de la hauteur à donner au remblai (H_R) pour atteindre la cote du projet (H_p) en prenant en compte le tassement (d'après ENPC, [11])	21
Figure 10 : Exemples classiques de glissements et expressions des forces motrices et résistantes qui interagissent	22
Figure 11 : Eperon (à gauche) et masque (à droite) pour le drainage des pentes (Faure et Gress, [12])	24
Figure 12 : Exemples de traitement ou de mitigation (à gauche : cas d'une fosse et à droite cas d'un flanc de carrière).....	25
Figure 13 : Opérations de gerbage et compactage des remblais.....	26
Figure 14. Finalité du remblayage des carrières (ECV, [10]).....	28
Figure 15 : Opération de sous-solage ou ameublissement décimétrique des terrains par un soc tiré par un bulldozer (d'après Lansiaart et Odent, [15]).....	29
Figure 16 : Epaisseur minimale de terre végétale à mettre en place pour permettre une implantation satisfaisante (d'après Lansiaart et Odent, [15]).....	30
Figure 17 : Schéma global des différentes étapes menant à un réaménagement d'une carrière à ciel ouvert par remblayage de déchets inertes.....	34
Figure 18 : Classification des glissements selon Cruden et Varnes, [7]. En encadré rouge les glissements les plus fréquents observés en remblais de carrières	39
Figure 19 : Différentes méthodes de stabilisation par terrassement (Reiffsteck, [19]).....	43
Figure 20 : Coupe-type d'une tranchée drainante (Reiffsteck, [19]).....	43

TABLEAUX

Tableau 1 : Paramètres récapitulatifs du caractère « en eau » ou « hors d'eau » des carrières à ciel ouvert (d'après [4]).....	13
Tableau 2 : Type de déchets inertes selon l'utilisation la plus favorable	17
Tableau 3 : Différents types d'essais géotechniques selon les caractéristiques recherchées (adapté et complété d'après https://esiris-group.com/essai-de-mecanique-des-sols/)	20
Tableau 4 : Valeurs indicatives de pentes de remblai en fonction de sa nature et de sa hauteur (adapté et complété d'après Mokhtar Ahdouga, [17])	21
Tableau 5 : Réaménagement en fonction de la pente maximale des remblais (Source : d'après CPTAQ, 2016, [6])	29
Tableau 6 : Principales possibilités d'aménagement des carrières après extraction des matériaux en tenant compte du type de carrière et de son environnement (d'après Berard, [1]).....	31
Tableau 7 : Mise en œuvre des bonnes pratiques pour le remblayage de carrières à ciel ouvert par déchets inertes (critères de stabilité à long terme).....	35
Tableau 8 : Données à acquérir ou compléter dans le cadre d'une étude de stabilité de remblais en contexte de carrière	37
Tableau 9 : Classes d'intensité des mouvements de pente (extrait du guide des aléas miniers de l'Ineris, [14]).....	38
Tableau 10 : Déroulement d'une étude de stabilité post-désordre (glissement de verse). En bleu la recherche des mécanismes et causes, en vert l'étude des dispositions de mise en sécurité	41
Tableau 11 : Principaux travaux de mise en sécurité (méthodes et points importants adaptés de [19])	43

PHOTOGRAPHIE

Photographie 1 : Deux risbermes dans un talus (Ineris).....	23
---	----

LISTE DES ANNEXES

- A : Articles 12.3 et 12.4 de l'arrêté du 12 septembre 1994 relatif aux exploitations de carrières
- B : Annexe 1 de l'arrêté du 12 décembre 2014
- C : Tableaux d'une sélection de classes de sol issues du Guide des Terrassements Routiers (SETRA, LCPC, 2000)
- D : Exemples de réaménagement de sites avec enjeux de stabilité
- E : Tableau synthétique des missions d'ingénierie géotechnique, issu de la norme NF P 94-500
- F : Typologie des instabilités rocheuses (LCPC, 2004)

Résumé

La réglementation prévoit que le remblayage des carrières 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. 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 à ciel ouvert, 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.

Concernant les critères de stabilité liés à la zone d'accueil du remblai, il est important de caractériser précisément le site exploité (son historique, sa géologie, sa morphologie), de vérifier la résistance des terrains supports du remblai, et de définir l'origine et la localisation des eaux du site dans l'objectif d'en prévoir une gestion maîtrisée. S'agissant des critères de stabilité liés au remblai, il est préconisé de déterminer la nature et la granulométrie des déchets inertes, de pratiquer des essais géomécaniques si le comportement du matériau est incertain par rapport aux contraintes subies pour la hauteur projetée, ou si le site présente des indices d'instabilité, et d'être vigilant lors du dépôt de déchets inertes. En outre, la morphologie de la zone remblayée mérite une attention particulière en termes de stabilité : si une verse est créée et selon sa hauteur, il sera conseillé de réaliser une étude de stabilité garantissant la sécurité à long terme, c'est à dire bien après le réaménagement. La stabilité est aussi assurée par le compactage des couches et le zonage des déchets inertes dans le remblai pour favoriser l'emploi de matériaux avec une granulométrie élevée à la base. Dans le cas des berges des carrières en eau, un reprofilage pour aboutir à une pente limitée est recommandé. Enfin, concernant le réaménagement final, la remise en place des couches de couverture permet une revégétalisation des terrains contribuant à la tenue des terrains et donc à la stabilité à long terme.

Il ressort de cette analyse que les deux principaux critères dont il faut tenir compte pour assurer la stabilité d'une zone remblayée sont la pente des remblais et la gestion des eaux. À ces deux critères s'ajoutent des précautions à prendre pour la prise en charge des déchets « particuliers », à savoir ceux contenant du gypse, de l'argile ou ceux de granulométrie très faible ou très hétérogène.

Dans ce guide, des recommandations sont proposées, relativement aux attendus d'une étude de stabilité dans le cadre d'un projet de remblayage, d'une part, et relativement aux études et travaux de mise en sécurité en situation de post-désordre, d'autre part.

Pour citer ce document, utilisez la dénomination ci-après :

Institut national de l'environnement industriel et des risques, Remblayage de carrières à ciel ouvert par des déchets inertes, Verneuil-en-Halatte : Ineris - 201162 - v1.0, 22/12/2021.

Mots-clés :

Carrière à ciel ouvert, Remblayage, Déchets inertes, Stabilité

1 Introduction

L'arrêté du 22 septembre 1994 modifié relatif aux exploitations de carrières pose le principe fondamental que le remblayage de celles-ci 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. 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 à ciel ouvert, afin de limiter les risques géotechniques associés au remblayage.

L'utilité de ce guide est démontrée par l'augmentation du nombre de déchets inertes 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 (Figure 1).

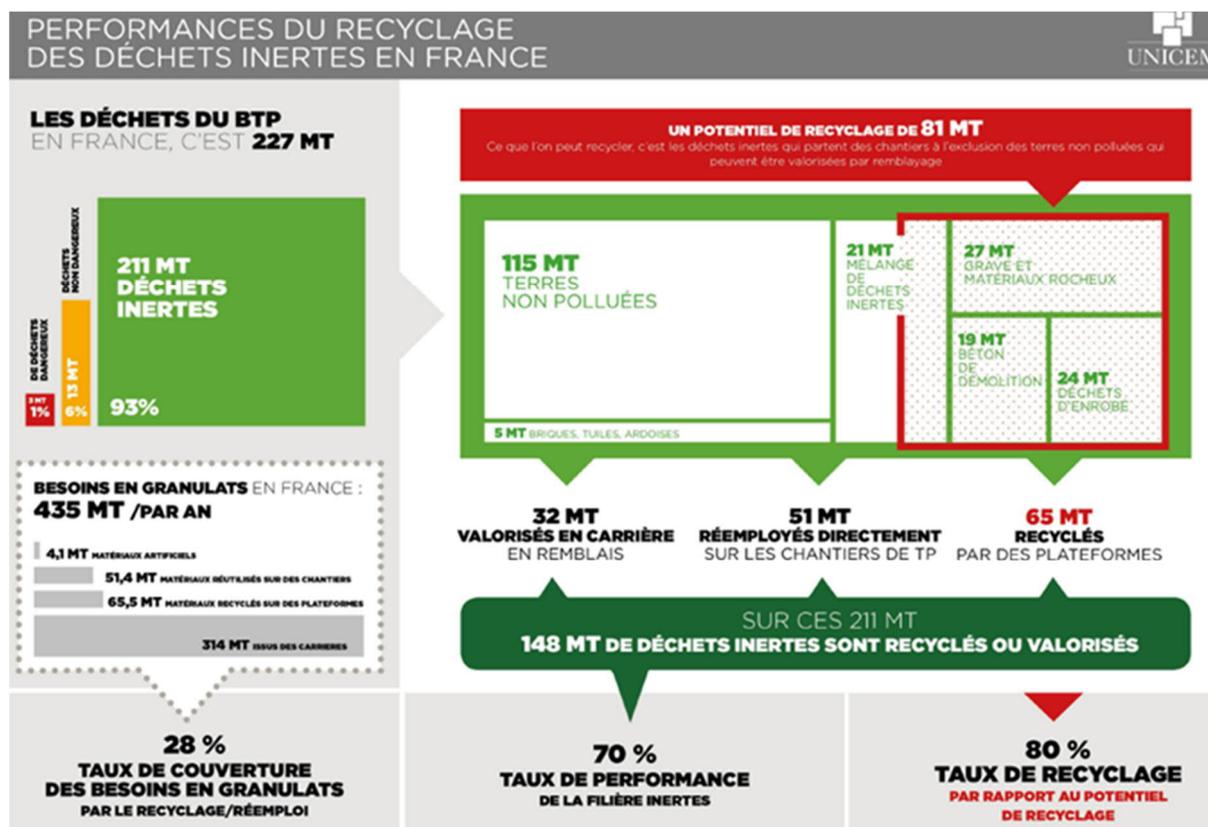


Figure 1 : Performances du recyclage des déchets inertes en France en 2017 (ECV, [10])

Ce guide aborde essentiellement les bonnes pratiques liées à la stabilité 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 à ciel ouvert.

La première partie du guide décrit la démarche suivie pour aboutir à son élaboration, notamment le retour d'expérience issu des remblayages réalisés sur différents sites. Ensuite, des bonnes pratiques sont préconisées, en examinant les critères de la zone d'accueil du remblai, d'une part, (voir la définition adoptée au chapitre 2) et ceux du matériau constitutif du remblai d'autre part. Le chapitre 7 du guide

précise les critères de réaménagement du site à long terme et donne quelques exemples de sites réaménagés avec succès (annexe D).

Une synthèse des bonnes pratiques à adopter, appuyée de tableaux synoptiques, est proposée à la suite, ainsi que les principaux attendus d'une étude de stabilité des remblais. Enfin des recommandations d'études et de travaux de mise en sécurité post-désordre sont proposées.

2 Définitions

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

BTP : Bâtiments et Travaux Publics.

Banquette, front, gradin : éléments constitutifs d'une carrière à ciel ouvert, distingués dans ce guide selon le principe de la Figure 2.

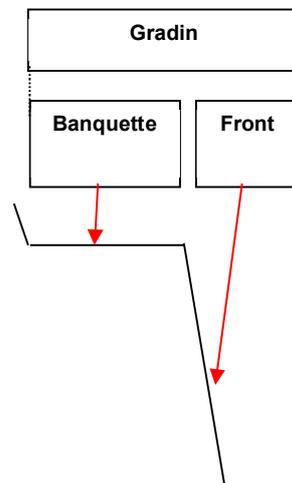


Figure 2 : Terminologie banquette-front-gradin utilisée dans le guide

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 tels 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).

Fosse : ce terme désigne une excavation créée dans la terre, dans le cas présent il définit une carrière circulaire, bordée sur la quasi-totalité de son pourtour par des fronts.

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.

Risberme : ce terme désigne généralement une banquette aménagée dans un talus ou un remblai pour en diminuer la pente et collecter/acheminer les eaux de ruissellement.

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.

Verse : zone où sont déversés les stériles d'exploitation ou les déchets inertes, dans la pente, souvent depuis la partie sommitale des gradins de l'exploitation, parfois depuis une banquette intermédiaire.

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.

3 Cadre réglementaire général

L'arrêté du 22 septembre 1994 modifié relatif aux exploitations de carrières 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 ».

Les opérations de remblayage des carrières à ciel ouvert par des déchets inertes interviennent à deux moments de la vie du site :

- la remise en état consistant *a minima* à mettre en sécurité les fronts de taille et à ce que l'espace affecté par l'exploitation s'insère à nouveau dans le paysage, compte tenu de la vocation ultérieure du site (article 12.2 de l'arrêté du 22 septembre 1994) ;
- le réaménagement du site, après remise en état, qui n'est généralement plus encadré au titre de la législation ICPE¹, et qui peut s'orienter vers un réaménagement « à l'identique » visant à maintenir ou recréer tout ou partie du milieu initialement impacté ou un réaménagement « de diversification », générant de nouveaux milieux favorables à d'autres espèces ou habitats.

¹ Installation Classée pour la Protection de l'Environnement

4 Démarche suivie et retours d'expérience

4.1 Description de la démarche

Pour aboutir à l'élaboration de ce guide, le recueil des retours d'expérience et attentes de certains exploitants et des DREAL a été mené. Ces contacts ont donné lieu à plusieurs échanges téléphoniques et à des visites de sites.

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.

4.2 Principaux retours des inspecteurs DREAL

Au travers des échanges avec les inspecteurs DREAL, notamment lors de visite de sites, plusieurs besoins ont été remontés dont les principaux sont les suivants :

- la nécessité de disposer de principes pour analyser les études fournies par l'exploitant, notamment relatives à la stabilité du remblai (hypothèse de calcul du coefficient de sécurité, prise en compte ou non de l'eau dans les études de stabilité, ...)
- l'importance de prendre en compte non seulement la stabilité du remblai à court terme mais aussi à long terme dans l'analyse réalisée ;
- l'importance de connaître les techniques de remblayage utilisées ;
- une vigilance à avoir sur la nature des matériaux arrivant sur la plateforme d'accueil.

4.3 Principaux enseignements issus des exploitants

Des exploitants nous ont permis de visiter leurs sites et ont apporté des éléments utiles à la problématique. En outre, plusieurs sites en cours de remblayage de LafargeHolcim ont répondu à un questionnaire permettant de faire ressortir les bonnes pratiques existantes et la manière de gérer les instabilités.

Il ressort que les exploitants respectent des règles « internes » lors de la mise en place de déchets inertes. Il arrive aussi que la mise en place du remblai repose essentiellement sur un chef de carrière expérimenté qui a une très bonne connaissance de son site et du comportement des matériaux qu'il reçoit. Se pose alors la question du transfert de compétences et connaissances à un responsable d'exploitation moins expérimenté.

En outre, lorsqu'il s'agit de sites encore en exploitation, l'exploitant doit 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.

D'une manière générale, les exploitants suivent les préconisations suivantes :

- privilégier le remblayage des fosses pour éviter la formation de versées (voir schéma de principe en Figure 5) : en effet, les instabilités sur une fosse remblayée se réduiront à du tassement alors que sur une versée, des glissements plus ou moins profonds pourront être observés ;
- prévoir un réseau de drainage pour gérer les écoulements d'eau ;
- revégétaliser rapidement après la fin du remblayage.

4.4 Gestion des désordres par l'exploitant

Deux types de désordres nous ont été rapportés par les exploitants.

Le premier type concerne des désordres apparus à court terme pendant la phase de remblayage : des glissements ou mouvements superficiels du fait de pentes transitoires trop élevées ou de précipitations intenses juste après la mise en place du remblai. Ce type de désordre est provisoire, non irréversible dans le sens où il peut être rapidement traité par l'exploitant, notamment lors de la poursuite de la mise en place des remblais.

Le deuxième type concerne des désordres apparus à moyen et long terme sur des zones de remblayage ancien. Il s'agit de glissements profonds sur des verses ayant pour causes principales une mauvaise gestion des eaux et/ou une pente trop importante.

Lors de l'apparition de ces désordres, le premier réflexe de l'exploitant est de mettre en place une surveillance dans l'attente des travaux de traitement. Cette surveillance est généralement poursuivie après le traitement du désordre pour vérifier que le mouvement est bien stabilisé. La surveillance mise en place peut être un suivi de la topographie par lidar, scan 3D ou photogrammétrie. Elle est réalisée de manière régulière, puis espacée sur le long terme si aucun mouvement n'est observé. Pour surveiller l'intégrité et l'efficacité du dispositif de drainage, le suivi de regards et/ou de piézomètres est souvent réalisé.

Les travaux de traitement mis en œuvre consistent généralement à reprofiler la zone et à ajouter et/ou dimensionner correctement le réseau de drainage. Dans le cas de glissements profonds et lorsque des contraintes empêchent le reprofilage de la zone, il peut être décidé de mettre en place un dispositif visant à renforcer le pied de la verse pour la stabiliser (Figure 3).

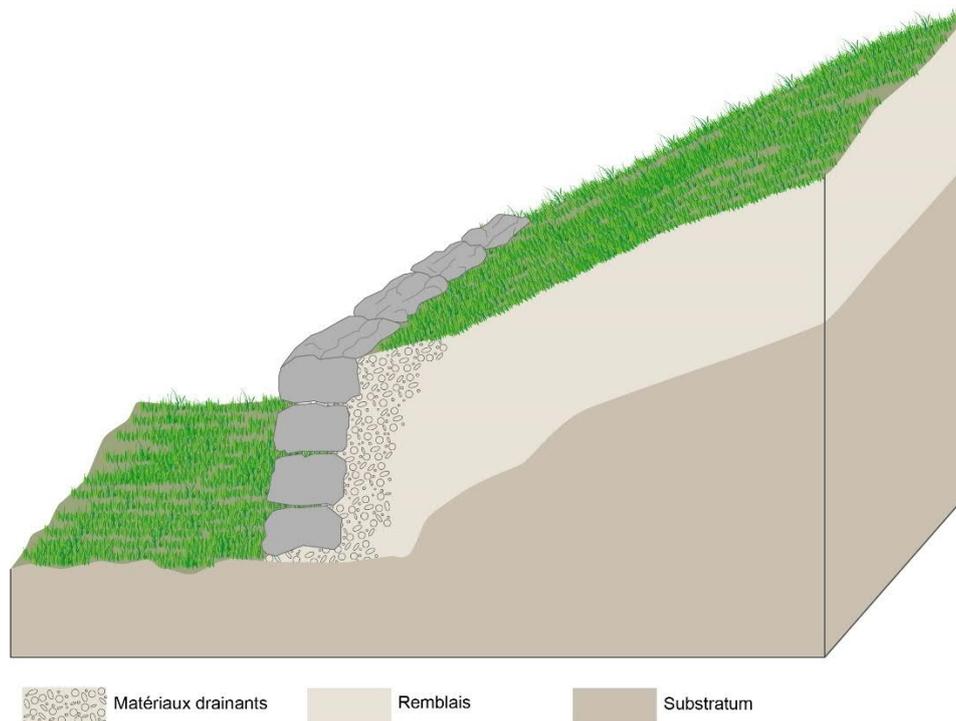


Figure 3 : Exemple de renforcement en pied par mise en place d'un mur en enrochement

Les bonnes pratiques décrites dans la suite de ce guide visent à éviter de telles situations par l'application en amont de préconisations pour la mise en place des remblais.

5 Critères liés à la zone d'accueil du remblai

Concernant la zone d'accueil des remblais, plusieurs éléments sont à considérer pour s'assurer de la stabilité à long terme du site.

5.1 La géologie du site

Les contextes géologiques des sites d'accueil des remblais sont très différents. Entre autres classifications relatives à la nature ou l'usage du matériau extrait, l'UNICEM définit deux principaux types de carrières (Voeltzel et Février, [29]) :

- 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.

Outre les limites dues à l'hydrographie et l'hydrogéologie propre à chaque site (traitées dans la partie 5.2, notamment pour les matériaux sensibles à l'eau comme le gypse ou l'argile), l'important est de vérifier la résistance des terrains supports du remblai, particulièrement lorsque celui-ci est de grande hauteur, supérieure à une quinzaine de mètres, et/ou lorsque le substratum contient des couches évolutives et de plus faible résistance mécanique (Bescond et al, [2]). Les lithologies du site sont généralement connues à l'étape de remblayage car elles sont connues régionalement (cartes géologiques, BSS) et ont déjà été investiguées (tout du moins les premiers mètres sous la base de la carrière) dans le cadre des campagnes de reconnaissance du gisement et d'extraction. Dans un premier temps, les couches potentiellement évolutives ou compressibles peuvent donc être appréciées sur la base de ces critères lithologiques. L'exploitant prêtera ainsi attention aux lithologies suivantes :

- les sols² fins saturés en eau ou proche de la saturation (souvent de nature argileuse) ;
- les sols secs ou à faible teneur en eau et les sols grenus (limons³ non saturés, sables) ;
- les sols évolutifs, notamment en présence ou du fait de variations d'eau (schistes très altérés, gypse, anhydrite, autres évaporites).

