

GUIDE DES TERRASSEMENTS DES REMBLAIS ET DES COUCHES DE FORME

FASCICULE N°1 Principes généraux



ÉDITION 2024

GUIDE DES TERRASSEMENTS DES REMBLAIS ET DES COUCHES DE FORME

FASCICULE N°1 Principes généraux

ÉDITION 2024



Ce guide technique, rédigé par l’Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité (IDRRIM), est édité par le Cerema, dans le cadre d’une convention partenariale.

L’IDRRIM (Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité) fédère l’ensemble des acteurs publics et privés agissant dans le domaine des infrastructures de mobilité et espaces urbains. Créé en 2010, l’Institut propose un cadre de réflexion et d’actions pour coproduire et partager un référentiel commun constitué de normes, de bonnes pratiques et règles de l’art, d’outils méthodologiques.

Lieu de convergences et d’échanges, l’Institut a pour objectif de répondre de manière homogène à des problématiques techniques ou stratégiques et de faire évoluer les patrimoines d’infrastructures et d’espaces publics vers une conception et une gestion durables ainsi qu’une plus grande optimisation de leur utilisation.

L’IDRRIM a pour missions de :

- fédérer et mobiliser les acteurs de la profession ;
- produire des documents de référence ;
- contribuer à l’amélioration des compétences ;
- promouvoir l’innovation et faire rayonner l’excellence française.



Institut des Routes, des Rues et des Infrastructures pour la Mobilité
9, rue de Berri - 75008 Paris
Téléphone: 33 (0)1 4413 3299 - Télécopie: 33 (0)1 4413 3298
Mél: idrrim@idrrim.com - Internet: www.idrrim.com

Collection « Les références »

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoir-faire...), dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

REMERCIEMENTS

Ce guide, œuvre collective de l'IDRRIM, a été piloté par Véronique Berche (Cerema puis Société du Canal Seine Nord Europe).

Rédacteurs :

- Pierre Azemard (Cerema) pilote du groupe rédactionnel « Roche »,
- Véronique Berche pilote général du groupe de travail,
- Kamel Bessafi (Roger Martin),
- Raphaël Bodet (UNICEM),
- Benoit Bolot (Colas),
- Yasmina Boussafir (Université Gustave Eiffel),
- Nicolas Buchart (Cerema),
- Maurice Bufalo (Spie batignolles valerian),
- Philippe Cavallazzio (Dynapac),
- Marianne Chahine (Cerema),
- Patrice Chardard (Eiffage),
- Emilie Cheriaux (SNCF),
- Richard Cleveland (Cisma),
- Didier Desmoulin (Colas),
- Nicolas Deutscher (Razel-Bec.Fayat),
- Jérémie Domas (CPTL),
- Marie Dubos (SNCF),
- Thierry Dubreucq (Université Gustave Eiffel),

Comment citer cet ouvrage :
IDRRIM. *Guide des terrassements des remblais et des couches de forme. Fascicule 1 - Principes généraux.*

Bron : Cerema, 2024.
Collection : Les références.
ISBN : 978-2-37180-678-8 (pdf)
978-2-37180-609-2 (papier)

- Samyr El-Bedoui (Cerema puis Eurovia) pilote du groupe rédactionnel « Matériaux alternatifs »,
- Valéry Ferber (Charier),
- Ombeline Forest (SNCF),
- Laurent Froehlich (Eurovia),
- Daniel Gandille (Groupe NGE),
- Laurent Germain (Eurovia),
- Sébastien Hervé (Cerema) pilote du groupe rédactionnel « Méthodologie »,
- Frédéric Hoeffel (AMMANN),
- Delphine Jacqueline (Cerema) pilote du groupe rédactionnel « Compacteur »,
- Marc Jaribi (Cerema),
- Martial Juery (Vicat),
- Michel Khatib (Groupe Ginger),
- Arnaud Lachal (CEMB),
- Thibaut Lambert (Cerema puis Département d'Ille et Vilaine) pilote du groupe rédactionnel « Sols »,
- Emmanuel Lavallee (Bouygues-Construction),
- Gaëlle Le-Bars (EGIS),
- Pascal Leconte (CPTL),
- Jean-Pierre Lejeune (Vinci-Construction-Terrassement),
- Olivier Malassingne (Cerema) pilote du groupe rédactionnel « Matériaux alternatifs »,
- Olivier Martin (Cerema),
- Ludovic Miard (Cerema puis Labo-exasol),
- Thierry Mollier (EGIS),
- Samir Nasri (Cerema puis DIR CE),
- Laetitia Nerot (Groupe Ginger),
- Eric Oppenheim (Groupe Ginger),
- Jerome Poletti (Eurovia),
- Mathieu Préteseille (Cerema) pilote du groupe rédactionnel « Partie supérieure de terrassement/Arase de terrassement »,
- Christophe Priez (Colas) pilote du groupe rédactionnel « Compacteur »,
- Arnaud Rizenthaler (Colas),
- Pierre Rossi (Razel-bec.fayat),
- Jean-Pierre Sanfratello (Colas),
- Lucile Saussaye (Cerema),
- Shahinaz Sayagh (CPTL),
- Emmanuel Truchet (Vinci-Construction-Terrassement),
- Jérôme Varillon (Vinci-Construction-Terrassement),
- Franck Vedrines (BOMAG),
- Olivier Waterblez (Eurovia).