Pour ces cas, Bescond et al [2] conseillent de réaliser une étude géotechnique qui devra comporter :

- une reconnaissance des terrains sous-jacents (la recherche notamment des couches aux caractéristiques géotechniques faibles) ;
- la mesure des caractéristiques mécaniques (principalement l'aptitude au tassement, la résistance à la compression et au cisaillement) de ces sols ;
- une prévision à long terme du comportement des matériaux.

5.2 La géomorphologie du site

La géomorphologie de la zone d'accueil du remblayage peut-être de deux types :

- une carrière en forme de fosse, soit en eau, soit partiellement en eau ou soit hors d'eau ;
- une carrière à flanc de relief (le front d'exploitation n'est pas circulaire).

Comme les exploitants le soulignent, le comblement de fosses favorise davantage la stabilité à long terme des remblais que le comblement d'une carrière à flanc de relief. En effet, le remblayage en fond de fosse permet de rejoindre les bords opposés de l'exploitation, les matériaux contribuant ainsi à la

² La dénomination des sols dans ce guide reprend la classification du Guide des Terrassements Routiers du SETRA LCPC, [20], dont le tableau synoptique est présenté en Figure 8.

³ On emploie également le terme de « silts » qui correspond à une catégorie granulométrique, le terme limon pouvant être élargi, dans son emploi, à un mode de dépôt.

butée de pied et au confinement des anciens fronts. En revanche un comblement à flanc de relief nécessite la formation d'une verse avec une pente plus ou moins importante, sans butée possible.

Ainsi, toute chose égale par ailleurs, en configuration de flanc et de verse créée, le phénomène de glissement doit être considéré, en sus de celui de tassement. En configuration de fosse, le principal phénomène est le tassement. Pour cette dernière configuration, si l'ensemble de la fosse n'est pas remblayé, le phénomène de glissement doit aussi être considéré.

Le phénomène de glissement doit bien entendu être évalué à la fois pour la verse mais également pour les flancs sur lesquels elle est apposée.

Dès lors qu'il y a création de verse, la DREAL demande généralement de réaliser une étude de stabilité pour estimer correctement le coefficient de sécurité et la pente préconisée.

5.3 L'hydrogéologie et l'hydrographie du site

5.3.1 Typologie des carrières à ciel ouvert

En raisonnant uniquement à partir du paramètre eau, il existe deux types de carrières à ciel ouvert pour Lansiaart et Oden [15] :

- les carrières à sec ou appelées « carrière hors d'eau » : ce sont les exploitations dont le fond n'est jamais recouvert d'eau et se trouvent à plus de 1 m au-dessus du niveau des plus hautes eaux souterraines (Tableau 1) (Callier et Charbonnier, [4]) ;
- les carrières en eau (sablère, gravière, ballastière). Callier et Charbonnier [4] incluent aussi les carrières susceptibles de se remplir, même partiellement, par ruissellement de surface ou débordement d'eau de crue de cours d'eau, ainsi que les carrières dont le fond se trouve à moins de 1 m du niveau des plus hautes eaux souterraines (Tableau 1).

Tableau 1 : Paramètres récapitulatifs du caractère « en eau » ou « hors d'eau » des carrières à ciel ouvert (d'après [4])

Contexte du site	Caractéristiques
Site en eau*	- Site rempli d'eau, totalement ou partiellement - Site dont le fond peut être momentanément immergé, même partiellement - Site présentant moins de 1m de la zone non saturée (ZNS) sous le fond de la partie la plus basse de la cavité en période de plus hautes eaux de la nappe
Site hors eau	Tous les sites ne répondant pas aux critères présentés pour les sites en eau

(*) Quelle que soit l'origine de cette eau. Un seul des critères satisfait est suffisant pour que le site soit considéré "en eau"

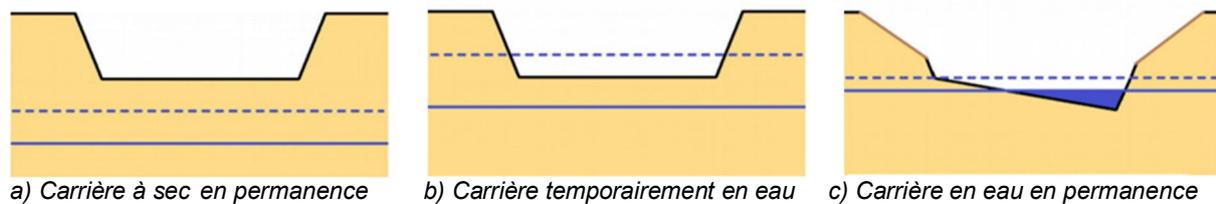
5.3.2 Origine des eaux et impacts possibles sur les remblais

Les eaux météoriques peuvent s'infiltrer dans les remblais s'ils sont perméables (sables, graviers, blocs...), ou ruisseler à leur surface s'ils sont imperméables (argiles, limons...). S'ils sont perméables, ces eaux peuvent s'accumuler à la base du remblai et le déstabiliser (glissement superficiel ou profond). Si les remblais, du moins à leur surface, sont de nature imperméable, les eaux peuvent alors provoquer des mouvements superficiels de type érosion et ravinement. L'infiltration et le ruissellement sont des mécanismes de nature à déstabiliser les remblais s'ils prennent de l'importance et s'ils ne sont pas maîtrisés.

Les eaux de ruissellement peuvent être d'origine météorique ou superficielle, résultant pour ce dernier cas du débordement d'un cours d'eau (crue) ou d'un thalweg normalement sec (inondation par ruissellement⁴). Le ruissellement des eaux superficielles, notamment lors de pluies ou de crues intenses, peut générer des débits d'eau importants et occasionner les mêmes instabilités de remblais que décrites précédemment.

⁴ <https://www.georisques.gouv.fr/articles-risques/les-inondations-par-ruissellement>

Les eaux souterraines forment quant à elles des nappes dont le niveau peut varier de plusieurs mètres en fonction des caractéristiques géologiques du sous-sol, des saisons et des conditions climatiques. Hormis le cas des carrières qui sont en permanence en eau (gravières, ballastières...), celles dont le fond ne se situe qu'à quelques mètres au-dessus de la nappe sont également susceptibles de s'envoyer temporairement (Figure 4). En présence de remblai, les eaux souterraines vont venir circuler dans le remblai ou saturer la zone remblayée. Cela peut provoquer des glissements (Stilger-Szydlo, [23]) ou des tassements dus à de la suffosion (entraînement de particules fines au sein d'un squelette plus grossier) si les remblais sont de granulométrie hétérogène ou des glissements profonds, voire à de la dissolution si le remblai renferme une certaine proportion de matériaux solubles (craie, calcaire, gypse...).



Légende : ——— Basses eaux - - - - - Hautes eaux ■ Plan d'eau

Figure 4 : Principales typologies d'exploitation des carrières en relation avec le niveau de la nappe phréatique (d'après DREAL Centre-Val de Loire, 2019)

La Figure 5 résume les principaux impacts des eaux sur les remblais.

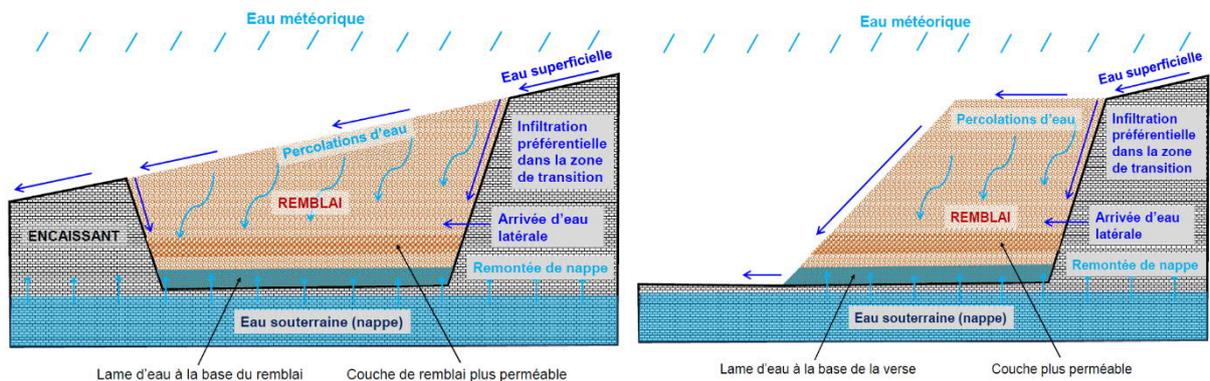


Figure 5 : Principales zones de circulation de l'eau (à gauche cas d'une fosse, à droite cas d'une verse en flanc de carrière)

Comme la migration de l'eau dans et/ou sur les remblais a une influence sur leur stabilité, il est important de définir le schéma d'écoulement des eaux avant la mise en place du remblai. Cela permettra de prévoir les moyens pour gérer les circulations d'eau (voir partie 6.3).

5.4 L'histoire du site

La connaissance de l'histoire de la carrière d'accueil et de son environnement est importante pour évaluer la stabilité des futures zones remblayées. Il s'agit de connaître :

- les caractéristiques géométriques de l'exploitation, souvent non anodines car guidées par la présence de formations ou accidents géologiques favorables ou défavorables ;
- les anciennes instabilités constatées et si possible leurs causes ;
- l'écoulement et les arrivées d'eau dans le proche périmètre et au sein de la carrière.

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

Ces connaissances sont acquises lorsque l'exploitant n'a pas changé, et lorsque le transfert d'informations entre les chefs de carrière successifs s'est produit. 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.

Cette acquisition de connaissance historique permet d'établir un premier diagnostic de stabilité sur ces zones, et de pouvoir éventuellement mettre en place des mesures préventives ou traiter les instabilités existantes pour éviter la formation d'un désordre plus important.

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

5.5 Autres facteurs externes

Il peut être évoqué ici le facteur lié à la sismicité locale. Celle-ci ne se répartit pas de manière uniforme sur l'ensemble des territoires. En France elle se traduit au niveau réglementaire par un zonage sismique, qui donne pour chaque commune son niveau d'exposition. Ce zonage découpe le territoire français en 5 zones de sismicité (très faible, faible, modérée, moyenne, forte, Figure 6).

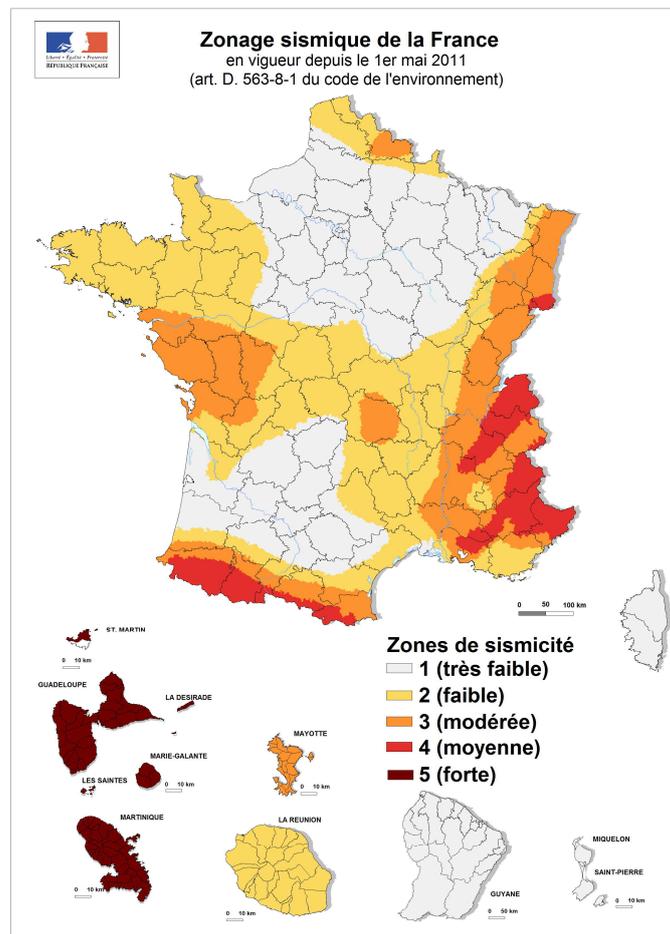


Figure 6 : Zonage sismique de la France (<http://www.planseisme.fr>)

A cela peut s'ajouter des effets de site liés notamment à la nature des sols ou le contraste entre la présence de sols meubles et de pointements rocheux⁵. Bien que les cas de remobilisation soient rares, celle-ci ne peut être exclue. Il est recommandé d'adopter une vigilance *a minima* en zone de sismicité modérée à forte, où les études de stabilité réalisées doivent tenir compte de ce facteur séisme. Ce point est d'autant plus prégnant si le remblayage est partiel et conduit à une situation de verse.

Enfin, bien que le cas puisse être rare, il n'est pas exclu la présence d'éventuelles cavités souterraines, naturelles ou anthropiques, sous la zone à remblayer. 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, ...).

Le vieillissement naturel des cavités souterraines entraîne une perte de résistance du vide souterrain, ce qui peut occasionner en surface un affaissement voire un effondrement. De plus, la charge supplémentaire générée par les remblais peut accélérer la perte de résistance de ces cavités. Le calcul du poids des remblais ainsi que celui de la résistance des cavités permettront d'estimer si la charge supplémentaire apportée par le remblai ne va pas déstabiliser le socle.

6 Critères liés au remblai

6.1 Les caractéristiques du remblai

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.

Le volume global des déchets inertes est imposé par l'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.

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 (Bescond et al. [2]). A titre d'exemple, certaines marnes, fortement consolidées en profondeur, perdent leur résistance une fois extraites et remaniées.

Pour s'accommoder de l'hétérogénéité des matériaux, il faut optimiser et maîtriser leur emploi par une affectation choisie par zone dans le remblai (Bescond et al., [2]) : ce « zonage » consiste à affecter les matériaux disponibles dans les différentes parties du remblai (le talus, le noyau, la base et la PST ou « partie supérieure des terrassements », voir Figure 7). Ainsi, chaque zone a les caractéristiques nécessaires pour s'adapter aux différentes sollicitations qu'elle reçoit. Le Tableau 2 en donne quelques exemples.

⁵ Afin de prendre en compte ces effets de site lithologiques, la norme NF EN 1998-1 de septembre 2005 distingue sept classes de sol différentes (A, B, C, D, E, S1 et S2) dépendant du profil stratigraphique et de paramètres géotechniques (BRGM, [3]). Cette classification permet de définir l'effet sismique local en prenant en compte le zonage sismique et la nature des sols

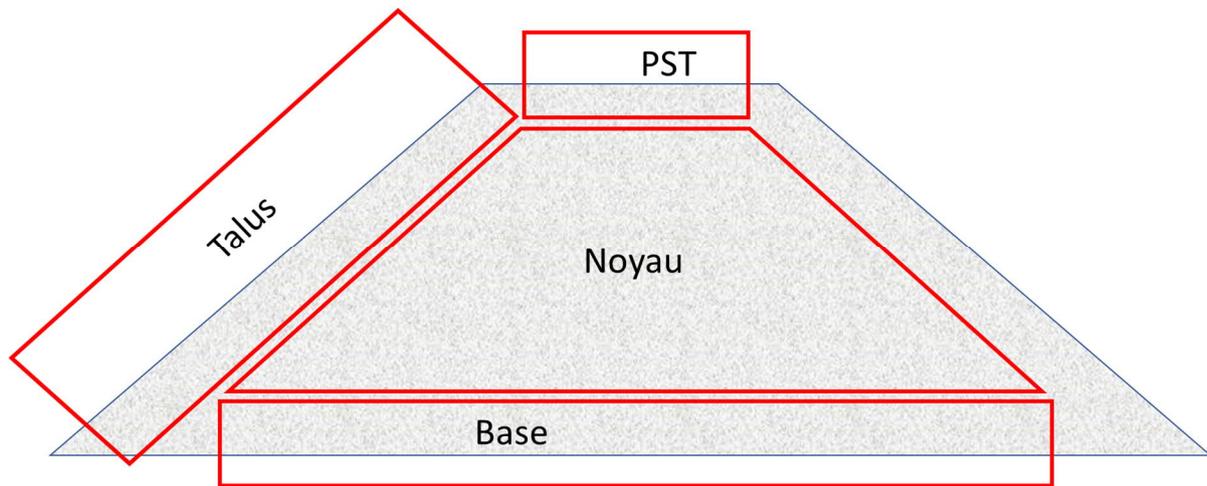


Figure 7 : Les différents éléments constitutifs d'un remblai (vue en coupe)

Tableau 2 : Type de déchets inertes selon l'utilisation la plus favorable

Type de déchets inertes	Utilisation à privilégier	Utilisation à éviter
Granulométrie étalée (silts à blocs)	Noyau, PST si on ne veut pas lui conférer de l'imperméabilité, talus si pente adaptée	Rôle de drainage (base, PST)
Blocs, graviers	Zone de drainage Base du remblai	
Matériaux fins (silts, sables)	Couverture de remblai en talus (si faible pente) ou PST	Base de remblai
Matériaux à dominante argileuse	Couverture de remblai en talus (si faible pente) ou PST Zone spécifique à imperméabiliser pour éviter l'infiltration	Talus si forte pente Noyau de remblai
Matériaux gypseux	Comblement de carrière de gypse	Noyau si forte quantité, talus. Carrière en eau

Ainsi, lorsque des déchets inertes arrivent sur un site, 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 [20], 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, et adapté (Figure 8) : 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 C).

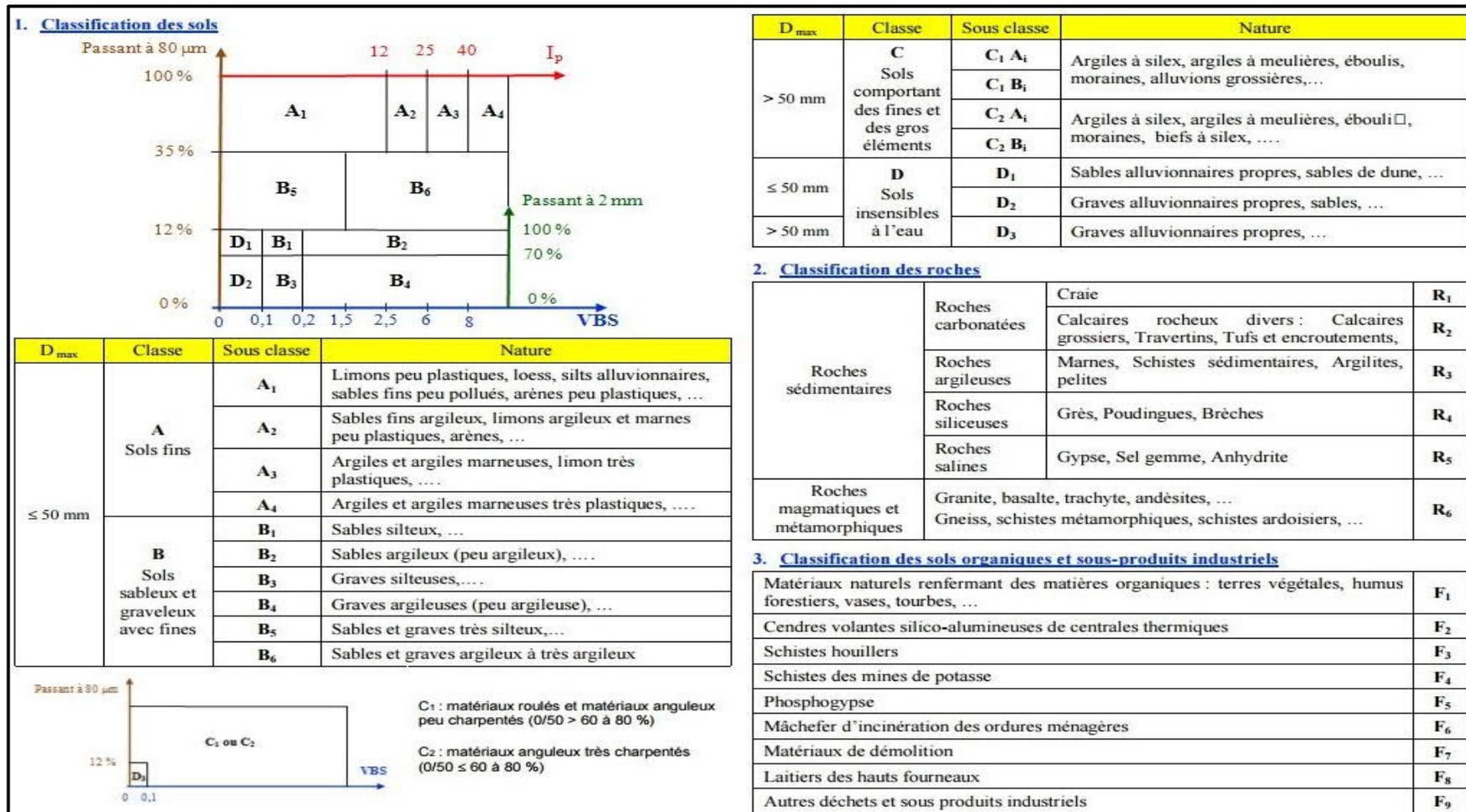


Figure 8 : Tableau synoptique de la classification des matériaux selon leur nature d'après le GTR⁶ (Source : <https://docplayer.fr/16720117-Arvor-geotechnique-ingenierie-des-sols-et-des-fondations.html>)

⁶ 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, **IP** : Indice de plasticité du sol, parfois utilisé à la place du VBS

Bien entendu, les objectifs de performance, en termes de résistance et de tassement acceptable finaux, sont pour un remblai en carrière 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 sont similaires.

Si l'on se rapporte à cette classification (consultable à l'annexe C), 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 C), 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 remblayé (voir chapitre 0). 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. Le géotechnicien peut alors opter pour des pentes classiques (voir partie 6.2). Il peut se référer aux tableaux de classification du GTR, même s'il ne dispose pas de l'ensemble des critères de classification, en proposant de disposer généralement les déchets inertes selon les grands principes exposés au Tableau 2 ;
- une étude spécifique détaillée si le comportement du matériau est incertain par rapport aux contraintes subies pour la hauteur projetée, ou si le site d'accueil présente des indices d'instabilité. La caractérisation du matériau est donc nécessaire (essais géomécaniques). Le Tableau 3 résume les essais géotechniques les plus courants pour caractériser les sols.

Tableau 3 : 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
Essai d'identification	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)
Essai œdométrique	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)
Essai de cisaillement	Mesurer les caractéristiques de rupture d'un échantillon soumis à un cisaillement	Angle de frottement effectif Cohésion effective
Essai triaxial	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
Essai d'évaluation d'un sol au traitement	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

Pour les sites en eau, une vigilance particulière est à adopter lorsque le matériau de remblai est à dominante argileuse (catégories A à C avec une forte fraction argileuse). On peut alors s'appuyer sur les considérations et recommandations émises par le BRGM (Callier, Charbonnier, [4]) et synthétisées ci-après.

Lorsque les sites en eau sont implantés dans une formation non argileuse, pour s'affranchir du risque d'obstacle à l'écoulement souterrain de la nappe, de remontée du niveau piézométrique, voire d'altération de la qualité de l'eau (présence d'un champ captant alimenté de préférence par la rivière plutôt que par la nappe alluviale du fait de la présence des argiles), il est recommandé de mettre en place les matériaux de granulométrie les plus grossières dans la partie inférieure des sites à remblayer. Les matériaux argileux sont à réserver de préférence pour remblayer la partie supérieure, sur une épaisseur d'un mètre.

6.2 La morphologie finale du remblai

La morphologie finale du remblai est étroitement liée aux caractéristiques du site à remblayer et au projet d'aménagement final (voir partie 0).

Dans le cadre de remblayage de fosse, la morphologie finale du remblai est généralement sub-horizontale. Le principal désordre qui peut alors se produire est le phénomène de tassement, qui sera limité par une gestion convenable des eaux, la mise en œuvre de techniques de remblayage adaptées et le choix de matériaux aux bonnes caractéristiques. Les tassements prévisibles calculés doivent être pris en compte dans l'épaisseur totale du remblai à mettre en place pour obtenir à terme la cote prévue au projet.

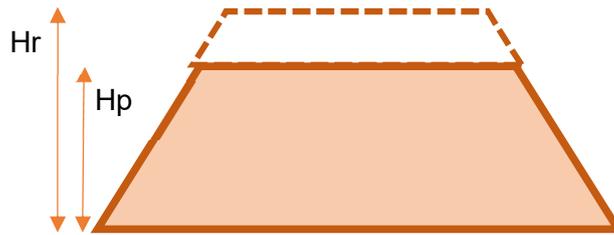


Figure 9 : Visualisation de la hauteur à donner au remblai (H_R) pour atteindre la cote du projet (H_p) en prenant en compte le tassement (d'après ENPC, [11])

Dans le cadre de remblayage partiel ou de remblayage de flanc de carrière non circulaire, une verse est généralement réalisée. Sa pente peut être sujette à des glissements superficiels ou profonds : l'évaluation de la stabilité à long terme de la pente est donc primordiale. Des études géotechniques mentionnent principalement deux paramètres à prendre en compte pour calculer une pente de remblai : la nature du remblai et la hauteur du remblai.

Les travaux de master de Mokhtar Ahdouga [17] proposent un ordre de grandeur de la pente en fonction de la hauteur du remblai et de la nature du matériau. Une adaptation et un élargissement (évaluation des catégories GTR) en sont proposés au Tableau 4. Il est considéré qu'au-delà de 15 mètres et pour n'importe quel matériau (sauf pour les matériaux issus de roche dure non altérée), une étude de stabilité doit être réalisée obligatoirement.

Tableau 4 : Valeurs indicatives de pentes de remblai en fonction de sa nature et de sa hauteur (adapté et complété d'après Mokhtar Ahdouga, [17])

Nature du matériau	Classe GTR de rapprochement (à titre purement indicatif), Annexe C	Hauteur du remblai		
		$h \leq 5 \text{ m}$	$5 \leq h \leq 15 \text{ m}$	$h \geq 15 \text{ m}$
Sols et matériaux cohérents sensibles à l'eau ⁷ ou matériaux rocheux issus de roche altérée ou argileuse mais fragmentable	Catégories A, B (hormis B1), C selon nature des matériaux < 50 mm, roches R non évolutives ⁸ fragmentables	Pente $\leq 34^\circ$ ou 3/2 ⁹	Pente $\leq 27^\circ$ ou 2/1	Pas de règle générale : la pente doit résulter d'une étude de stabilité
Matériaux granulaires insensibles à l'eau d'origine alluvionnaire ou matériaux rocheux issus de roche tendre non argileuse	Catégories B1, certains C selon nature des matériaux < 50 mm, D	Pente $\leq 45^\circ$ ou 1/1	Pente $\leq 34^\circ$ ou 3/2	Pas de règle générale : la pente doit résulter d'une étude de stabilité
Matériaux issus de roches dures non altérées/altérables	Roches R non évolutives peu fragmentables	Pente $\leq 45^\circ$ ou 1/1	Pente $\leq 45^\circ$ ou 1/1	Pente $\leq 34^\circ$ ou 3/2 avec risbermes

⁷ Tout sol comportant des matériaux fins (argiles, silts, sables fins) est potentiellement sensible à l'eau, en cela que les particules fines peuvent être remobilisées et migrer, ou évoluer intrinsèquement (gonflement, cisaillement des argiles, ...).

⁸ Les roches évolutives (R1 craie, certaines roches argileuses R3, roches salines R5) doivent être l'objet d'analyses spécifiques.

⁹ 3 longueurs horizontales pour 2 longueurs identiques verticales. Cette même règle s'applique pour les autres fractions exposées dans ce tableau.

La stabilité d'un talus est évaluée à partir de l'expression d'un coefficient de sécurité, défini par le rapport des moments et forces résistant au mouvement (généralement un glissement) et ceux y concourant. La valeur de 1 de ce coefficient traduit un équilibre limite. En phase d'exploitation de la zone de remblai, on admet un coefficient minimum de 1,2. En revanche, à long terme, les terrains étant restitués pour un autre usage, le coefficient de sécurité doit être au minimum de 1,5. Ce coefficient de sécurité est calculé en tenant compte des caractéristiques géotechniques du remblai (très généralement le poids volumique, l'angle de frottement, la cohésion du (des) matériau(x), sa géométrie et sa lithologie).

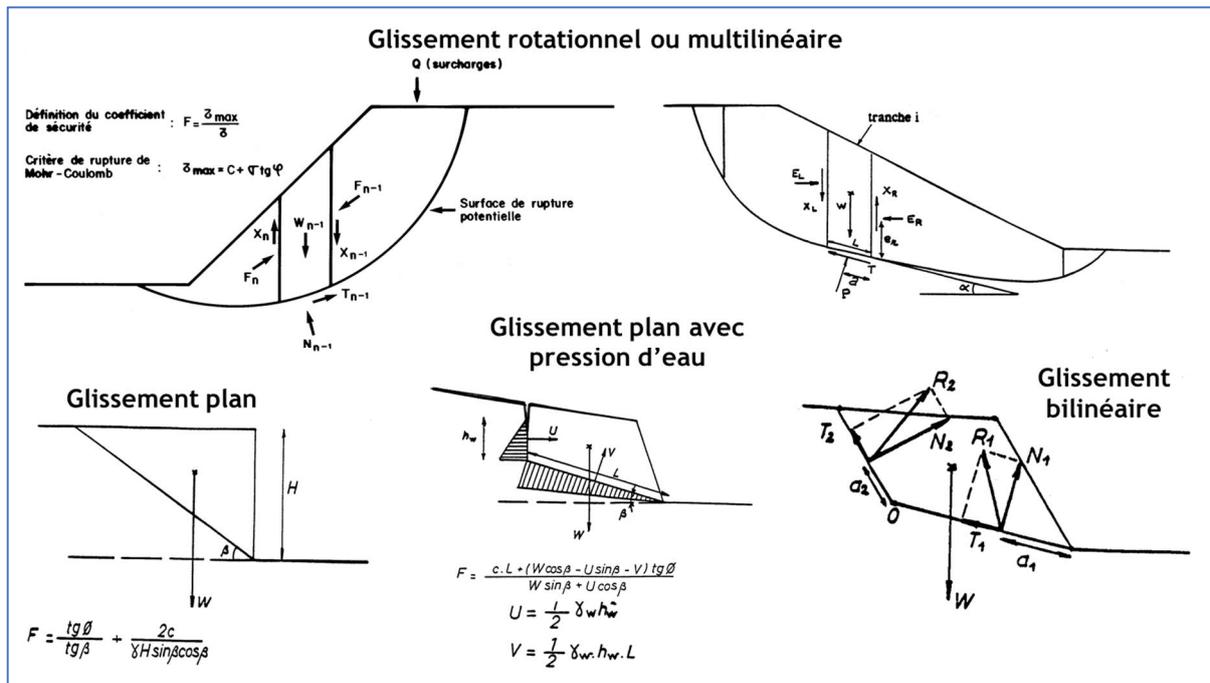


Figure 10 : Exemples classiques de glissements et expressions des forces motrices et résistantes qui interagissent

De nombreux logiciels classiques de mécanique de sols existent pour déterminer le coefficient de sécurité d'une pente. Même si certaines données de caractérisation des déchets inertes sont inconnues, il sera nécessaire de justifier toute(s) hypothèse(s) prise(s) pour obtenir ce coefficient de sécurité.

L'ajout de risbermes est aussi une bonne solution pour les remblais de grande hauteur (supérieure à 15 mètres). En effet, les risbermes améliorent la stabilité globale (elles diminuent la pente intégratrice) et évitent les fractures de décompression. Elles diminuent également la longueur de ruissellement de l'eau le long du talus et permettent donc de diminuer l'érosion et les ravinements, particulièrement dans le cas de matériaux sableux. Enfin, la présence de risbermes permet un accès privilégié au talus, facilitant son entretien, ainsi que celui des éventuels ouvrages de suivi (inclinomètres ou piézomètres, par exemple). Cette solution nécessite cependant d'avoir un recul nécessaire et de ne pas être dans un site trop enclavé.



Photographie 1 : Deux risbermes dans un talus (Ineris)

Dans le cas de carrière en eau de type gravière, le point sensible du point de vue de la stabilité reste le modelé des berges. Sur certains sites, les pentes d'exploitation peuvent être relativement fortes (45°) et il est nécessaire de remblayer rapidement après l'extraction afin d'obtenir des pentes d'équilibre dites de sécurité (25 à 30°) et de garantir une réelle tenue des berges. Les berges définitives sont ensuite talutées et réaménagées avec les terres de découverte. Elles sont sécurisées en respectant une pente inférieure ou égale à $3/1$ ($18,5^\circ$) à partir du terrain naturel jusqu'à un mètre en dessous du niveau d'eau moyen (Sciences Environnement, [21] et [22]). Sur d'autres sites, pour assurer la stabilité sous eau, il est préconisé de maintenir des pentes avec un angle voisin de 25° . D'autres sources bibliographiques indiquent que la plupart des talus immergés sont stables pour une pente allant de 22° à 26° en fonction de la granulométrie des matériaux, avec un coefficient de sécurité de 1,5 garantissant une bonne tenue à long terme. D'une manière générale, pour garantir la stabilité à long terme des berges, une pente autour de 20° est demandée (notamment pour les berges qui peuvent être soumises à la saturation et désaturation de l'eau en période de crue), avec un maximum de 25° . Par la suite, une opération de revégétalisation des berges est indispensable pour maintenir les terrains en place.

6.3 La gestion de l'eau au niveau du remblai

6.3.1 Les circulations d'eau dans le remblai

Les circulations d'eau à l'intérieur d'un remblai doivent être prévues et maîtrisées, surtout dans le cas des « grands remblais » qui mesurent une quinzaine de mètres de hauteur ou plus (Bescond et al., [2]). L'objectif est d'éviter qu'il existe des zones de remblai où le sol puisse se saturer. Outre l'impact de l'eau sur la stabilité mécanique des remblais (diminution de cohésion, tassement), la percolation des eaux météoriques ou superficielles au travers des remblais peut induire la lixiviation des matières solubles qu'ils peuvent renfermer (craie, calcaire, gypse, sulfures métalliques...). Ce risque existe également lorsqu'une nappe phréatique vient baigner, même temporairement, la base des remblais.

D'autre part, un remblai en matériaux hétérogènes peut comporter des niveaux ou des lentilles plus perméables que les terrains qui les entourent, en raison de leur granulométrie plus grossière et de leur teneur moindre en argiles [2]. Ces niveaux ou poches plus perméables sont susceptibles de constituer un drain à la fois pour le remblai et pour son encaissant : ils vont donc avoir tendance à se saturer puis à se désaturer progressivement en eau vers les terrains encaissants lorsque ceux-ci vont s'assécher. Les niveaux ou poches ainsi constitués étant souvent distribués de façon anarchique, il est impossible d'aller les drainer rationnellement après la fin du remblayage, par exemple à l'aide de drains subhorizontaux. De ce fait, la conception du corps de remblai, et en particulier son zonage, doit prévoir une émergence latérale des matériaux plus perméables ainsi que des interfaces entre les matériaux plus ou moins perméables afin d'éviter toute accumulation d'eau. Le débouché en talus de telles

émergences latérales d'eau peut être maîtrisé en adoucissant la pente ou en mettant en œuvre des dispositifs drainants tels que des éperons ou masques (Figure 11, Tableau 11).

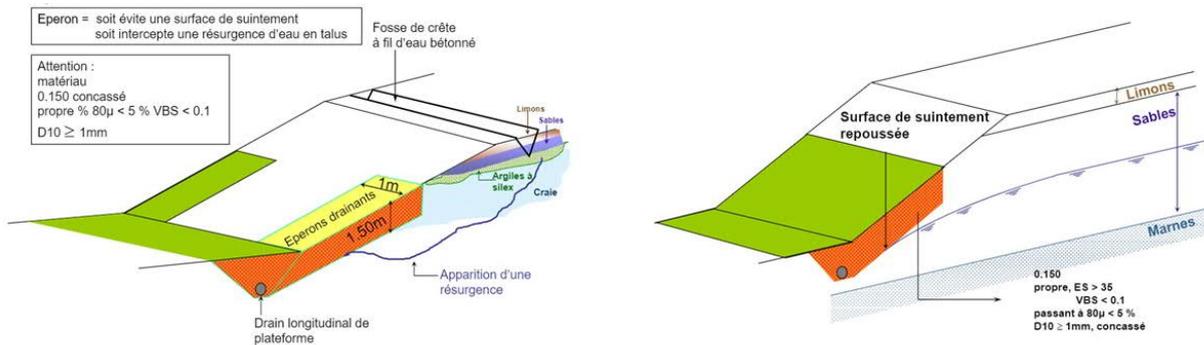


Figure 11 : Eperon (à gauche) et masque (à droite) pour le drainage des pentes (Faure et Gress, [12])

Les remblais renfermant des matériaux argileux dans le cas des carrières en eau situées en tout ou partie au sein de la nappe phréatique peuvent former une masse étanche susceptible de faire écran aux circulations d'eau souterraine - ce qui est contraire aux prescriptions de l'article 12.3 de l'arrêté ministériel du 22 septembre 1994 - et/ou de créer une nappe perchée au sein de la carrière (Callier et Charbonnier, [4]). Ils peuvent également se saturer en eau en période de remontée de la nappe, même si celle-ci n'atteint pas directement les remblais (phénomène de capillarité), et perdre ainsi une partie de leurs propriétés mécaniques [2]. Dans le cas des carrières en eau, le remblayage par des matériaux imperméables peut induire un colmatage de l'aquifère avec, comme conséquence, une modification de l'écoulement des eaux souterraines pouvant aller jusqu'à l'inondation des terrains en amont hydraulique de la carrière. Dans de tels contextes, il serait préférable de mettre en place des matériaux plus grossiers en partie inférieure de la carrière à remblayer, et de réserver les matériaux argileux pour la partie supérieure. Cela permettrait également de créer un écran étanche aux eaux météoriques et au ruissellement de surface.

6.3.2 Préconisations pour la gestion des eaux

La gestion de l'eau est primordiale pour la stabilité du remblayage, tant pour éviter une infiltration massive des eaux dans le remblayage que pour favoriser leur dissipation et leur évacuation. Ceci est d'autant valable pour les eaux superficielles et météoriques que pour les eaux souterraines, qu'il s'agisse de carrières en eau en permanence ou temporairement (remontée de nappe).

Pour éviter des percolations d'eau météorique ou d'eau superficielle, la mise en place d'une couche imperméable ou peu perméable en partie supérieure du remblai est préconisée [4]. Cette solution devra toutefois être étudiée pour éviter un afflux d'eau trop important vers le milieu naturel adjacent, comme par exemple mettre en place cette couche imperméable sous le sol superficiel, à la manière d'un « écran étanche » de génie civil, ce qui permet de stocker temporairement l'eau de pluie et d'éviter qu'elle ne ruisselle trop rapidement.

Une autre solution pour se prémunir des eaux superficielles émanant de l'amont hydraulique de la carrière remblayée est de les détourner afin qu'elles ne puissent pas y pénétrer. Cela peut se faire au moyen d'un fossé étanche ou d'une petite digue ceinturant le site du côté de l'amont ou, si le terrain est plat, tout autour du site. Il faudra également veiller à ne pas créer de dépression lors du remodelage final des terrains, afin d'éviter la concentration d'eau et sa percolation préférentielle au sein du remblai. Une légère contrepente de la partie subhorizontale du remblai permettra aux eaux de ruissellement d'être dirigées vers le fossé. Si la création d'un plan d'eau peu profond (mare) est une finalité de réaménagement, il devra alors reposer sur un écran imperméable (argile) ou sur un géotextile étanche.

Lorsqu'on est en présence d'une carrière de roche karstique (calcaire, craie...) ou très fracturée, les ouvertures karstiques ou les grosses fractures ouvertes visibles en fond de fosse pourront être colmatées préalablement au remblayage, par exemple par dallage [4]. Ceci permettra d'éviter que les éléments les plus petits du remblai ne soient rapidement emportés dans l'aquifère sous-jacent par

phénomène de suffosion. Si un tel phénomène se déclenche, il peut être à l'origine de matières en suspension dans l'aquifère (turbidité¹⁰) et/ou d'une instabilité du remblai liée à la perte de matière.

Il faudra également prévoir de réaliser une reconnaissance pour localiser d'éventuelles arrivées d'eau latérales, notamment en contexte karstique ou fissuré, ou des suintements d'eau au niveau de la zone de transition entre l'encaissant et le remblai. Cela permettra de prévoir la mise en œuvre de coupure drainante dans cette zone, par exemple au moyen d'éperons drainants [2].