Selecteurs :

Les membres du comité opérationnel gestion de patrimoine d'infrastructures de l'IDRRIM présidé par Pascal Rossigny (Cerema).

CRÉDIT PHOTO

Couverture : Vinci-Construction-Terrassement

Sommaire

Remerciements	4
----------------------	----------

CHAPITRE 1

Présentation - Règles générales d'application	9
--	----------

1.1 - Les évolutions du GTR	10
1.2 - L'application des normes NF EN 16907	10
1.3 - Organisation du document	10
1.4 - La démarche du GTR dans la conception des terrassements	11
1.5 - Domaines d'application du GTR	13
1.6 - Définitions des zones de remblai	14
1.7 - Points particuliers	18

CHAPITRE 2

Classification des matériaux utilisés pour la construction des remblais et des couches de forme	23
--	-----------

2.1 - Nécessité d'une classification spécifique	24
2.2 - Classification des sols	24
2.3 - Classification des matériaux rocheux	35
2.4 - Classification des sols organiques (O), des matériaux naturels particuliers (AN) des sous-produits industriels et des matériaux recyclés (classes AM, AR)	40
2.5 - Synoptique de classification des matériaux selon leur nature	44

CHAPITRE 3

Conditions d'utilisation des matériaux en remblai	49
--	-----------

3.1 - Principes retenus	50
3.2 - Présentation des tableaux des conditions d'utilisation des matériaux en remblai	50
3.3 - Commentaires sur les conditions d'utilisation présentées dans les tableaux	51
3.4 - Tableau récapitulatif des conditions pouvant être imposées pour utiliser les différents matériaux en remblai	56
3.5 - Exemple de tableau des conditions d'utilisation des matériaux en remblai	57

CHAPITRE 4	
Conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme	59
4.1 - Conception de la couche de forme	60
4.2 - Matériaux de couche de forme	63
4.3 - Dimensionnement de la couche de forme	72
CHAPITRE 5	
Compactage des remblais et des couches de forme	83
5.1 - Prescriptions pour le compactage	84
5.2 - Données relatives aux matériaux	85
5.3 - Données relatives aux compacteurs	85
5.4 - Règles de compactage	91
5.5 - L'évolution des matériels de compactage : nouvelles caractéristiques et nouveaux moyens d'auscultation	95
Abréviations	101
Annexes	105
Annexe 1 - Liste des symboles utilisés	106
Annexe 2 - Lien entre classification GTR 2000 et norme européenne (classification des sols)	107
Bibliographie	108

CHAPITRE 1

Présentation - Règles générales d'application

PRÉSENTATION

RÈGLES GÉNÉRALES D'APPLICATION

1.1 - LES ÉVOLUTIONS DU GTR

Le guide des terrassements des remblais et des couches de forme, édition 2023 couramment appelé GTR 2023 constitue une révision de la version GTR de 1992 revue en 2000. Il accompagne l'application de la série de normes européennes « Terrassements », NF EN 16907¹, tant sur les aspects méthodologiques qu'opérationnels. Il intègre également les compléments issus des notes d'informations et des recommandations publiées depuis 2000, tels que l'introduction d'une nouvelle classe de plateforme PF2qs, les modalités de conception et de réalisation des planches d'essais, et les méthodologies de mesure de la portance des plateformes.