S'il y a mise en place d'un réseau de drainage, son entretien doit être pris en compte dès la phase de conception. Cela nécessite de favoriser les dispositifs demandant peu d'entretien (pentes assez fortes¹¹, dimensionnement assez large des évacuations, qualité des exutoires, etc.) et faciliter l'inspection de ces ouvrages (privilégier les ouvrages non enterrés, assurer l'accessibilité aux regards et aux exutoires, optimiser l'espacement des regards, etc.).

Enfin, dans le contexte des carrières en eau, il est également nécessaire de mettre en place un réseau piézométrique en aval immédiat du site, notamment si l'on se trouve dans l'aire d'alimentation d'un captage d'eau potable [4] et, *a fortiori*, dans son périmètre de protection rapprochée (dans ce cas, l'avis d'un hydrogéologue agréé sera probablement nécessaire pour dimensionner ce réseau en fonction de l'importance du captage et de la vulnérabilité de la nappe). L'objectif d'un tel réseau est double : d'une part, détecter un éventuel panache de pollution et, d'autre part, vérifier qu'on n'a pas modifié les conditions d'écoulement de la nappe.

La Figure 12 synthétise les moyens de prévention ou de mitigation pouvant être mis en œuvre pour les carrières hors d'eau.

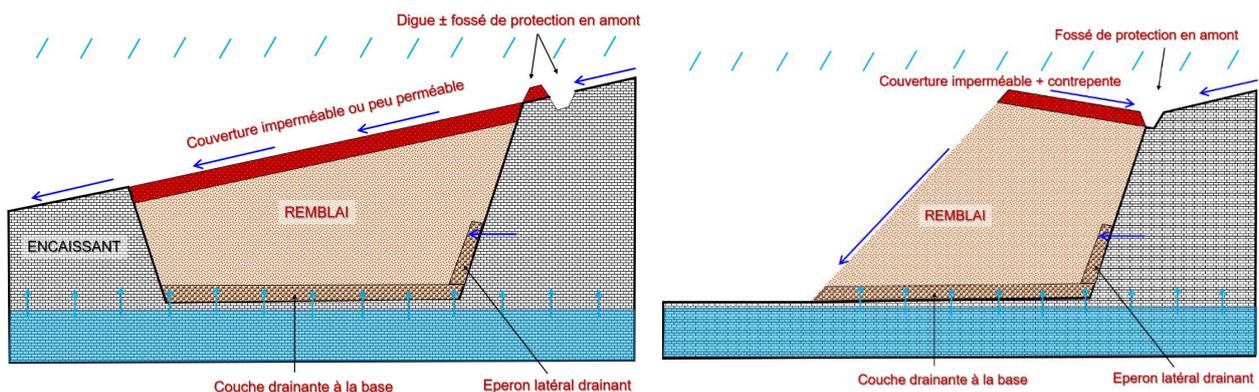


Figure 12 : Exemples de traitement ou de mitigation (à gauche : cas d'une fosse et à droite cas d'un flanc de carrière)

6.4 Les techniques de remblayage

Généralement, le remblayage est réalisé selon différentes opérations, à savoir :

- les opérations de gerbage : les déchets inertes sont poussés dans la fosse par le chargeur ;
- les opérations de compactage : le chargeur fait régulièrement des passages sur les déchets inertes pour les tasser ;
- la mise en place des terrains de couverture : lorsque le remblai arrive à la cote topographique finale autorisée, les terrains de couverture découpés préalablement et stockés en carrière sont mis en place et régalez¹².

Les opérations de remblayage sont intimement liées à la géométrie du site, à la cadence d'arrivée du matériau, à la largeur des banquettes, au phasage entre la poursuite de l'extraction (voir l'extension de

¹⁰ La limite de qualité d'une eau potable en matière de turbidité est fixée à 1 NFU (Nephelometric Formazine Unit) selon l'Arrêté du 11 janvier 2007 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine. Cela correspond approximativement à une charge en matières en suspension de l'ordre du mg/L

¹¹ tout en s'assurant de la stabilité du remblai.

¹² Régaler un terrain ou un remblai consiste à l'aplanir de façon à lui donner une surface régulière.

l'exploitation) et la mise en place du remblai. C'est pourquoi il est difficile de convenir dans ce chapitre d'un mode de remblayage satisfaisant à toutes les configurations géométriques et d'exploitation.

Pour des remblais de grande hauteur, le remblayage par couches successives avec compactage pour chacune des couches est préconisé, car il permet de diminuer le phénomène de tassement. Il s'agit de tasser le matériau à l'aide des moyens mécaniques disponibles pour réduire les vides et augmenter la cohésion. Idéalement chaque couche ne doit pas dépasser le mètre, pour que le compactage par les engins de carrière puisse être opérant, au-delà il n'y a pas de garantie que la partie basale de la couche soit compactée.

Dans les chantiers de terrassements routiers le compactage est réalisé soit au moyen de compacteurs statiques (à pneus ou à pieds dameurs) qui agissent uniquement par leur poids, soit de compacteurs vibrants (à bille lisse ou à pieds dameurs) qui agissent par leur poids et leur vibration. Dans le cas des carrières, les compacteurs n'appartenant pas au parc classique des véhicules des exploitants, ce compactage peut se faire par les engins classiques (pelles, chargeurs, bouteurs, bulldozers, camions, ...).

En bordure de carrière, la technique de déversement depuis la partie sommitale des gradins n'est pas à privilégier, voire à proscrire si la carrière constitue un flanc rocheux et n'est pas une fosse, ou encore si cette dernière ne doit pas être totalement remblayée. En effet, seule la partie tabulaire en tête sera compactée par les engins d'amenée, mais les matériaux dans la pente ne seront pas consolidés.

Il est alors préférable de réaliser des opérations de gerbage depuis une risberme intermédiaire et ainsi pouvoir compacter à l'avancement (Figure 13).

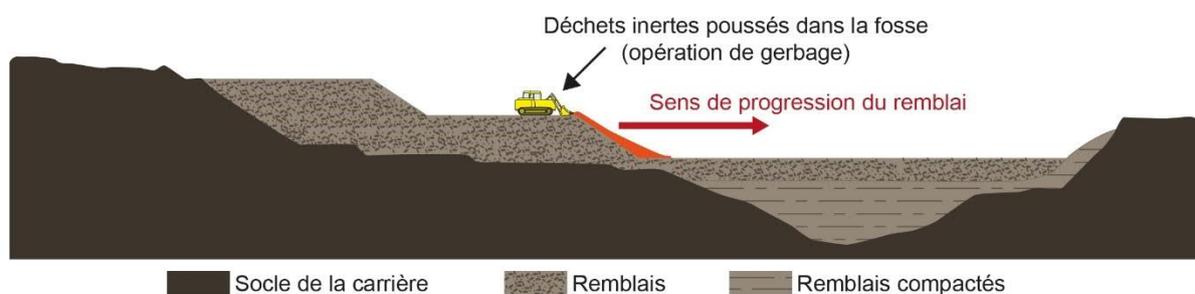


Figure 13 : Opérations de gerbage et compactage des remblais

Une autre technique, préférable encore, est l'amenée, le terrassement et l'élévation de matériau directement sur les banquettes intermédiaires.

Pour les sites en eau, en considérant les contraintes d'utilisation des matériaux exposées à la fin du chapitre 6.1, Callier et Charbonnier [4] préconisent le remblaiement, d'une part, par « casier » ou secteur successif, afin de repérer et consigner aisément les zones où des matériaux de nature différente ont été apposés, et, d'autre part, d'aval en amont hydraulique, afin de vérifier, par des contrôles de niveau piézométrique, qu'il n'y a pas de colmatage généré sur le site en cours de remblaiement, et que le débit de pompage des éventuels forages voisins n'est pas perturbé.

6.5 Les contrôles d'exécution et opérations de maintenance du remblayage

Les contrôles d'exécution visent à vérifier le respect de l'ensemble des critères définis lors de l'étude de conception. Ils concernent principalement la maîtrise de la nature des matériaux, leur état hydrique et les conditions de mise en œuvre (Bescond et al., [2]). Dans le domaine des terrassements routiers, différentes méthodes sont utilisées :

- le contrôle du compactage du remblayage par un essai au pénétromètre dynamique : il s'agit de mesurer l'enfoncement d'une pointe soumise à une énergie de battage ;
- la mesure de la masse volumique d'un sol par gammadensimétrie : il s'agit d'introduire dans un trou foré vertical une source radioactive et dans un autre parallèle au premier un détecteur. L'atténuation des rayons gamma par la matière est proportionnel à la masse volumique ;

- le contrôle de l'état hydrique du remblayage par mesure en laboratoire (échantillonnage et essais voir Tableau 3) ou par mesure sur terrain (sonde à neutrons ou méthodes diélectrique (TDR¹³)).

Ces méthodes visant à vérifier la qualité du compactage dans le cadre des terrassements routiers ne sont pas à appliquer de manière systématique pour des remblayages de carrière, mais certaines situations où l'on cherche à garantir la stabilité du matériau, ou encore dans le cas de géométries particulières ou de nature incertaine des remblais, peuvent nécessiter leur emploi.

Dans tous les cas, 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 (phase dite « observationnelle »). En fin de remblayage, par secteur homogène, il est recommandé de réaliser un plan de recollement et une analyse des différences par rapport à l'étude de conception initiale. Une analyse des modifications apportées et des ajustements mis en œuvre lors de la phase d'exécution est également recommandée.

Une fois le remblayage réalisé, des opérations de maintenance pourront être organisées à intervalle de temps régulier comme par exemple l'entretien des ouvrages de drainage et l'entretien de la végétation.

De plus, une surveillance du remblayage peut aussi être organisée dans les premières années, particulièrement au niveau des points jugés sensibles. Par exemple, les zones de versés définitives peuvent être sujettes à des mouvements de terrain tant que la végétation n'est pas implantée. Des zones de versés provisoires (avant remblaiement du reste de la carrière) nécessitent également une surveillance si la période entre l'édification de la verse et le reste du remblayage peut durer plusieurs années, et que des engins de chantier passent au pied de la pente.

Deux niveaux de surveillance peuvent être alors préconisés :

- une surveillance visuelle, à intervalle de temps régulier et au sortir de chaque épisode pluvieux important : l'opérateur réalise un relevé visuel des déformations et les reporte sur un plan (localisation et ampleur du désordre) ;
- dans le cas de dépôts potentiellement sensibles (proximité d'enjeux liés à l'exploitation d'autres secteurs – bureaux, bâtiments de process, pistes fréquemment empruntées) une surveillance instrumentée par relevé topographique peut s'avérer nécessaire : un relevé topographique de la zone remblayée, effectué *a minima* chaque année (la fréquence étant à déterminer selon la typologie des enjeux, le trafic et la présence humaine), permet de suivre l'évolution de la zone en comparant les relevés entre eux. Les nouveaux outils tels que la télédétection par scanner laser terrestre ou aéroporté (drone), de plus en plus employés, sont adaptés à ce type de surveillance.

Si aucune évolution n'est observée dans les premières années, la surveillance peut être espacée voire arrêtée.

¹³ Time Domain Reflectometry

7 Critères de réaménagement en fonction de la destination finale

L'Union Nationale des Producteurs de Granulats (UNPG) a mené en 2016 une enquête sur le réaménagement de carrières ayant recours au remblayage, afin d'analyser les éventuels changements d'usage des sols ainsi réaménagés (ECV, [10]). 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 14). 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.

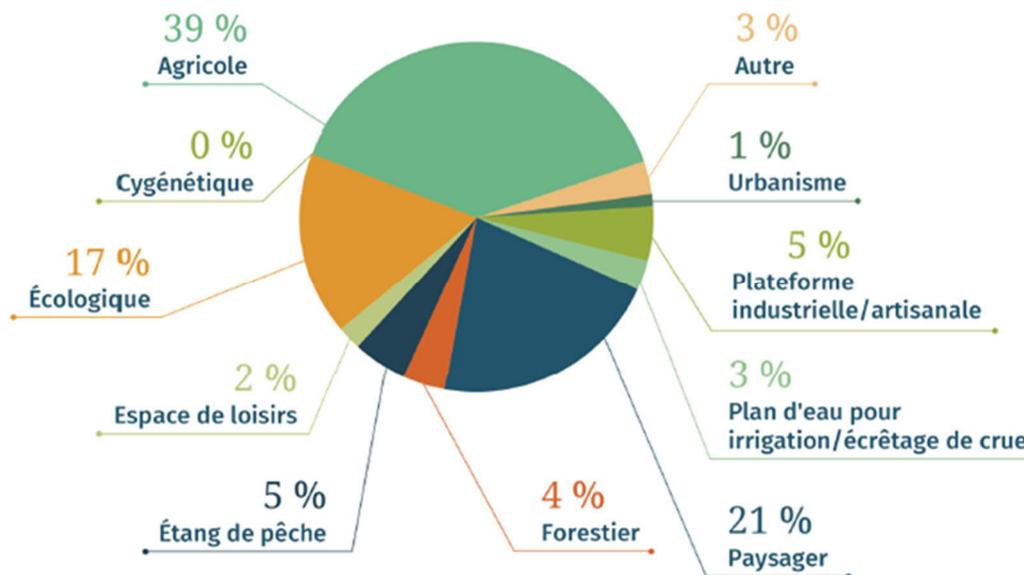


Figure 14. Finalité du remblayage des carrières (ECV, [10])

Quel que soit le type d'aménagement final, 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 faits de manière simultanée et coordonnée avec l'avancée de l'extraction.

7.1 Critères de réaménagement en fonction des caractéristiques du remblayage

La topographie finale du terrain remblayé fait partie des critères qui conditionnent l'aménagement du site. Généralement, le réaménagement doit permettre de retrouver une topographie d'origine ainsi que l'utilisation initiale des terrains (le plus souvent agricole), tout en préservant le caractère écologique. Toutefois certaines carrières de craie, calcaire ou roche massive, au regard de l'importance des volumes extraits, des durées d'autorisation, ou encore de l'antériorité historique de l'exploitation, ne retrouvent pas cette topographie initiale.

Par exemple, la Tableau 5 illustre pour le Canada, l'usage final le plus approprié des terrains remblayés en fonction de la pente (CPTAQ¹⁴, [6]). Bien souvent, différentes pentes apparaissent sur un même site, et l'aménagement peut ne pas y être uniforme. Ce tableau envisage des aménagements plutôt agricoles ou forestiers et évoque des pentes maximales et non pas des pentes optimales. Ces dernières dépendent davantage de critères comme le type de sol, les circulations d'eau, etc. D'une manière

¹⁴ Commission de Protection du Territoire Agricole du Québec.

générale, l'établissement de la pente à aménager doit faire l'objet d'une recommandation agronomique, car il est nécessaire de prendre en compte le type de couvert à implanter et la sensibilité générale des sols à l'érosion en fonction de la nature des matériaux en place (CPTAQ, [6]).

Tableau 5 : Réaménagement en fonction de la pente maximale des remblais (Source : d'après CPTAQ, 2016, [6])

Type d'usage	Pente maximale
Prairies permanentes et pâturages	11°
Cultures annuelles	6°
Reboisement	11°
Terrain forestier naturel	27°

Ces mêmes auteurs précisent que la qualité des matériaux de remblai est un autre critère important, en particulier lorsque l'aménagement final consiste en la mise en place d'une parcelle agricole. Dans un objectif de rendement, il s'agit de déterminer la qualité agricole des matériaux apportés et leur répartition spatiale sur le site. Pour ce faire, des analyses granulométriques et chimiques des matériaux rapportés pourront être réalisées, ainsi qu'une description de la stratification verticale et de l'homogénéité spatiale des matériaux, le pourcentage de pierres et de fragments grossiers (CPTAQ, [6]). D'une manière générale, le dépôt des matériaux grossiers est favorisé dans le fond du site alors que les matériaux de grande qualité agricole seront conservés et utilisés en surface.

La remise en place des terrains de découverte, au-dessus des terrains inertes, est aussi une étape importante, planifiée au moment du décapage de la fosse. Durant les opérations de décapage, il ne faut pas mélanger les différentes couches de terrain enlevées. Il sera nécessaire de les stocker de manière séparée pour pouvoir les remettre en place lors de la remise en état du site. Avant de les remettre en place, il faudra préparer la surface support en étant vigilant sur deux aspects (Lansiart et Odent, [15]) :

- le nivellement de la surface remblayée qui doit être correctement réalisé pour éviter la création de cuvettes propices à l'accumulation d'eau ou d'obstacles pénalisants les travaux agricoles par la suite ;
- la perméabilité de la surface support : les eaux contenues dans les couches superficielles doivent pouvoir s'évacuer dans le sous-sol. Si la surface remblayée a été compactée par le passage d'engins de chantier, une opération de sous-solage ou de scarification sera réalisée (Figure 15). En revanche, si le matériau de remblai est imperméable, il faudra mettre en place un réseau de drainage et de collecte des eaux pour les évacuer.

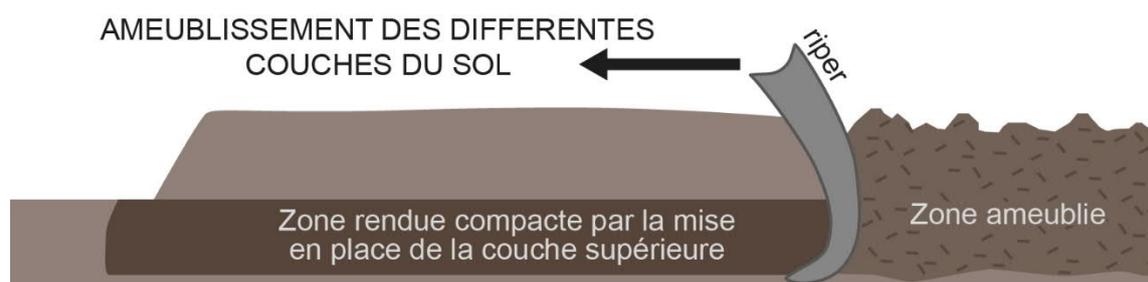


Figure 15 : Opération de sous-solage ou ameublissement décimétrique des terrains par un soc tiré par un bulldozer (d'après Lansiart et Odent, [15])

Une couche de terre arable peut ensuite être ajoutée. La terre arable doit avoir une teneur en eau faible lors de sa mise en place (de préférence en dehors des temps pluvieux) et elle ne doit pas être compactée, par exemple par des engins de chantiers. Dans le cas où le compactage serait inévitable, une opération d'hersage sera nécessaire.

Une fois le modelage final réalisé, l'opérateur choisit si les terrains seront revégétalisés, reboisés ou destinés à devenir une parcelle agricole.

La revégétalisation et le reboisement participent au maintien des terrains en place à long terme. Ils seront réalisés au fur et à mesure de l'avancée de l'extraction, pour éviter les ravinelements et obtenir rapidement un espace végétalisé à la fin du réaménagement. Leur succès d'implantation et leur rôle de maintien des terrains dépend de la qualité des terrains disponibles et du type de végétation choisie. L'épaisseur de la couche arable varie selon les essences choisies (Lansiart et Odent, [15], Figure 16) : une épaisseur minimale de 20 cm pour un ensemencement, de 50 cm pour la plantation d'arbustes et de 80 cm à 2 mètres pour la plantation d'arbres (développement des racines). Il est à noter que pour un reboisement dans un objectif de développement sylvicole (UNPG, [27]), il convient que l'humidité du sol, à faible profondeur, soit assez importante : par exemple, une nappe phréatique proche du terrain remblayé sans être affleurante. En revanche, pour un reboisement, avec un objectif de réhabilitation ou de remise en état paysagère, on veillera à (UNPG, [27]) :

- l'emploi de jeunes plants de 2 à 3 ans plutôt que des semis (rapidité de pousse, résilience plus importante face aux rongeurs) ;
- choisir des espèces en tenant compte du type de sol, de l'humidité : privilégier les essences locales et l'hétérogénéité dans les essences ;
- maintenir une période de surveillance et d'entretien (jusqu'à 10 ans) : l'idéal est de commencer pendant l'exploitation ce qui permet de se rendre compte des essences qui prospèrent et de celles qui ne s'adaptent pas.