Les principaux changements apportés concernent les points suivants :

- la mise à jour de la classification des sols, roches et matériaux alternatifs, selon la norme NF EN 16907-2;
- le dimensionnement des couches de forme granulaires et traitées visant l'obtention de plateformes PF2qs;
- des éléments complémentaires d'appréciation des cas de partie supérieure de terrassement (« PST ») et des classes d'arase;
- la prise en compte des classifications au gel des matériaux pour couche de forme;
- la prise en compte de nouvelles technologies des compacteurs;
- la mise à jour des recommandations d'utilisation des matériaux alternatifs;
- la révision des tableaux du fascicule 2 en cohérence avec la nouvelle classification des matériaux.

1.2 - L'APPLICATION DES NORMES NF EN 16907

Les règles et procédures développées dans la série des normes NF EN 16907 « Terrassements » sont soit des principes généraux, soit des règles fondées sur l'expérience, qui peuvent différer suivant les matériaux et les climats et qui résultent de pratiques locales ou nationales. L'existence de pratiques nationales ou de procédures bien établies et acceptées qui complètent les normes NF EN 16907 par des règles non conflictuelles avec elles est autorisée.

Le GTR propose une démarche de conception, d'exécution et de contrôle des terrassements conforme aux règles des normes NF EN 16907 dans la réalisation des remblais et des couches de forme. Il intègre ainsi la classification de la NF EN 16907-2 tout en reprenant les spécificités de la pratique française, telles que la définition des états hydriques, les recommandations de réemploi par classe de sol et par usage, et les tables de compactage associées.

1.3 - ORGANISATION DU DOCUMENT

Le présent document est organisé en deux fascicules : un texte de présentation et un recueil d'annexes.

Le fascicule 1 intitulé « Principes généraux » présente, commente et justifie les principes sur lesquels repose l'ensemble du document. **Sa connaissance est nécessaire à la compréhension de la démarche d'ensemble.** Il s'articule autour de quatre chapitres : classification, conditions d'utilisation en remblai, conditions d'utilisation en couche de forme et prescriptions de compactage.

1. Un fascicule de documentation FD P 11-304 a été publié par l'AFNOR pour présenter le contenu des six premières normes de cette série.

Le fascicule 2 est constitué d'une série de quatre annexes :

- les tableaux de la classification des sols, des roches et des matériaux alternatifs ;
- les tableaux des conditions d'utilisation des matériaux en remblai ;
- les tableaux des conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme ;
- les modalités de compactage des remblais et des couches de forme.

C'est précisément dans ces annexes que les responsables de projets de terrassement, chacun à leur niveau, trouveront les éléments techniques utiles à la définition des études de reconnaissance géotechnique, à l'établissement du projet, à l'exécution et au contrôle de la mise en œuvre.

1.4 - LA DÉMARCHE DU GTR DANS LA CONCEPTION DES TERRASSEMENTS

La conception géotechnique d'un ouvrage en terre en termes de stabilité et de déformation ne relève pas du GTR, mais d'études géotechniques adaptées à chaque phase du projet suivant un principe de progressivité (selon la norme NF P94-500), de normes et de règles spécifiques (Eurocode 7 ou toute autre norme applicable; un projet de norme « prNF P94-290 - Dimensionnement des ouvrages en terre » est notamment en cours de rédaction). Ces travaux s'articulent avec d'autres études liées aux ouvrages en interaction avec les terrassements et la gestion de l'eau.

La démarche de conception développée dans le GTR concerne essentiellement le dimensionnement des plateformes des ouvrages en terre (PST et couche de forme).

1.4.1 - CONCEPTION DES TERRASSEMENTS SELON LES NORMES NF EN 16907

Selon les normes NF EN 16907, la conception des terrassements définit le processus qui permet de transformer un terrain naturel en place (sol ou roche) et/ou des sous-produits ou matériaux recyclés pour créer un ouvrage en terre (déblai ou remblai) répondant aux spécifications de la conception géotechnique.

Ce processus inclut la caractérisation des sols, roches ou matériaux alternatifs susceptibles d'être utilisés, et le choix de règles et d'équipements adaptés permettant d'organiser l'excavation, le transport, la mise en œuvre, le compactage et le contrôle des matériaux. Ainsi, la démarche développée dans le GTR propose les étapes suivantes :

- l'établissement d'une classification spécifique des matériaux présentant un comportement suffisamment proche pour qu'il soit justifié de leur appliquer les mêmes modalités de mise en œuvre ;
- l'énoncé de modalité de mise en œuvre propre à chaque classe de matériau, suivant l'utilisation envisagée et les conditions du chantier (météorologie, état hydrique des matériaux, etc.) ;
- la définition des modalités pratiques d'exécution du compactage applicables aux remblais et aux couches de forme.