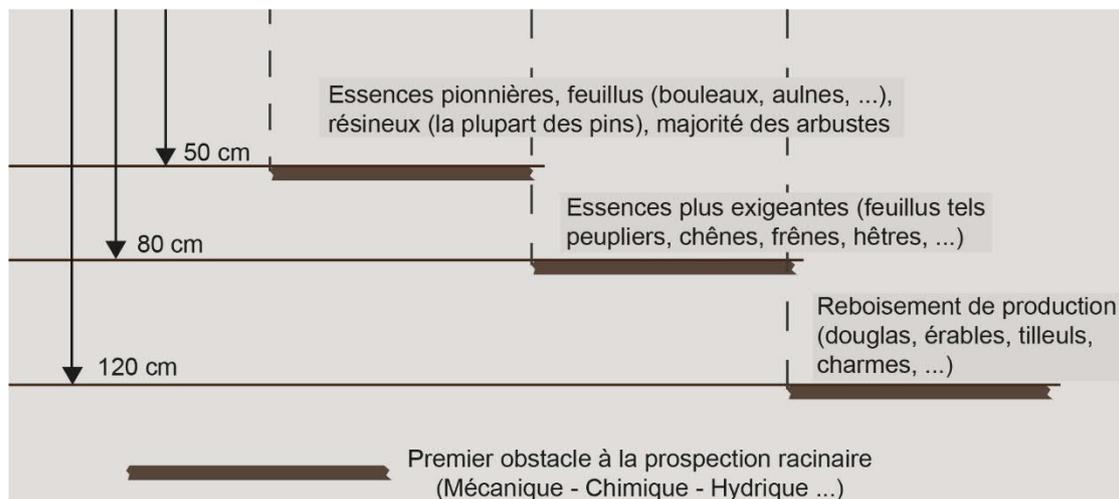


Figure 16 : Epaisseur minimale de terre végétale à mettre en place pour permettre une implantation satisfaisante (d'après Lansiart et Odent, [15])

Pour une parcelle agricole, l'épaisseur de la couche arable dépend des cultures mises en place mais dans tous les cas, elle ne doit pas être inférieure à 50 cm. La superficie doit aussi être suffisante pour garantir une unité de culture avec des caractéristiques agricoles homogènes. Il faudra aussi prévoir de bien dimensionner le réseau de drainage pour l'évacuation des eaux. En effet, l'arrosage des cultures peut créer un surplus d'eau non prévu dans l'aménagement initial.

7.2 Critères de réaménagement en fonction des caractéristiques du site initial

Lorsqu'on s'intéresse aux caractéristiques du site initial pour choisir un réaménagement possible, le principal critère qui entre en jeu est la présence ou non d'eau.

Les carrières en eau sont des carrières facilement réaménageables car il s'agit de matériaux meubles, faciles à taluter et avec des fronts de taille peu élevés. Cependant, la faible épaisseur du matériau à extraire fait que l'exploitation s'étend sur des surfaces importantes et demande un réaménagement étendu.

Les différents aménagements envisagés sont les suivants (Berard, [1]) :

- réserves en eau potable ou irrigation : il s'agit de niveler les abords et le fond du bassin, de purger les zones envasées, de reprofiler et stabiliser les berges puis de clôturer le site. Il est important de ne pas modifier les tracés des cours d'eau et d'anticiper les seuils de crue.

- bases de loisir : il s'agit d'aménager une zone de promenade avec un plan d'eau qui sera utilisé en baignade, pour la pêche, le canotage ou les activités nautiques. Une profondeur suffisante du plan d'eau sera recherchée et les berges seront reprofilées pour avoir des pentes douces (voir partie 6.2 pour la stabilité des berges) ;
- réaménagement écologique : l'objectif est la protection de la faune et la flore, avec par conséquent un accès restreint pour le public. Les formes linéaires pour les plans d'eau sont évitées et les formes sinueuses privilégiées, nécessitant dans certains cas de créer des îlots et davantage de berges. La pente est adoucie et doit se prolonger progressivement sous l'eau pour favoriser l'installation d'espèces floristiques et limiter la mobilisation des sols.

Concernant les carrières à sec, le réaménagement inclut de manière obligatoire la mise en sécurité des fronts d'exploitation, réalisée soit par une revégétalisation des banquettes, soit par un écrêtage des fronts ou soit par la mise en place de remblai qui va permettre en même temps de stabiliser les fronts et de s'approcher du profil topographique d'origine. Une fois le remblayage effectué, l'aménagement choisi peut être :

- des terres agricoles avec les étapes décrites précédemment (voir partie 7.1) ;
- une base de loisir ;
- un espace écologique.

Pour les deux derniers aménagements, un plan d'eau est parfois aménagé au niveau du point bas de l'exploitation (présence d'eau provenant de la nappe phréatique et/ou des écoulements en provenance des fronts).

Le Tableau 6 résume les principales possibilités d'aménagement des carrières après extraction des matériaux en tenant compte de l'environnement et du type de carrière.

Tableau 6 : Principales possibilités d'aménagement des carrières après extraction des matériaux en tenant compte du type de carrière et de son environnement (d'après Berard, [1])

CARRIERE EN EAU		
Type et caractéristique	Critère d'environnement	Possibilités d'aménagement
Faible profondeur d'eau	Rural	Réserve ornithologique Réserves d'eau Mise hors d'eau et réutilisation agricole ou sylviculture
	Péri-urbain et urbain	Coupure dans l'urbanisation Remblayage partiel ou total pour utilisation : - zones vertes et de loisirs - zones constructibles
Profondeur d'eau moyenne ou forte	Rural	Pêche de loisir - Pisciculture - Baignade - barque et canotage - Port de plaisance - Bassin d'infiltration - Bassin de stockage d'eau
	Péri-urbain et urbain	Plan d'eau (lotissement au bord de l'eau) - Port industriel - Port de plaisance - Bases de loisirs polyvalentes

CARRIERE A SEC			
Type et caractéristique		Critère d'environnement	Possibilités d'aménagement
En fosse		Rural	Reconstitution du terrain - Reverdissement Agricole - Reboisement - Réserve naturelle
		Péri-urbain et urbain	Remblayage - Décharge contrôlée - Coupures vertes - Parc - Zone d'habitation - Zone industrielle - Lac artificiel
A flanc de relief	Parois meubles	Tous environnements	Mise en végétation
	Parois rocheuses	Vue éloignées Vue rapprochées	Confortement et traitement de la paroi Talus végétalisé
	Fond de carrière	Rural	Remise en végétation (prairie, agriculture, sylviculture) Réserve naturelle
		Urbain ou péri-urbain	Parc de verdure - Parc de véhicules - Zone industrielle - Zone de loisirs - Terrains de sport

Quelques exemples de réaménagement sont présentés à l'annexe D.

8 Synthèse des bonnes pratiques pour le remblayage de carrières à ciel ouvert par des déchets inertes

Les logigrammes du chapitre 8.1 présentent les différentes étapes permettant la remise en état par remblayage d'un site exploité.

Le Tableau 7 détaille, pour chaque étape, les bonnes pratiques pour s'assurer de la stabilité du remblayage à long terme. En déterminant le type de site exploité, l'utilisateur peut voir le type d'aménagement possible et les bonnes pratiques correspondantes.

Le lecteur se référera aux chapitres 5 et 6 pour plus de précision sur les points importants. Les attendus relatifs à l'étude de stabilité sont présentés au chapitre 8.2. Les recommandations d'études et de travaux en situation de post-désordre sont abordés au chapitre 8.3.

On retiendra de manière globale :

- que pour les **carrières hors eau, dont le remblayage laissera subsister une verse finale**, il conviendra de s'assurer, dès le début dudit remblayage, que **les modalités de celui-ci permettront de garantir la stabilité de la verse à long terme, en post-exploitation**. La technique de remblayage est fondamentale, elle nécessite que les **couches compactées par les engins de l'exploitation soient de faible épaisseur**, celle-ci ne dépassant pas 1 m. Il convient également de **privilégier l'acheminement du matériau depuis le fond et les banquettes intermédiaires** plutôt que de déverser (gerber) le matériau depuis le sommet ou lesdites banquettes vers les gradins inférieurs. Il conviendra de **vérifier la tenue des fronts rocheux proches et de maîtriser leurs instabilités locales** pour la sécurité des travailleurs et engins terrassant à proximité.
Le type de matériau à mettre en place et leur position au sein du remblai sont des critères importants (des éléments de choix sont en cela exposés au chapitre 6.1). Il est proposé dans ce guide de **se référer aux catégories GTR [20]** qui ont l'avantage de pouvoir se fixer une base d'identification commune et largement éprouvée.
La récupération, la canalisation et l'évacuation des eaux ruisselant ou s'infiltrant au sein de la verse, ou provenant de l'extérieur de celle-ci, **sont absolument primordiales**, l'objectif premier étant de ne pas créer une ou des zones de concentration des eaux, au sein de la verse, préjudiciables à sa stabilité.
Il a été **proposé une coupure de hauteur de 10 m** au-delà de laquelle une étude de stabilité est recommandée, selon les attendus exposés au chapitre 8.2. Il est par ailleurs **proposé que les remblais de très grande hauteur, par exemple supérieure à 30 m, puissent être l'objet d'études géotechniques de conception** permettant un dimensionnement plus précis des ouvrages de réduction des pentes et de gestion des eaux ;
- que **les principes précédents sont valables lorsque cette situation de verse perdure durant l'exploitation** (pendant une ou plusieurs années pour se fixer un ordre de grandeur) pour des raisons techniques ou économiques. Il conviendra alors de s'assurer que le risque d'instabilité n'affecte pas la sécurité des travailleurs, des engins et installations d'exploitation. Une surveillance est recommandée pour ces ouvrages temporaires mais qui s'inscrivent dans la durée, selon les principes exposés au chapitre 6.5 ;
- que pour les **carrières hors eau, avec comblement total de la fosse**, les critères de stabilité sont moins prégnants. Il conviendra toutefois de **s'assurer que le tassement final des remblais n'engendre pas la création d'une dépression résiduelle dans laquelle les eaux viendraient stagner ou s'infiltrer**. Durant l'exploitation il conviendra d'avoir une certaine **vigilance lorsque les engins de terrassement s'approcheront des fronts**, relativement à la sécurité des travailleurs et engins. **Des analyses de stabilité spécifique de ces fronts pourront être requises** si ceux-ci sont altérés voire disloqués ;
- que pour les **carrières en eau**, si le remblayage n'est pas total, l'aménagement de berges nécessitera leur reprofilage selon des pentes généralement connues par la profession, **ne devant pas dépasser 25°**. La caractérisation des matériaux est obligatoire, afin **d'éviter les matériaux sensibles à l'eau**, d'une part, **et les matériaux trop argileux faisant écran à la circulation des eaux souterraines**, d'autre part. Des études de stabilité spécifiques pourront être établies, et seront à recommander si l'usage futur prévoit une occupation humaine (création d'une base de loisirs).

8.1 Logigramme et tableau de synthèse

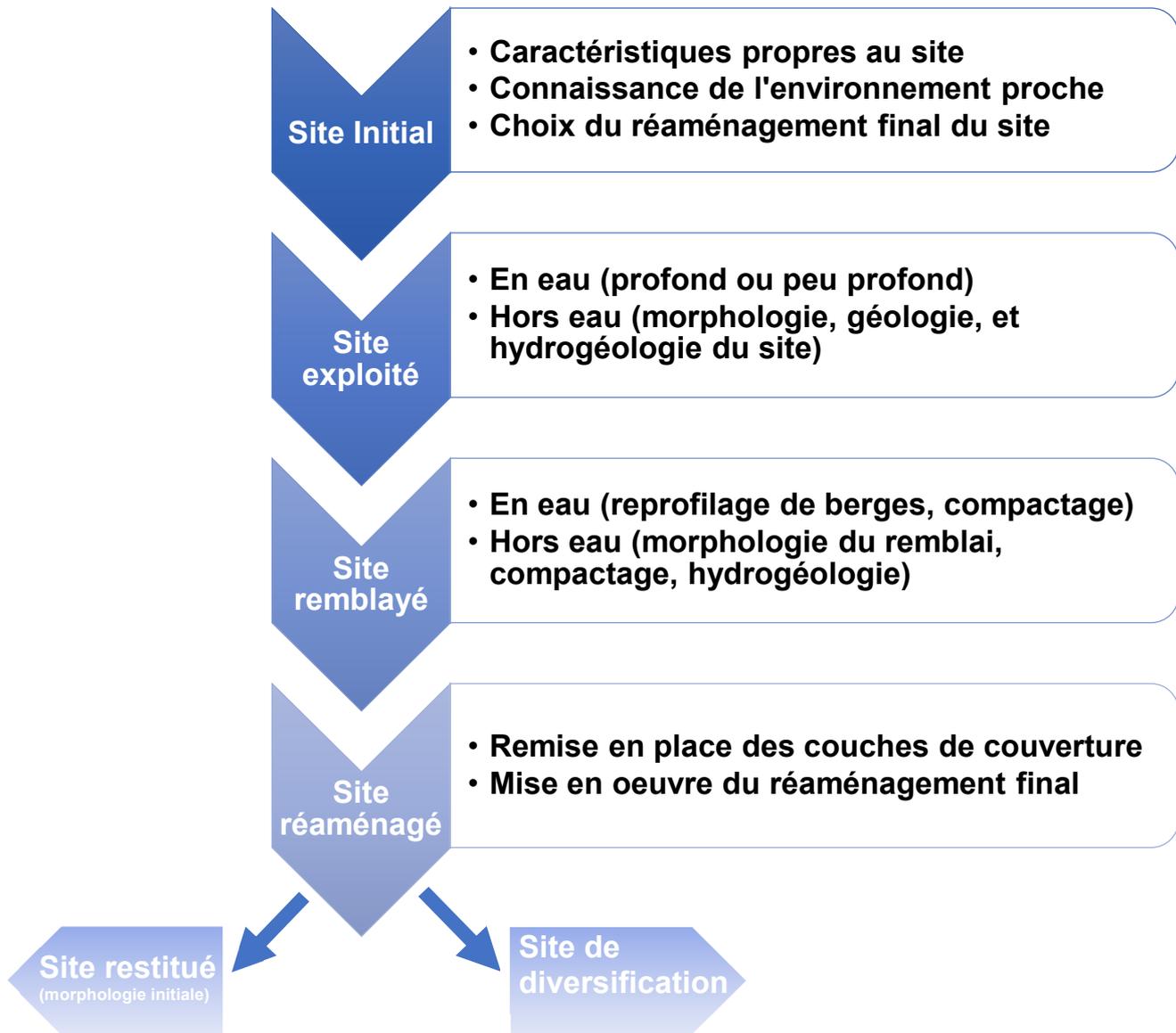


Figure 17 : Schéma global des différentes étapes menant à un réaménagement d'une carrière à ciel ouvert par remblayage de déchets inertes

Tableau 7 : Mise en œuvre des bonnes pratiques pour le remblayage de carrières à ciel ouvert par déchets inertes (critères de stabilité à long terme)

Site exploité							Connaissance du site	
Hors eau				En eau			Historique	Autre facteurs externes
Morphologie		Géologie	Hydrogéologie	Peu profond	Profond		- Caractériser et localiser les zones de remblayage déjà existantes	- Définir la sismicité locale du site ; - Vérifier la présence ou l'absence de cavités souterraines sous la zone à remblayer
Flanc	Fosse	- Définir le type de carrière (Carrière de roches meubles ou de roches massives) ; - Apprécier/Vérifier la résistance des couches supports du futur remblai.	- Définir le schéma d'écoulement des eaux (météorique, ruissellement, souterraine)	< 5 m	> 5 m			
Site remblayé								
Création de verse			Comblement total de la fosse	Remblayage total	Création de berges		Caractéristiques des déchets inertes	
> 10 m	< 10 m				- Colmater les ouvertures karstiques ou les fissures des couches support du remblai	- Mise en place d'une couche imperméable à l'interface remblai-terre arable ; - Mise en place de fossés de crête pour récupérer et rediriger les eaux ; - Mise en place d'éperons drainants - Mise en place de couche drainante à la base du remblai		- Caractérisation obligatoire des déchets inertes
	- Etude de stabilité recommandée (coefficient de sécurité ≥ 1,5) - Mise en place de risbermes conseillée - Caractérisation des déchets inertes recommandée selon GTR	Pente classique (≤30°) et déchets inertes connus	Pente non classique (≥30°) ou déchets inertes non connus	- Etude de stabilité recommandée (coefficient de sécurité ≥ 1,5) - Risberme intermédiaire conseillée quand > 5 m			- Déterminer la nature et la granulométrie des déchets inertes (se référer au GTR) ; - Pratiquer des essais géomécaniques si le comportement du matériau est incertain par rapport aux contraintes subies pour la hauteur projetée ou si le site présente des indices d'instabilité ; - S'il y a plusieurs types de déchets inertes, affecter un type de déchet inerte selon la zone du remblai (zonage, voir chapitre 6.1) ; - Utilisation des déchets inertes contenant du gypse ou de l'anhydrite (plâtre) uniquement pour remblayer les carrières de gypse ou d'anhydrite ; - Etre vigilant avec des déchets inertes contenant de l'argile.	
- Compactage des couches successives de remblais par les engins de la carrière (ne pas dépasser l'épaisseur de 1 m). Éviter le gerbage qui conduit à aucun compactage - Calcul du tassement final pour arriver à la cote du projet - Privilégier des matériaux à granulométrie élevée en partie basse du remblai (tableau 2 chapitre 6.1)								
Site réaménagé								
Remise en place des couches de couverture				Création d'un plan d'eau				
Mise en place de couche de terre arable	Parcelle agricole	Usage industriel/artisanal /urbanistique	Zone écologique	Base de loisir	Zone écologique	Usage industriel/artisanal /urbanistique	Base de Loisir	Réserves en eau potable ou d'irrigation
Points d'attention :								
- Topographie finale des terrains - Nature des déchets inertes - Epaisseur de la couche selon l'usage - Système de drainage - Ameublement des terrains								
Site restitué (morphologie initiale) ou de diversification				Site de diversification				

8.2 Les attendus d'une étude de stabilité de remblais

Le niveau de l'étude de stabilité des remblais doit s'adapter à la norme NF P 94-500 relative aux missions géotechniques types pour la réalisation d'ouvrages de génie civil (voir le tableau synthétique à l'annexe E).

Dans le cas des carrières, le niveau de mission de l'étude géotechnique doit s'adapter :

- durant l'exploitation aux enjeux de sécurité des travailleurs, primordiaux, et de perte d'exploitation en cas d'instabilité ;
- en phase de remise en état à un usage spécifique du site, si celui-ci est identifié au préalable et convenu entre l'exploitant et le repreneur.

La réalisation d'une **étude de stabilité** de type G1 (étude géotechnique préalable) est incontournable quel que soit le projet de remblaiement. Il s'agit, comme l'indique la norme, **d'atteindre les objectifs de connaissance des spécificités géotechniques du site et de première adaptation des ouvrages (dans le cas présent les remblais) à ces spécificités**. Il s'agit également d'établir une identification des risques présentés par le site et les ouvrages qui y sont édifiés.

Les prestations d'investigations géotechniques sont fonction, selon la norme, des données existantes, de la complexité géotechnique du site, et des caractéristiques des remblais, notamment leur hauteur.

On revient donc ici aux connaissances à acquérir relatives à la zone d'accueil des remblais (la carrière) et à ces derniers, exposées aux chapitres 5 et 6. Le Tableau 8 suivant en établit les grandes lignes.

La réalisation d'une **étude géotechnique de conception** de type G2 est **nécessaire en cas de réalisation d'ouvrages spécifiques**. Cette étape est progressive, elle démarre au choix des différentes solutions envisageables, et peut aboutir à la consultation et au choix de l'entreprise pour réaliser ces ouvrages, au cas où l'exploitant n'ait pas les capacités techniques pour les édifier. Dans le cadre des carrières ces études sont recommandées (liste non exhaustive) :

- **pour les remblais avec verse résiduelle post-exploitation** (ou lorsque l'exploitation perdure à proximité, avec des enjeux de sécurité de type engins passant à proximité, ou installations de process) **de grande hauteur** (par exemple supérieure à 30 m). Il s'agit alors de définir les pentes et ouvrages permettant de garantir la stabilité de l'édifice ;
- pour les **dispositifs de soutènement de versés** (murs, enrochements, autres ...) ;
- pour les **dispositifs de rétention des blocs** (remblai à proximité de fronts résiduels, après réaménagement ou lorsque cette situation géométrique perdure pendant l'exploitation, avec des enjeux de sécurité de type engins passant à proximité, ou installations de process). Cette rétention peut se faire **en agissant directement sur le front** (parades actives de type grillages, filets, ou autres) ou **en contenant la propagation de blocs mobilisés** (merlons, murs, ou autres) ;
- pour les ouvrages complexes, au cas par cas, de **rétention, de limitation d'infiltration, de contournement et d'évacuation des eaux**.

Il est important de noter que ces ouvrages nécessiteront, pour la plupart, une maintenance après la phase de réaménagement, c'est-à-dire en post-exploitation.

Tableau 8 : Données à acquérir ou compléter dans le cadre d'une étude de stabilité de remblais en contexte de carrière

Données à acquérir ou compléter	Critères de spécificité/complexité	Investigations adaptées
	Contexte	
Historique du site	<p>Peu de données préalables relatives aux lignes suivantes.</p> <p>Carrières appartenant successivement à différents exploitants, avec perte de mémoire/d'information.</p> <p><i>Exploitation, Post-exploitation</i></p>	<p>Selon le contexte, voir lignes ci-après.</p> <p>Examen et analyse des documents et études antérieurs, sur la carrière ou dans l'environnement de la carrière.</p>
Géologie du site	<p>Aptitude au tassement, à la remobilisation, à la dissolution du sol support au remblai (notamment pour les remblais de hauteur supérieure à 10 m).</p> <p><i>Exploitation, Post-exploitation</i></p>	<p>Selon le contexte :</p> <p>Sondages carottés, destructifs, essais pressiométriques, sondages au pénétromètre ;</p> <p>Essais à l'œdomètre, de cisaillement.</p>
	<p>Fronts altérés ou fracturés avant remblayage (sécurité des travailleurs).</p> <p><i>Exploitation</i></p>	<p>Observation des fronts, relevés géologiques, des discontinuités (azimut, pendage), des désordres, des arrivées d'eau, évaluation des typologies d'instabilité redoutées (voir l'annexe F issue de LCPC, [16]).</p>
Géomorphologie du site	<p>Verse résiduelle projetée après remblaiement. Stabilité du versant ou aucun remblai n'est apposé.</p> <p><i>Exploitation, Post-exploitation</i></p>	<p>Pour le versant non remblayé : Observation des fronts, relevés géologiques, des discontinuités (azimut, pendage), des désordres, des arrivées d'eau, évaluation des typologies d'instabilité redoutées (à l'échelle des gradins unitaires comme à l'échelle de toute la pente intégratrice) [16].</p>
Hydrogéologie et hydrographie du site	<p>Possibilité de carrière temporairement en eau (remontée de nappe).</p> <p>Importance des arrivées d'eaux superficielles (provenant de l'amont) et latérales (massif rocheux).</p> <p><i>Exploitation, Post-exploitation</i></p>	<p>Selon le contexte : Etude hydrogéologique (ou complément d'étude) spécifique à l'échelle du bassin hydrogéologique et hydrographique, et de l'environnement de la carrière (définition du schéma d'écoulement des eaux).</p> <p>Eventuellement réalisation de piézomètres supplémentaires.</p>
Autres facteurs externes	<p>Zone sismique moyenne à forte, présence ou suspicion de cavités souterraines naturelles (dissolution) ou anthropiques.</p> <p><i>Exploitation, Post-exploitation</i></p>	<p>Au cas par cas.</p>
Caractéristiques du remblai	<p>Détection d'utilisations défavorables selon la position dans le remblai (carrières hors ou en eau).</p> <p>Comportement du matériau incertain par rapport aux contraintes subies pour la hauteur projetée (notamment pour les remblais de hauteur supérieure à 10 m), ou si le site présente des indices d'instabilité (voir chapitre 6.1).</p> <p><i>Exploitation</i></p>	<p>Essai de classification de type GTR des matériaux arrivant sur site, soit par acquisition des études antérieures sur les matériaux, soit par réalisation d'essais spécifiques (voir chapitre 6.1).</p>
Morphologie finale du remblai	<p>Verse résiduelle projetée. Stabilité de cette verse (notamment si sa hauteur est supérieure à 10 m).</p> <p><i>Exploitation, Post-exploitation</i></p>	<p>Selon le contexte, acquisition des études antérieures sur les matériaux, ou <i>essais</i> d'identification, de cisaillement, en laboratoire.</p> <p>Calculs de stabilité au moyen de logiciels classiques de stabilité des pentes, expression d'un facteur de sécurité (voir chapitre 6.2).</p>
Gestion de l'eau au niveau du remblai	<p>Eviter des infiltrations massives, les zones de concentration des eaux, ou au contraire les zones étanches (notamment pour les remblais de hauteur supérieure à 10 m).</p> <p>Eviter les écrans étanches empêchant la circulation d'eaux souterraines (carrières en eau).</p> <p>Pré-dimensionner les ouvrages de gestion des eaux, en intégrant les caractéristiques hydrogéologiques et hydrographiques du site (voir chapitre 6.3).</p> <p><i>Exploitation, Post-exploitation</i></p>	<p>Essai de classification de type GTR des matériaux arrivant sur site, évaluation de leur sensibilité à l'eau, soit par acquisition des études antérieures sur les matériaux, soit par réalisation d'essais spécifiques.</p> <p>Etudes spécifiques au cas par cas (voir chapitre 6.3).</p> <p>Pré-dimensionnement des ouvrages de gestion des eaux.</p>
Techniques de remblayage	<p>Détecter les opérations de terrassement à éviter et évaluer l'épaisseur des couches à mettre en œuvre, selon la nature du matériau et la géométrie de la carrière.</p> <p>Eviter la non-adaptation des engins de terrassement à proximité des fronts, et les consignes de sécurité à établir.</p> <p><i>Exploitation</i></p>	<p>Essai de classification de type GTR des matériaux arrivant sur site, soit par acquisition des études antérieures sur les matériaux, soit par réalisation d'essais spécifiques (voir chapitre 6.1).</p> <p>Observation des fronts, études des typologies d'instabilité redoutées.</p>

8.3 Les recommandations d'études et de travaux en situation de post-désordre

Le retour d'expérience établi par l'Ineris dans le cadre de ce guide, à savoir les réponses des inspecteurs et exploitants, indique que les principaux désordres pouvant nuire, d'une part à l'exploitation, d'autre part à la tenue à moyen et long terme des remblais, en phase de post-exploitation, sont associés au phénomène de glissement affectant un remblai en situation de verse, temporaire ou définitive.

Les mécanismes et volumes concernés

Un glissement de terrain profond correspond au déplacement d'une masse de matériaux le long d'une surface de rupture sous l'effet de la gravité (Varnes, [28]). D'une manière générale les glissements de terrain sont divers en raison de la multiplicité des mécanismes d'initiation et d'évolution (érosion, dissolution, déformation et rupture sous charge statique ou dynamique...) liés à la topographie (pente du versant, dénivelée, forme du versant, ...), à la lithologie (caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux), à la structure géologique (pendage, fracturation, superposition des couches, etc.), aux nappes aquifères, à la teneur en eau des matériaux.

La classification internationale proposée pour les glissements par Varnes [28] est généralement utilisée. Reprise entre autres par Cruden et Varnes [7] (Figure 18), elle se fonde sur les types de matériaux impliqués (« rock » roche, « debris » matériau meuble composite, comme un remblai de carrière, « earth » terre, matériaux très fins) et les mécanismes d'initiation.

Le glissement peut suivre une ligne de rupture circulaire (glissement rotationnel), plane, ou parfois complexe, selon la nature, l'hétérogénéité voire l'anisotropie (par exemple le litage créé par le remblayage) du matériau (voir quelques illustrations à la Figure 10).

Les volumes concernés dépendent de la profondeur de la zone de rupture. On évoque le terme de **glissement profond** lorsque la surface de rupture se trouve à plus de dix mètres de profondeur, et de **glissement superficiel** lorsque cette surface est sise à quelques mètres de profondeur. Ainsi, sur des verses de hauteur réduite, seul le phénomène de glissement superficiel peut se produire, généralement gérable par l'exploitant. En revanche les édifices de plusieurs dizaines de mètres de hauteur peuvent être affectés par des glissements profonds.

Tableau 9 : Classes d'intensité des mouvements de pente (extrait du guide des aléas miniers de l'Ineris, [14])

Description	Paramètres et valeurs seuil
Reptations, ravinements	Volume de quelques m ³
Glissements superficiels, ravinements importants	Volume de 10 à 100 m ³
Glissements profonds	Volume de 100 à 5000 m ³
Glissements profonds majeurs	Volume supérieur à 5000 m ³

Dans certains cas très particuliers ou le remblai constitutif de la verse est très fin (silt, sable très fin) et saturé en eau, il est possible que ces glissements se propagent en coulée, le matériau étant totalement déstructuré, voire fluide, et atteignent des distances de plusieurs mètres à quelques dizaines de mètres selon la hauteur de la verse. Mais ces cas sont très rares, aucun n'a été relevé lors de l'établissement de notre retour d'expérience.

Material		ROCK	DEBRIS	EARTH
Movement type				
FALLS		<p>Rock fall</p>	<p>Debris fall Scree Debris cone</p>	<p>Earth fall Colluvium Debris cone</p>
		<p>Rock topple</p>	<p>Debris topple Debris cone</p>	<p>Earth topple Cracks Debris cone</p>
SLIDES	Rotational	<p>Single rotational slide (slump) Failure surface</p>	<p>Multiple rotational slide Crown Head Scarp Minor Scarp Failure surface Toe</p>	<p>Successive rotational slides</p>
	Translational (Planar)	<p>Rock slide</p>	<p>Debris slide</p>	<p>Earth slide</p>
SPREADS	<p>e.g. cambering and valley bulging</p>			<p>Earth spread</p>
FLOWS	<p>Solifluction flows (Periglacial debris flows)</p>	<p>Debris flow</p>	<p>Earth flow (mud flow)</p>	
COMPLEX	<p>e.g. Slump with rock fall debris</p>	<p>e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe</p>		

Figure 18 : Classification des glissements selon Cruden et Varnes, [7]. En encadré rouge les glissements les plus fréquents observés en remblais de carrières

Les principales causes

Issus de l'expertise de l'Ineris et des informations acquises par les consultations réalisées dans le cadre du présent guide, on peut considérer que les principales causes de glissement sont la combinaison de tout ou partie des éléments suivants :

- **une pente trop élevée de la verse** (supérieure à 30° ou moins selon le taux de fines des matériaux constitutifs) ;
- un **remblai constitué de matériaux très fins** (argiles, silts, sables) et de peu d'éléments grossiers (pierres, blocs) structurant l'édifice ;
- un **remblai hétérogène**, du fait de la mise en place par déversement et/ou par couches de nature différentes, pouvant conduire à distinguer ainsi des zones qui peuvent se saturer et conduire à des pressions interstitielles ayant du mal à se dissiper, ou à l'inverse des zones qui peuvent être facilement drainées mais en entraînant des matériaux ;
- *a fortiori* un **remblai sans dispositif de drainage spécifique** mis en place lors de l'édification ;
- un **remblai apposé au front préexistant, sans dispositif visant à ce que les eaux provenant de l'amont puissent être évacuées**, et ainsi ne pas s'infiltrer ou ruisseler.

ainsi que les éléments extrinsèques de toute première importance suivants, qui peuvent également se combiner :

- des **événements pluviométriques** journaliers ou saisonniers (cumul sur plusieurs journées ou décades) **exceptionnels** (fréquence décennale à centennale) ;
- la présence de **sources ou émergences**, intermittentes ou pérennes, au sein du front rocheux sur lequel le remblai a été apposé ;
- dans la partie sommitale du remblai, **l'afflux et la concentration possibles des eaux** de surface provenant du bassin versant supérieur ;
- cas plus rare, dans certains exemples d'approfondissement des excavations, **la remontée de la nappe phréatique** au sein des remblais.

Les attendus d'une étude de stabilité post-désordre

La qualité de cette étude de stabilité post-désordre est fondamentale. Elle se doit :

- **d'analyser le plus précisément possible les mécanismes et causes de rupture**, qui peuvent s'inscrire au sein des paramètres évoqués ci-avant, mais éventuellement avoir d'autres origines (travaux et surcharges anthropiques, éventuellement séismes, ...). De cette analyse incontournable, pouvant s'appuyer sur des investigations spécifiques, devront être tirées les conclusions sur la stabilité et la mise en sécurité en phase d'exploitation et à long terme ;
- **de proposer les travaux d'aménagement de pente**, de reprofilage, de confortement, ou encore de substitution de matériaux, en apportant les calculs et éléments nécessaires à l'évaluation de la stabilité à long terme ;
- **de proposer les travaux visant à améliorer l'écoulement, l'évacuation, le drainage** des eaux, en amont, sur ou au sein du remblai, en apportant les calculs et éléments nécessaires à l'évaluation de leur pérennité à long terme ;
- **de proposer les dispositions de surveillance et de maintenance** des ouvrages en phase d'exploitation et de post-exploitation.

Tableau 10 : Déroulement d'une étude de stabilité post-désordre (glissement de versé). En bleu la recherche des mécanismes et causes, en vert l'étude des dispositions de mise en sécurité

Données à acquérir	Investigations de base et spécifiques le cas échéant
Informations externes sur le désordre	Date, période du désordre, vitesse du désordre si observé, éléments anormaux constatés auparavant (mouvements de terrain avant-coureurs, suintements, arrivées d'eau, période de pluie exceptionnelle, orage, ...), anciens désordres dans le même secteur ou en contexte équivalent.
Informations sur les matériaux mis en œuvre	Type de matériau mis en œuvre dans le secteur du désordre, mode de mise en œuvre, difficultés de terrassement, présence de matériaux fins ou sensibles à l'eau. <i>Essai de classification de type GTR des matériaux de la zone de désordre, soit par acquisition des études antérieures sur les matériaux, soit par réalisation d'essais spécifiques (voir chapitre 6.1).</i>
Informations sur la versé	Pente, présence de risbermes, dispositifs d'évacuation des eaux et de drainage existants, éventuels confortements liés à des anciens désordres.
Géologie du front rocheux	Si le glissement implique une partie du front rocheux : nature géologique du front (anciennes études du site) observation du front, relevés géologiques, des discontinuités (azimut, pendage), des désordres, des arrivées d'eau.
Hydrogéologie et hydrographie du site	Etude hydrogéologique et hydrographique (ou complément d'étude) spécifique à l'échelle de la zone de désordre (schéma d'écoulement des eaux). Recherche des événements météorologiques anormaux ou exceptionnels avant le désordre. Conclusions sur l'existence de conditions de concentration, d'afflux, de remontée, de stagnation d'eau à proximité de la zone de désordre. <i>Eventuellement réalisation de piézomètres supplémentaires.</i>
Autres facteurs ayant pu concourir aux désordres	Activités anthropiques dans la zone de désordre, prise de matériau, tirs, vibrations, séisme, présence ou suspicion de cavités souterraines naturelles (dissolution) ou anthropiques sous la versé, ...
Bilan sur les causes et mécanismes du désordre	Bilan des actions précédentes, visant à proposer un ou des mécanismes de rupture et en établir les causes intrinsèques et extrinsèques. Il s'agit d'être le plus précis possible, et s'il réside des incertitudes de les signifier.
Aspects temporels de la mise en sécurité	Selon que le secteur du désordre soit dans une situation <i>provisoire</i> (reprise ultérieure, ou remblaiement de tout le reste de la carrière, pendant la période d'exploitation) ou dans une situation supposée <i>définitive</i> , la typologie de travaux de mise en sécurité est différente.
Proposition de travaux de mise en sécurité	De nombreuses solutions unitaires ou combinatoires sont possibles, déclinées ci-après : terrassements, dispositifs de drainage, introduction d'éléments résistants, travaux sur le sol support [19]. Voir tableau 11.
Proposition de travaux de surveillance et de maintenance au regard de la mise en sécurité proposée	Surveillance visuelle, topographique, par sondages, pézométrie. Il est important d'indiquer la fréquence de suivi, resserrée dans un premier temps, et qui peut être relâchée s'il n'est pas constaté de caractère évolutif. Voir Indiquer les travaux de surveillance/maintenance en phase d'exploitation mais également ceux qui perdureront en phase de post-exploitation. Voir tableau 11.

Les travaux de mise en sécurité

Les travaux de mise en sécurité sont variables selon les mécanismes et causes du désordre. Nous nous bornerons ici, sur la base des méthodes décrites par Reiffsteck (Techniques de l'Ingénieur, [19]), d'en faire ressortir au Tableau 11 les points importants pour assurer leur pérennité. Des recommandations de surveillance et de maintenance sont également proposées.

Ces travaux doivent être souvent combinés, notamment les travaux de terrassement et les travaux de drainage.

Il est recommandé de s'adjoindre les compétences d'un bureau d'études en charge de la maîtrise d'œuvre des travaux, et il est fondamental de disposer d'un plan de récolement des travaux réalisés, en cas d'une éventuelle survenance de désordre dans le futur, mais également et plus largement du fait du changement de titulaire des parcelles et des aménagements envisagés en phase de post-exploitation.

Catégorie de travaux	Méthodes	Points importants	Situation temporelle	Maintenance, surveillance ultérieures
Terrassements	Mise en place d'un remblai de pied	Matériau servant de butée de pied et empêchant le glissement. Ancrage impératif dans le sol support sain. Vérifier que l'ouvrage limite les risques de glissement en amont, et ne déclenche pas d'autres glissements. Fréquemment mise en place de matériaux drainants pour évacuer les eaux de la zone de verse. Calculs de stabilité en fonction de la nouvelle géométrie du talus et de la nature des matériaux mis en place.	Provisoire, définitive	Surveillance visuelle, topographique, par technologie de visée (scanner laser 3D, Lidar sur drone aéroporté). Eventuellement suivi inclinométrique au sein de sondages en zone de glissement (situation provisoire).
	Allègement en tête	Ablation de matériau en partie supérieure pour diminuer le poids, moteur du glissement, et la pente. Calculs de stabilité en fonction de la nouvelle géométrie du talus.	Provisoire, définitive (ces travaux peuvent suffire à la stabilité à long terme)	Surveillance visuelle, topographique, par technologie de visée (scanner laser 3D, Lidar sur drone aéroporté). Eventuellement suivi inclinométrique au sein de sondages en zone de glissement (situation provisoire).
	Purge	Enlèvement du matériau glissé (désordres de taille modeste). L'ensemble du matériau glissé peut être retiré, à condition de garantir que la surface mise à nu soit stable. Connaissance de la profondeur du matériau glissé pour terrasser en deçà de la surface de rupture. Calculs de stabilité en fonction de la nouvelle géométrie du talus.	Provisoire, définitive si la surface mise à nu est stable	Surveillance visuelle, topographique, par technologie de visée (scanner laser 3D, Lidar sur drone aéroporté). Pas de disposition spécifique si tout le matériau a été enlevé et si les matériaux d'appui sont stables.
	Substitution	Purge et remplacement par un nouveau matériau pour restituer le profil. Connaissance de la profondeur du matériau glissé pour terrasser en deçà de la surface de rupture. Réalisation de redans pour un bon accrochage entre le matériau d'apport et les terrains sous-jacents. Calculs de stabilité en fonction de la nouvelle géométrie du talus et la nature du matériau apporté.	Définitive au vu de la technicité de la méthode	Surveillance visuelle, topographique, par technologie de visée (scanner laser 3D, Lidar sur drone aéroporté).
Dispositifs de drainage	Collecte et canalisation des eaux de surface	Fossés, caniveaux, pouvant être étanchéifiés s'il y a risque de stagnation, permettant de collecter et évacuer les eaux de surface hors (latéralement et en aval) de la zone de glissement.	Provisoire (en première urgence après le désordre, notamment), définitive combinée avec des travaux de terrassement	Surveillance de la continuité et de la non altération/fissuration des ouvrages, maintenance par rebouchage, réfection, étanchéification.
	Tranchées drainantes	Ouvrages de rabattement de la nappe, devant recouper les lignes de courant et les zones de mise en charge des eaux. Disposées en amont, dans la ligne de plus grande pente, parallèles à la pente (sur des risbermes intermédiaires par exemple), leur profondeur, agencement et espacement, et ainsi leur efficacité, sont conditionnés par les résultats de l'étude hydrogéologique.	Définitive, très fréquemment en combinaison à des travaux de terrassement	Surveillance par des regards d'observation des écoulements et débits reliés aux tranchées, surveillance par des piézomètres en amont, dans la pente, en aval de la pente. Maintenance : vérification du maintien de leur continuité (si des désordres ou mouvements résiduels surviennent à proximité) de leur caractère drainant (non obstruction, non contamination par des matériaux fins).
	Drains subhorizontaux	Libération de la surpression interstitielle et déchargement des aquifères localisés par la réalisation de forages subhorizontaux dans lesquels sont disposés des tubes crépinés. Ouvrages parfois réalisés dans des conditions de difficultés de mise en place de tranchées drainantes. Peu efficace si le matériau est très fin ou si les forages sont trop espacés.	Provisoire	Maintenance : vérification du non colmatage des drains (plus de sortie d'eau, ouvrage masqué par des terrains superficiels remobilisés localement).
	Masques et éperons drainants	Masques : ouvrages en matériaux granulaires mis en place en parement de talus. Rôle d'évacuation des eaux à proximité de la pente, et gain de stabilité du fait des caractéristiques très frottantes des matériaux granulaires. Eperons : masques discontinus, plus larges et moins profonds que des tranchées. Illustration en Figure 11.	Provisoire, définitive	Maintenance : vérification du maintien de leur continuité (si des désordres ou mouvements résiduels surviennent à proximité) de leur caractère drainant (non obstruction, non contamination par des matériaux fins).
Introduction d'éléments résistants	Ouvrages de soutènement	Ouvrages souples (gabions, sols renforcés par des armatures) ou ouvrages rigides (murs en béton), ces derniers moins employés car n'admettant pas les déformations du sol. Etudes de stabilité et de dimensionnement du soutènement - stabilité interne à l'ouvrage (résistance intrinsèque) et externe à l'ouvrage (résistance à l'effort maximal des masses en mouvement). Des dispositifs de drainage évitant une surpression interstitielle derrière l'ouvrage sont fréquemment associés (barbacanes dans le cas de murs rigides).	Définitive	Surveillance (du bon fonctionnement du soutènement) visuelle, topographique, par technologie de visée (scanner laser 3D, Lidar sur drone aéroporté). Maintenance si ouvrage fissuré ou détérioré, ou drains colmatés.
	Tirants d'ancrage	Atteinte de la surface de rupture par des forages équipés de câbles, scellés dans le matériau stable sous la surface de rupture, et application d'efforts de traction en tête des ouvrages pour stabiliser la zone mobilisable.	Définitive	Maintenance des parements et têtes d'ancrage.