L'application des règles de compactage du GTR permet d'organiser les contrôles selon une démarche dite de « spécification de la méthode » conformément à la définition des normes NF EN 16907-1 et NF EN 16907-5 avec le contrôle des Q/S. Selon l'objectif de compactage recherché, le respect des consignes et des contrôles associés au compactage permet de garantir la bonne réalisation des ouvrages en terre. Le couplage du compactage et de la connaissance des matériaux permet également d'optimiser le dimensionnement mécanique (en portance) de la plateforme.

Figure 1: Spécification de la méthode et du produit fini

Les règles de compactage qui sont proposées découlent de nombreuses planches d'essais en situation contrôlés, de retours d'expériences avec mesures *in situ*, et de travaux de recherche.

Cette démarche de contrôle se différencie de celle dite de « spécification du produit fini » ; elle exige des terrassements qu'ils soient définis en répondant à des critères d'ingénierie spécifiés en tant qu'objectifs à atteindre.

Quelle que soit la qualité de la démarche, il peut subsister un certain niveau d'incertitude qui se traduit par des risques géotechniques. Ces incertitudes doivent être réduites dans le cadre d'une démarche d'analyse des risques et par la réalisation d'études géotechniques progressives et itératives.

1.4.2 - OPTIMISATION DES PROJETS DE TERRASSEMENT

L'optimisation concerne le mouvement des terres, les ressources externes, les contraintes environnementales et l'impact des conditions météorologiques sur les travaux envisagés.

Le processus d'optimisation doit aussi tenir compte de la faisabilité des travaux et de l'utilisation des matériels pour les réaliser, notamment vis-à-vis des conditions météorologiques. Le GTR apporte des informations qui permettent d'alimenter cette réflexion.

L'optimisation du mouvement des terres vise à :

- valoriser et réutiliser les matériaux du site;
- réduire au maximum l'empreinte environnementale en favorisant l'utilisation et le recyclage de matériaux alternatifs;
- réduire les distances de transport;
- équilibrer le mouvement des terres pour réduire la production d'excédents de chantier et les apports en matériaux extérieurs à l'emprise.

Ce processus nécessite notamment :

- la caractérisation précise des matériaux du site et la classification des ressources par rapport aux besoins du projet;
- l'analyse des solutions techniques et économiques possibles et de leur impact sur les structures à construire (couches de forme et chaussées, voies ferrées, fondations de bâtiment, etc.) en termes de comportement mécanique, d'entretien et de durabilité;
- la détermination des traitements appropriés pour leur réemploi;
- la prise en compte des exigences techniques du terrassement et des processus d'assurance qualité applicables au projet;
- l'évaluation des risques géotechniques.

1.5 - DOMAINES D'APPLICATION DU GTR

Le GTR est issu de l'expérience en conception et en réalisation des terrassements de nombreuses infrastructures routières françaises réalisées depuis les années cinquante. Il s'appuie sur des règles de bonnes pratiques largement partagées par les entreprises, les bureaux d'études, les organismes de contrôles, les maîtres d'œuvre et les maîtres d'ouvrage privés ou publics.

Depuis sa première publication en 1992, le GTR a vu s'élargir progressivement son domaine d'application, initialement routier, à d'autres domaines d'aménagement : ferroviaire, aéroportuaire, canaux, aménagements de plateformes de bâtiments, zones industrielles et plateformes logistiques, ouvrages en terre de protection contre les eaux, etc.

Il est applicable à tous les projets de terrassement, en tenant compte de l'existence de règles spécifiques pour certains des domaines concernés.

Deux aspects essentiels précisent les limites d'application du GTR :

- le premier est que les conditions d'utilisation proposées en remblai et en couche de forme doivent essentiellement être considérées comme des règles de référence ou de recommandations à partir desquelles le géotechnicien doit apprécier les adaptations qu'il peut accepter selon les particularités de son chantier. Dans le GTR, seuls les paramètres techniques les plus importants (caractéristiques géotechniques des matériaux, situation météorologique, techniques d'exécution courantes, etc.) ont été considérés ;
- le second aspect important du document est qu'il n'apporte de réponses que sur les questions relatives aux modalités d'utilisation des matériaux en remblai et en couche de forme. De ce fait, il ne doit pas être assimilé à un guide complet de conception et de réalisation de ces natures d'ouvrages. De nombreux autres points doivent en parallèle être précisés comme, par exemple, le mouvement des terres dans son ensemble, les pentes de talus, le zonage éventuel des ouvrages en terre, les principes régissant l'implantation, le dimensionnement et le contrôle de fonctionnement des ouvrages de drainage, les dispositions particulières assurant la stabilité des talus en matériaux évolutifs ou sensibles à l'eau, les précautions de construction à adopter sur les sols compressibles, etc.