		Disposition de haute technicité, rare en carrière, envisageable pour des glissements de grande hauteur.		
	Inclusions : clous, micropieux, barrettes	Inclusions rigides visant à diminuer la mobilisation de la zone au-dessus et au voisinage de la surface de rupture, sans ancrage sous celle-ci. Ces inclusions mobilisent les efforts de traction, de flexion, de cisaillement, selon la technique utilisée. Disposition de haute technicité, rare en carrière, non envisageable pour des glissements profonds du fait des efforts considérables à reprendre.	Définitive	

Tableau 11 : Principaux travaux de mise en sécurité (méthodes et points importants adaptés de [19])

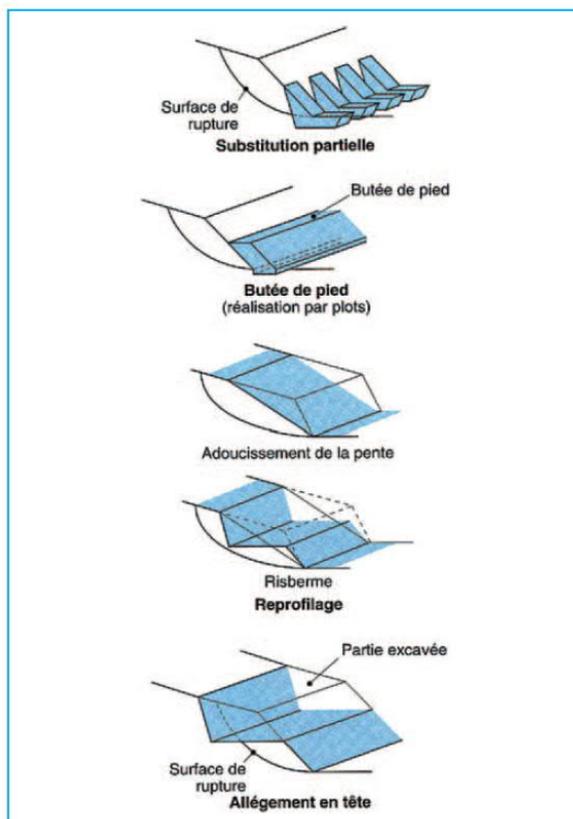


Figure 19 : Différentes méthodes de stabilisation par terrassement (Reiffsteck, [19])

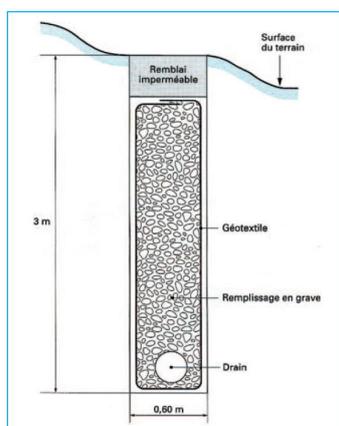


Figure 20 : Coupe-type d'une tranchée drainante (Reiffsteck, [19])

9 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 sur les critères de stabilité des remblais lors de remblayage de carrières à ciel ouvert par des déchets inertes.

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 critères doivent être remplis : des critères propres au site et des critères propres au remblai.

Concernant les critères de stabilité liés à la zone d'accueil du remblai, il est important de vérifier la résistance des terrains supports du remblai, de définir l'origine et la localisation des eaux du site dans l'objectif d'en prévoir une gestion maîtrisée et de caractériser précisément le site exploité (définir les anciennes zones de remblayage, la sismicité locale du site, la présence de cavités souterraines, ...).

Concernant les critères de stabilité liés au remblai, il est préconisé de déterminer la nature et la granulométrie des déchets inertes, de pratiquer des essais géomécaniques si le comportement du matériau est incertain par rapport aux contraintes subies pour la hauteur projetée, ou si le site présente des indices d'instabilité, et d'être vigilant vis-à-vis des usages possibles s'agissant de déchets inertes spécifiques (gypse, argile, déchets inertes de granulométrie très faible, ...).

En outre, la morphologie de la zone remblayée mérite une attention particulière en termes de stabilité : si une verse est créée et selon sa hauteur, il sera conseillé de réaliser une étude garantissant la stabilité à long terme, c'est-à-dire bien après le réaménagement. Dans le cas de berges, un reprofilage pour aboutir à une pente limitée est recommandé. La stabilité est aussi assurée par le compactage des couches et le zonage des déchets inertes dans le remblai pour favoriser l'emploi de matériaux avec une granulométrie élevée à la base.

Enfin, concernant le réaménagement final, la remise en place des couches de couverture permet une revégétalisation des terrains contribuant à la tenue des terrains et donc à la stabilité à long terme.

Il ressort de cette analyse que les deux principaux critères dont il faut tenir compte pour assurer la stabilité d'une zone remblayée par des déchets inertes sont la pente des remblais et la gestion des eaux. A ces deux critères s'ajoutent des précautions à prendre pour la prise en charge des déchets inertes « non classiques », à savoir ceux contenant du gypse, de l'argile ou ceux de granulométrie très faible ou très hétérogène.

L'ensemble de ces bonnes pratiques est regroupé dans un tableau permettant d'avoir une vision globale de la problématique. Les attendus relatifs à une étude de stabilité et les recommandations d'études et de travaux en situation de post-désordre sont également proposés.

Il faut souligner que le choix du réaménagement, au regard de l'utilisation ultérieure du site, doit être anticipé, si possible avant le début de l'exploitation du site : cela permet de planifier à long terme les zones de remblayage et de commencer cette phase de remblayage simultanément et de manière coordonnée à l'extraction. Dans de nombreux cas, plusieurs possibilités de destination finale peuvent être envisagées sur un même site réaménagé, et les projets d'usage industriel (production d'énergies renouvelables par exemple) ou à vocation de recevoir du public, sont en plein essor. Proposer une approche coût-bénéfice des différentes solutions de destination finale selon les critères du site et de l'exploitation permettrait au porteur du projet de choisir l'option la plus favorable. Une analyse dans ce sens encouragerait l'utilisateur à valoriser ce type de site et à proposer des projets à forte valeur ajoutée.

10 Références

- [1] Bérard J.P., 1999. Note technique sur la remise en état des carrières en Languedoc-Roussillon. Rapport BRGM R 40614, 39 pages, 4 figures, 5 annexes.
- [2] 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.
- [3] BRGM, 2012. Que sont les effets de site lithologiques ? <http://www.planseisme.fr/Complement-explications-effets-de-site.html>
- [4] Callier L, Charbonnier P, 2000. 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. Rapport BRGM/RP-50111-FR, 111 p.
- [5] 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, décembre 2016, 22 p.
- [6] CPTAQ, 2016. Guide des bonnes pratiques agronomiques - Sablières, gravières, carrières, remblais et sol arable en zone agricole. Octobre 2016, 50 p. [http://www.cptaq.gouv.qc.ca/fileadmin/fr/publications/guides/Guide_des_bonnes_pratiques_agronomiques - Sabli%C3%A8res gravi%C3%A8res carri%C3%A8res remblais et sol arable en zone agricole-1.pdf](http://www.cptaq.gouv.qc.ca/fileadmin/fr/publications/guides/Guide_des_bonnes_pratiques_agronomiques_-_Sabli%C3%A8res_gravi%C3%A8res_carri%C3%A8res_remblais_et_sol_arable_en_zone_agricole-1.pdf)
- [7] Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996, Landslide Types and Processes, Transportation Research Board, U.S. National Academy of Sciences, Special Report, 247: 36-75
- [8] DDE60, 2008. Le remblayage de carrières en activité par des déchets inertes du BTP. Les Feuilles de l'Oise, n°165, mars 2008, 2 p., <http://www.oise.gouv.fr/content/download/13625/85041/file/Feuille>
- [9] DRIRE Centre, 2005. la remise en état des carrières après exploitation. Un enjeu environnemental. Plaquette, 6 p., http://www.centre-val-de-loire.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Plaquette_La_remise_en_etat_des_carrieres_apres_exploitation_-_decembre_2005_cle1d77ae.pdf
- [10] 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>
- [11] ENPC, 1977. Remblais sur sols compressibles. ISBN 2-85 978-008-4. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées. Novembre 1977.
- [12] Faure RM, Gress JC, 2014. Drainage des pentes Exemples de solutions. http://www.pentes-tunnels.eu/enseignement/cours_RMF_2A/ad3_Drainage_des_pentes.pdf (consulté le 29/07/2020).
- [13] GSM, 2006. Carrières et Territoires. L'approche GSM. 1-L'expérience du réaménagement. <https://www.gsm-granulats.fr/fr/nos-engagements/environnement/reamenagement-carrieres> (consulté le 30/07/2020)
- [14] Ineris, 2018. Guide d'évaluation des aléas miniers. Ineris 17-164640-01944A. <https://www.ineris.fr/fr/guide-evaluation-aleas-miniers>
- [15] Lansiaert M, Oden B, 1999. La remise en état des carrières : principes généraux, recommandations techniques et exemples par type d'exploitation. Rapport BRGM R-40450, 60 p.
- [16] LCPC, 2004. Les études spécifiques d'aléa lié aux éboulements rocheux. Guide technique. Collection Environnement. Les risques naturels.
- [17] Mokhtar Ahdouga S., 2018. Analyse de la stabilité d'un remblai. Mémoire de Master. 70 p. <http://dspace.univ-msila.dz:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/6518/577.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [18]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)
- [19]Reiffsteck P., 2015. Stabilité des pentes. Glissements en terrain meuble. Techniques de l'Ingénieur. Réf. : C254 V3
- [20]SETRA, LCPC, 2000. Guide des terrassements routiers (GTR) – Fascicule 1 : Réalisation des remblais et des couches de forme – Fascicule 2 : Annexes techniques. Juillet 2000, 211 p.
- [21]Sciences Environnement, 2017. Résumé non technique de l'étude d'impact – Carrière alluvionnaire de la Villeuneuve-au-Chatelot. Dossier 11-096 / Mai 2017 V04/17.
- [22]Sciences Environnement, 2016. Demande d'autorisation d'extension – Carrière de Marliens / Rouvres en-Plaine (21) Lieu-Dit "Les Gravières". Dossier 15-015.
- [23]Stilger-Szydo E, 2006. Rupture des remblais routiers causés par l'infiltration de l'eau. Revue Française de Géotechnique, N° 117, 4^e trimestre 2006 : 17-28.
- [24]UNPG, 2019a. Le réaménagement agricole des carrières. Exemples de restitution de sols agricoles. <http://www.unpg.fr/wp-content/uploads/unpg-reamenagement-agricole-2019.pdf> (consulté le 30/07/2020)
- [25]UNPG, 2019b. Trophées développement durable : Un concours européen décliné dans chaque pays. Communiqué de presse, juin 2019, <http://www.unpg.fr/wp-content/uploads/cp-unpg-concours-dd-2019-v2.pdf> (consulté le 30/07/2020)
- [26]UNPG, 2016. Le réaménagement agricole des carrières – Exemple de restitution de sol agricole. <https://www.unpg.fr/wp-content/uploads/le-reamenagement-agricole-des-carrieres.pdf>
- [27]UNPG, 2011. Guide pratique d'aménagement paysager des carrières. Avril 2011, 94 p. [http://www.bibliotheque-unpg.fr/bibli/BIODIVERSITE ET PAYSAGE/NP-A9-11-G.pdf](http://www.bibliotheque-unpg.fr/bibli/BIODIVERSITE_ET_PAYSAGE/NP-A9-11-G.pdf)
- [28]Varnes D. J., 1978. Slope movement type and processes. In: Special Report 176: Landslides: Analysis and Control (Eds: Schuster, R. L. & Krizek, R. J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, Washington D. C., 11-33.
- [29]Voeltzel D., Février Y. (ENCENM), 2010. Gestion et aménagement écologiques des carrières de roches massives. Guide pratique à l'usage des exploitants de carrières. ENCENM et CNC - UNPG, SFIC et UPC.

Annexes

Annexe A

Articles 12.3 et 12.4 de l'arrêté du 12 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 1 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 (1)	DESCRIPTION (1)	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

Tableaux d'une sélection de classes de sol issues du Guide des
Terrassements Routiers (SETRA, LCPC, 2000)

Classe A

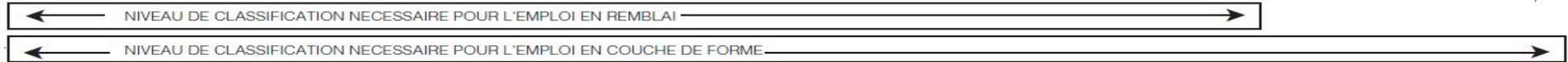
SOLS FINS

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 _{max} ≤ 50mn et tamisat à 80µm > 35 %	A sols fins	VBS ≤ 2,5 ou I _p ≤ 12	A ₁	Ces sols changent brutalement de consistance pour de faibles variations de teneur en eau, en particulier lorsque leur w _n est proche de w _{OPN} . 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'Ip.	<p>IPI ≤ 3 ou w_n ≥ 1,25 w_{OPN}</p> <p>3 < IPI ≤ 8 ou 1,10 w_{OPN} ≤ w_n < 1,25 w_{OPN}</p> <p>8 < IPI ≤ 25 ou 0,9 w_{OPN} ≤ w_n < 1,10 w_{OPN}</p> <p>0,7 w_{OPN} ≤ w_n < 0,9 w_{OPN}</p> <p>w_n < 0,7 w_{OPN}</p>	A ₁ th A ₁ h A ₁ m A ₁ s A ₁ ts		
			12 < I _p ≤ 25 ou 2,5 < VBS ≤ 6	A ₂	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'Ip atteint des valeurs ≥ 12, il constitue le critère d'identification le mieux adapté.	<p>IPI ≤ 2 ou Ic ≤ 0,9 ou w_n ≥ 1,3 w_{OPN}</p> <p>2 < IPI ≤ 5 ou 0,9 < Ic ≤ 1,05 ou 1,1 w_{OPN} ≤ w_n < 1,3 w_{OPN}</p> <p>5 < IPI ≤ 15 ou 1,05 < Ic ≤ 1,2 ou 0,9 w_{OPN} ≤ w_n < 1,1 w_{OPN}</p> <p>1,2 < Ic ≤ 1,4 ou 0,7 w_{OPN} ≤ w_n < 0,9 w_{OPN}</p> <p>Ic > 1,4 ou w_n < 0,7 w_{OPN}</p>	A ₂ th A ₂ h A ₂ m A ₂ s A ₂ ts	
				25 < I _p ≤ 40 ou 6 < VBS ≤ 8	A ₃	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.	<p>IPI ≤ 1 ou Ic ≤ 0,8 ou w_n ≥ 1,4 w_{OPN}</p> <p>1 < IPI ≤ 3 ou 0,8 < Ic ≤ 1 ou 1,2 w_{OPN} ≤ w_n < 1,4 w_{OPN}</p> <p>3 < IPI ≤ 10 ou 1 < Ic ≤ 1,15 ou 0,9 w_{OPN} ≤ w_n < 1,2 w_{OPN}</p> <p>1,15 < Ic ≤ 1,3 ou 0,7 w_{OPN} ≤ w_n < 0,9 w_{OPN}</p> <p>Ic > 1,3 ou w_n < 0,7 w_{OPN}</p>	A ₃ th A ₃ h A ₃ m A ₃ s A ₃ ts
					I _p > 40 ou VBS > 8	A ₄	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.	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique.

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

Classe B

SOLS SABLEUX ET GRAVELEUX AVEC FINES

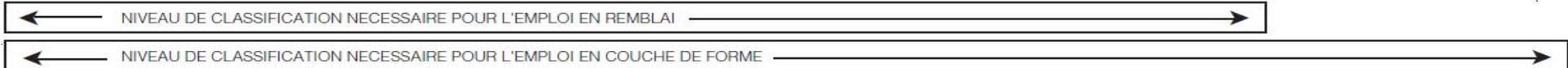


Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement					
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous-classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe			
D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 80 µm ≤ 35%	B Sols sableux et graveleux avec fines	- tamisat à 80 µm ≤ 12% - tamisat à 2 mm > 70% - 0,1 < VBS ≤ 0,2 ou ES > 35	B ₁ Sables silteux...	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 ₁₁			
								FS > 60	B ₁₂		
		- tamisat à 80 µm ≤ 12% - tamisat à 2 mm > 70% - VBS > 0,2 ou ES ≤ 35	B ₂ 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 _n ≥ 1,25 w _{OPN}	B ₂ th		FS ≤ 60	B ₂₁ th		
								FS > 60	B ₂₂ th		
								4 < IPI ≤ 8 ou 1,10 w _{OPN} ≤ w _n < 1,25 w _{OPN}	B ₂ h	FS ≤ 60	B ₂₁ h
								FS > 60	B ₂₂ h		
								0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,10 w _{OPN}	B ₂ m	FS ≤ 60	B ₂₁ m
								FS > 60	B ₂₂ m		
		0,5 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}	B ₂ s	FS ≤ 60	B ₂₁ s						
		FS > 60	B ₂₂ s								
w _n < 0,5 w _{OPN}	B ₂ ts	FS ≤ 60	B ₂₁ ts								
FS > 60	B ₂₂ ts										
- tamisat à 80 µm ≤ 12% - tamisat à 2 mm ≤ 70% - 0,1 < VBS ≤ 0,2 ou ES > 25	B ₃ 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 ₃₁				
						LA > 45 ou MDE > 45	B ₃₂				

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 _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 80 µm ≤ 35%	B Sols sableux et graveleux avec fines	- tamisat à 80 µm ≤ 12% - tamisat à 2 mm ≤ 70% - VBS > 0,2 ou ES ≤ 25	B ₄ Graves argileuses (peu argileuses)...	La plasticité de leurs fines rend ces sols sensibles à l'eau. Ils sont plus graveleux que les sols B ₂ 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).	$IPI \leq 7$ ou $w_n \geq 1,25 w_{OPN}$	B ₄ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 LA > 45 ou MDE > 45	B ₄₁ th B ₄₂ th
					$7 < IPI \leq 15$ ou $1,10 w_{OPN} \leq w_n < 1,25 w_{OPN}$	B ₄ h	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 LA > 45 ou MDE > 45	B ₄₁ h B ₄₂ h
					$0,9 w_{OPN} \leq w_n < 1,10 w_{OPN}$	B ₄ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 LA > 45 ou MDE > 45	B ₄₁ m B ₄₂ m
					$0,6 w_{OPN} \leq w_n < 0,9 w_{OPN}$	B ₄ s	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 LA > 45 ou MDE > 45	B ₄₁ s B ₄₂ s
					$w_n < 0,6 w_{OPN}$	B ₄ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 LA > 45 ou MDE > 45	B ₄₁ ts B ₄₂ ts
					$IPI \leq 5$ ou $w_n \geq 1,25 w_{OPN}$	B ₅ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 LA > 45 ou MDE > 45	B ₅₁ th B ₅₂ th
		- tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% - VBS ≤ 1,5 ou I _p ≤ 12	B ₅ 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 ₁ . Pour la même raison qu'indiquée à propos des sols A ₁ , il y a lieu de préférer le critère VBS au critère I _p , pour l'identification des sols B ₅ . 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).	$5 < IPI \leq 12$ ou $1,10 w_{OPN} \leq w_n < 1,25 w_{OPN}$	B ₅ h	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 LA > 45 ou MDE > 45	B ₅₁ h B ₅₂ h
					$12 < IPI \leq 30$ ou $0,9 w_{OPN} \leq w_n < 1,10 w_{OPN}$	B ₅ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 LA > 45 ou MDE > 45	B ₅₁ m B ₅₂ m
					$0,6 w_{OPN} \leq w_n < 0,9 w_{OPN}$	B ₅ s	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 LA > 45 ou MDE > 45	B ₅₁ s B ₅₂ s
					$w_n < 0,6 w_{OPN}$	B ₅ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45 LA > 45 ou MDE > 45	B ₅₁ ts B ₅₂ ts
					$IPI \leq 4$ ou $w_n \geq 1,3 w_{OPN}$ ou $Ic \leq 0,8$	B ₆ th		
					$4 < IPI \leq 10$ ou $0,8 < Ic \leq 1$ ou $1,1 w_{OPN} \leq w_n < 1,3 w_{OPN}$	B ₆ h		
		- tamisat à 80 µm compris entre 12 et 35% - VBS > 1,5 ou I _p > 12	B ₆ 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.	$10 < IPI \leq 25$ ou $1 < Ic \leq 1,2$ ou $0,9 w_{OPN} \leq w_n < 1,1 w_{OPN}$	B ₆ m		
					$0,7 w_{OPN} \leq w_n < 0,9 w_{OPN}$ ou $1,2 < Ic \leq 1,3$	B ₆ s		
					$w_n < 0,7 w_{OPN}$ ou $Ic > 1,3$	B ₆ 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_{max} > 50mm et tamisat à 80 µm > 12% ou si le tamisat à 80 µm ≤ 12% la VBS est > 0,1</p> <p>C</p> <p>Sols comportant des fines et des gros éléments</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>C₁A_i</p> <p>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.</p> <p>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_{max} du sol dépasse 200 mm. L'identification des sols de cette classe doit être précisée à l'aide d'un double symbole de type C₁(A_i) ou C₁(B_i), A_i ou B_i 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>C₁A₁ C₁A₂ C₁A₃ C₁A₄</td> <td>C₂A₁ C₂A₂ C₂A₃ C₂A₄</td> <td>état th, h, m, s ou ts</td> </tr> <tr> <td>C₁B₁₁ C₁B₁₂ C₁B₂₁ C₁B₂₂</td> <td>C₂B₁₁ C₂B₁₂ C₂B₂₁ C₂B₂₂</td> <td>Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique</td> </tr> <tr> <td>C₁B₂₁ C₁B₂₂ C₁B₃₁ C₁B₃₂ C₁B₄₁ C₁B₄₂ C₁B₅₁ C₁B₅₂ C₁B₆</td> <td>C₂B₂₁ C₂B₂₂ C₂B₃₁ C₂B₃₂ C₂B₄₁ C₂B₄₂ C₂B₅₁ C₂B₅₂ C₂B₆</td> <td>état th, h, m, s ou ts</td> </tr> </table>	C ₁ A ₁ C ₁ A ₂ C ₁ A ₃ C ₁ A ₄	C ₂ A ₁ C ₂ A ₂ C ₂ A ₃ C ₂ A ₄	état th, h, m, s ou ts	C ₁ B ₁₁ C ₁ B ₁₂ C ₁ B ₂₁ C ₁ B ₂₂	C ₂ B ₁₁ C ₂ B ₁₂ C ₂ B ₂₁ C ₂ B ₂₂	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique	C ₁ B ₂₁ C ₁ B ₂₂ C ₁ B ₃₁ C ₁ B ₃₂ C ₁ B ₄₁ C ₁ B ₄₂ C ₁ B ₅₁ C ₁ B ₅₂ C ₁ B ₆	C ₂ B ₂₁ C ₂ B ₂₂ C ₂ B ₃₁ C ₂ B ₃₂ C ₂ B ₄₁ C ₂ B ₄₂ C ₂ B ₅₁ C ₂ B ₅₂ C ₂ B ₆	état th, h, m, s ou ts
		C ₁ A ₁ C ₁ A ₂ C ₁ A ₃ C ₁ A ₄	C ₂ A ₁ C ₂ A ₂ C ₂ A ₃ C ₂ A ₄	état th, h, m, s ou ts										
		C ₁ B ₁₁ C ₁ B ₁₂ C ₁ B ₂₁ C ₁ B ₂₂	C ₂ B ₁₁ C ₂ B ₁₂ C ₂ B ₂₁ C ₂ B ₂₂	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique										
		C ₁ B ₂₁ C ₁ B ₂₂ C ₁ B ₃₁ C ₁ B ₃₂ C ₁ B ₄₁ C ₁ B ₄₂ C ₁ B ₅₁ C ₁ B ₅₂ C ₁ B ₆	C ₂ B ₂₁ C ₂ B ₂₂ C ₂ B ₃₁ C ₂ B ₃₂ C ₂ B ₄₁ C ₂ B ₄₂ C ₂ B ₅₁ C ₂ B ₅₂ C ₂ B ₆	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>C₁B_i</p> <p>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_{max} présent dans le sol.</p> <p>Ainsi, par exemple, un sol classé : C₁⁴⁰⁰(A₃) correspond à un sol roulé ou anguleux ayant plus de 60 à 80% d'éléments < 50 mm, dont les plus gros éléments ont une dimension de 400 mm et dont la fraction 0/50 mm est de type A₃.</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>C₂A_i</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>Il est néanmoins utile, comme pour les C₁, de préciser l'identification des sols de cette classe à l'aide d'un double symbole de type C₂(A_i) ou C₂(B_i), A_i ou B_i 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>C₂B_i</p> <p>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_{max} présent dans le sol (Cf. classe C₁).</p> <p>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 Sols insensibles à l'eau	D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm > 70%	D ₁	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 Angelès, LA, et/ou micro Deval en présence d'eau, MDE) ou friabilité des sables (FS).	FS ≤ 60	D ₁₁
			D ₂	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.		FS > 60	D ₁₂
		D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm ≤ 70%	D ₂	Graves alluvionnaires propres, sables...		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₂₁
			D ₂	Graves alluvionnaires propres, sables...		LA > 45 ou MDE > 45	D ₂₂
		D _{max} > 50 mm	D ₃	Graves alluvionnaires propres...		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₃₁
			D ₃	Graves alluvionnaires propres...		LA > 45 ou MDE > 45	D ₃₂

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>R₁ 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>	$pd > 1,7$	craie dense	R ₁₁	
			$1,5 < pd \leq 1,7$ et $w_n \geq 27$	craie de densité moyenne	R _{12h}	
			$1,5 < pd \leq 1,7$ et $22 \leq w_n < 27$		R _{12m}	
			$1,5 < pd \leq 1,7$ et $18 \leq w_n < 22$		R _{12s}	
			$1,5 < pd \leq 1,7$ et $w_n < 18$		R _{12ts}	
			$pd \leq 1,5$ et $w_n \geq 31$	craie peu dense	R _{13th}	
			$pd \leq 1,5$ et $26 \leq w_n < 31$		R _{13h}	
			$pd \leq 1,5$ et $21 \leq w_n < 26$		R _{13m}	
			$pd \leq 1,5$ et $16 \leq w_n < 21$		R _{13s}	
			$pd \leq 1,5$ et $w_n < 16$		R _{13ts}	
		R_2	<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 ₂₁
		Calcaires rocheux divers		MDE > 45 et $pd > 1,8$	calcaire de densité moyenne	R ₂₂
		Ex : - calcaires grossiers - travertins - tufs et encroûtements, etc...		$pd \leq 1,8$	calcaire fragmentable	R ₂₃

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>R₃ Marnes Schistes sédimentaires Argilites Pelites</p> <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 R₃₄) il convient de caractériser l'état de leur fraction 0/50 mm.</p>	FR ≤ 7 et DG > 20	Roche argileuse : peu fragmentable, très dégradable	R ₃₁
			FR ≤ 7 et 5 < DG ≤ 20	Roche argileuse peu fragmentable, moyen [†] dégradable	R ₃₂
			FR ≤ 7 et DG ≤ 5	Roche argileuse : peu fragmentable, peu dégradable	R ₃₃
			FR > 7 et $\begin{cases} w_n \geq 1,3 w_{OPN} \\ \text{ou } IPI < 2 \end{cases}$	Roche argileuse fragmentable	R ₃₄ th
			FR > 7 et $\begin{cases} 1,1 w_{OPN} \leq w_n < 1,3 w_{OPN} \\ \text{ou } 2 \leq IPI < 5 \end{cases}$		R ₃₄ h
			FR > 7 et 0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,1 w _{OPN}		R ₃₄ m
			FR > 7 et 0,7 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}		R ₃₄ s
			FR > 7 et w _n < 0,7 w _{OPN}		R ₃₄ ts
	Roches siliceuses	<p>R₄ Grès Poudingues Brèches</p> <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 R₃₄.</p>	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	Roches siliceuses dures	R ₄₁
			LA > 45 ou MDE > 45 et FR ≤ 7	Roches siliceuses de dureté moyenne	R ₄₂
FR > 7			Roches siliceuses fragmentables	R ₄₃	
Roches salines	<p>R₅ Gypse Sel gemme Anhydrite</p> <p>Du point de vue mécanique, les matériaux de cette classe s'apparentent à ceux des classes R₂ et R₃, 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).</p>	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 ₅₁	
		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 ₅₂	
			* suivant que la fragmentabilité est plus ou moins grande		

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>R_6</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 R_{61} et la majorité de ceux de la classe R_{62} 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 R_{63} ont un comportement voisin des classes R_{34} ou R_{42}.</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>F₁</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>	<p>3 ≤ % MO ≤ 10</p>	<p>F₁₁</p> <p>matériaux faiblement organiques : terres végétales, vases,...</p>
			<p>% MO > 10</p>	<p>F₁₂</p> <p>matériaux fortement organiques : humus forestier, tourbes,...</p>
<p>F₂</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 (60% < 80µm), relativement homogènes, 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 w_{OPN}. 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>	<p>IP_I ≤ 4 ou w_n ≥ 1,3 w_{OPN}</p>	<p>F_{2th}</p> <p>Cendres volantes très humides</p>
			<p>4 < IP_I ≤ 10 1,2 w_{OPN} ≤ w_n < 1,3 w_{OPN}</p>	<p>F_{2h}</p> <p>Cendres volantes humides</p>
			<p>0,85 w_{OPN} ≤ w_n < 1,2 w_{OPN}</p>	<p>F_{2m}</p> <p>Cendres volantes à teneur en eau moyenne</p>
			<p>0,75w_{OPN} ≤ w_n < 0,85w_{OPN}</p>	<p>F_{2s}</p> <p>Cendres volantes sèches</p>
			<p>w_n < 0,75 w_{OPN}</p>	<p>F_{2ts}</p> <p>Cendres volantes très sèches</p>
<p>F₃</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>F₃₁</p> <p>Schistes houillers totalement brûlés</p>
			<p>Ces schistes sont reconnaissables à leur couleur de noir à orange</p>	<p>F₃₂</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 ₄ 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 ₂ et B ₃ (éventuellement A ₁ et A ₂). 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 ₄₁ Schistes des mines de potasse à faible teneur en NaCl
			% NaCl > 10	F ₄₂ Schistes des mines de potasse à forte teneur en NaCl
F ₅ 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 ₅₀ , - la teneur en eau.	D ₅₀ > 80µm w _n ≥ 1,20 w _{OPN}	F _{51h} Phosphogypse grossier neutralisé à la chaux, à teneur en eau élevée
			D ₅₀ > 80µm w _n < 1,20 w _{OPN}	F _{51m} et s Phosphogypse grossier neutralisé à la chaux, à teneur en eau faible ou moyenne
			D ₅₀ ≤ 80µm	F ₅₂ Phosphogypse fin et phosphogypse grossier non neutralisé
F ₆ 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 ₁₃). 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 ₆₁ Mâchefers bien incinérés criblés, déferrillés, peu chargés en éléments toxiques solubles et stockés durant plusieurs mois
			F ₆₂ idem F ₆₁ mais de fraîche production	F ₆₂ Idem F ₆₁ mais de fraîche production
			PF > 5% Teneurs en éléments toxiques solubles supérieures aux valeurs maximales autorisées par la réglementation en vigueur.	F ₆₃ 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 ₇ 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 ₇₁ Matériaux de démolition, sans plâtre, épurés des éléments putrescibles, concassés, criblés, déferrailés, homogénéisés
			Evaluation visuelle	F ₇₂ Idem F ₇₁ , mais pouvant contenir du plâtre
			Evaluation visuelle	F ₇₃ Matériaux de démolition non épurés des éléments putrescibles ou non déferrailés et non criblés
F ₈ 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 ₉ 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.			

Annexe D

Exemples de réaménagement de sites avec enjeux de stabilité

Réaménagement en zone naturelle

Typologie : Carrière alluvionnaire

Lieu : Meurthe-et-Moselle

Enjeux de stabilité :

- Réalisation de travaux de terrassement à partir de déchets inertes pour créer des berges et des accès aux plans d'eau ;
- Plantations de plantes aquatiques et de roselières favorisant la stabilité et l'installation d'espèces faunistiques (Figure 1).



Figure 1 : Panneau informatif à l'entrée de la carrière réaménagée de Blénod-lès-Pont-à-Mousson (54)

Réaménagement en pelouse calcicole (GSM, 2006)

Typologie : Carrière de calcaire

Lieu : Eure-et-Loir

Enjeux de stabilité :

- Adoucissement des pentes et fronts de taille pour assurer une transition avec les terres environnantes ;
- Remblayage du carreau de la carrière par des déchets inertes ;
- Recouvrement par de la terre végétale pour réhabiliter le site en milieu naturel (pelouse calcicole pâturée, friche à panais et luzernières) (Figure 2).



Figure 2 : Réaménagement d'une pelouse calcicole à Prasville (28) (Source : GSM, 2006)

Réaménagement en espace agricole rentable (UNPG, 2019a)

Typologie : Carrière de calcaire

Lieu : Eure

Enjeux de stabilité :

- Remblayage de la fosse par une couche de déchets inertes ;
- Période de stabilisation ;
- Remblayage par une deuxième couche d'un mètre d'épaisseur de stériles de la carrière, permettant le raccordement du profil de la carrière à celui des terrains avoisinants ;
- Régalage de la terre végétale qui avait été stockée lors du décapage sur 0,3 à 0,5 m d'épaisseur (Figure 3) ;
- Mise en œuvre de culture céréalière à rendement équivalent que les parcelles voisines au bout de 3 ans.



Figure 3 : Deux stades de réaménagement agricole de la carrière d'Authavernes (27) (d'après UNPG, 2019a)

Renouvellement d'un verger grâce au réaménagement d'une carrière (UNPG, 2016)

Typologie : Carrière alluvionnaire

Lieu : Hautes-Alpes

Enjeux de stabilité :

- Remblayage par des déchets inertes de la carrière ;
- Régalage des terres végétales, préalablement décapées et stockées à la cote initiale du verger afin de permettre la remise en culture (Figure 4).



Figure 4 : Vue Google Map du verger et de l'exploitation

Annexe E

Tableau synthétique des missions d'ingénierie géotechnique, issu de la norme
NF P 94-500

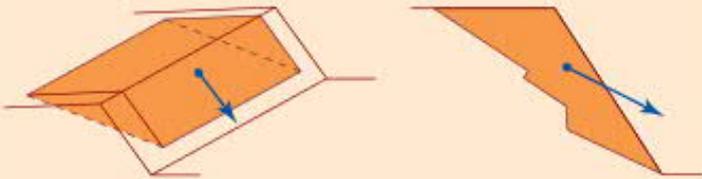
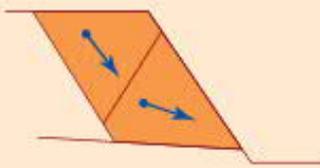
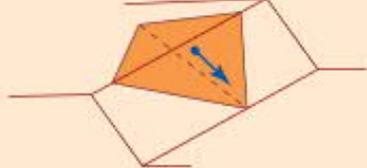
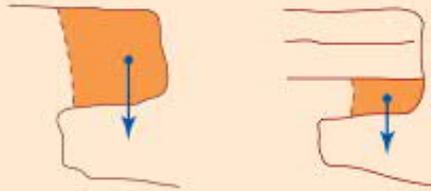
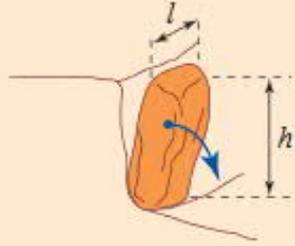
Norme NF P 94-500 (Novembre 2013) : tableaux synthétiques

Tableau 1 : Enchaînement des missions d'ingénierie géotechnique

Enchaînement des missions G1 à G4	Phases de la maîtrise d'œuvre	Mission d'ingénierie géotechnique (GN) et Phase de la mission		Objectifs à atteindre pour les ouvrages géotechniques	Niveau de management des risques géotechniques attendu	Prestations d'investigations géotechniques à réaliser
Étape 1 : Etude géotechnique préalable (G1)		Étude géotechnique préalable (G1) Phase Étude de Site (ES)		Spécificités géotechniques du site	Première identification des risques présentés par le site	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
	Étude préliminaire, esquisse, APS	Étude géotechnique préalable (G1) Phase Principes Généraux de Construction (PGC)		Première adaptation des futurs ouvrages aux spécificités du site	Première identification des risques pour les futurs ouvrages	Fonction des données existantes et de la complexité géotechnique
Étape 2 : Etude géotechnique de conception (G2)	APD/AVP	Étude géotechnique de conception (G2) Phase Avant-projet (AVP)		Définition et comparaison des solutions envisageables pour le projet	Mesures préventives pour la réduction des risques identifiés, mesures correctives pour les risques résiduels avec détection au plus tôt de leur survenance	Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	PRO	Étude géotechnique de conception (G2) Phase Projet (PRO)		Conception et justifications du projet		Fonction du site et de la complexité du projet (choix constructifs)
	DCE/ACT	Étude géotechnique de conception (G2) Phase DCE / ACT		Consultation sur le projet de base / Choix de l'entreprise et mise au point du contrat de travaux		
Étape 3 : Études géotechniques de réalisation (G3/G4)		À la charge de l'entreprise	À la charge du maître d'ouvrage			
	EXE/VISA	Étude et suivi géotechniques d'exécution (G3) Phase Étude (en interaction avec la phase Suivi)	Supervision géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision de l'étude géotechnique d'exécution (en interaction avec la phase Supervision du suivi)	Étude d'exécution conforme aux exigences du projet, avec maîtrise de la qualité, du délai et du coût	Identification des risques résiduels, mesures correctives, contrôle du management des risques résiduels (réalité des actions, vigilance, mémorisation, capitalisation des retours d'expérience)	Fonction des méthodes de construction et des adaptations proposées si des risques identifiés surviennent
	DET/AOR	Étude et suivi géotechniques d'exécution (G3) Phase Suivi (en interaction avec la phase Étude)	Supervision géotechnique d'exécution (G4) Phase Supervision du suivi géotechnique d'exécution (en interaction avec la phase Supervision de l'étude)	Exécution des travaux en toute sécurité et en conformité avec les attentes du maître d'ouvrage		Fonction du contexte géotechnique observé et du comportement de l'ouvrage et des avoisinants en cours de travaux
À toute étape d'un projet ou sur un ouvrage existant	Diagnostic	Diagnostic géotechnique (G5)		Influence d'un élément géotechnique spécifique sur le projet ou sur l'ouvrage existant		Influence de cet élément géotechnique sur les risques géotechniques identifiés

Annexe F

Typologie des instabilités rocheuses (LCPC, 2004)

Mécanisme d'instabilité	Configuration
Glissement plan (fig. 6a et 6b)	
Glissement plan composé	
Glissement de dièdre (fig. 6c et 6d)	
Rupture de surplomb ou de dalle en toit (fig. 6e et 6f)	
Rupture d'écaillage en paroi (fig. 6g)	
Basculement de bloc, de panneau ou colonne	 <p data-bbox="1157 1590 1332 1646">Colonne si $h/l > 2$ Écaille si $h/l < 2$</p>
Rupture de pied de colonne (fig. 6h)	