Les recommandations du GTR s'appliquent au compactage des remblais courants de hauteur inférieure à 15 m par opposition aux remblais de conception spécialisée. Elles visent à assurer leur stabilité interne, notamment en termes de tassements sous leur poids propre et les charges courantes. Pour des usages particuliers, tels que remblais de grande hauteur, remblais contigus, couche étanche, remblai en assise de fondations..., les recommandations du GTR doivent être complétées en se référant aux normes, guides, notes ou recommandations correspondant à ces ouvrages particuliers.

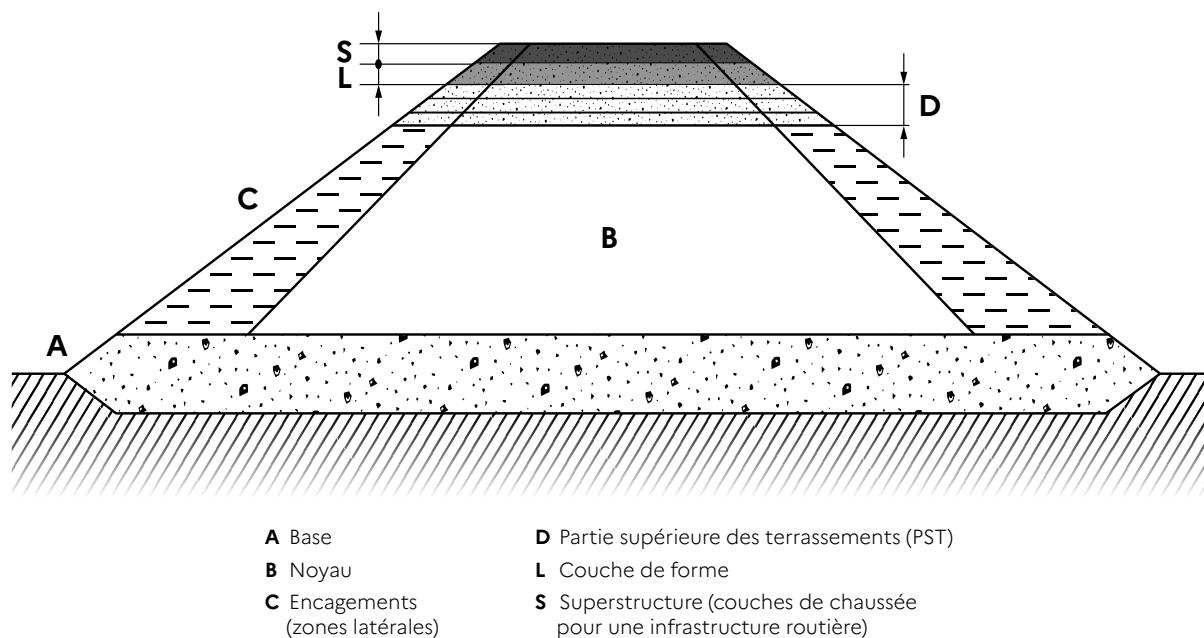
1.6 - DÉFINITIONS DES ZONES DE REMBLAI

Un remblai peut être homogène ou divisé en zones différentes.

La norme NF EN 16907-1 distingue six parties d'ouvrage ayant des fonctions distinctes suivant leur position dans la structure et les spécifications attendues à l'issue de la conception.

La figure 2 présente ces différentes zones, mais la majorité des cas de remblai n'impose pas de réaliser des zonages spécifiques et le remblai sera alors dit « homogène ».

Figure 2: Coupe en travers type d'un remblai courant d'infrastructure



En pratique, dans la majorité des remblais, les zones B et C, voire A, sont indifférencierées.

Le tableau 1 page suivante présente, pour ces différentes zones, les modalités d'utilisation applicables suivant les recommandations d'usage de type « remblai » correspondant à un objectif de densification q4 (95 % de l'optimum proctor OPN en moyenne et 92 % de l'OPN au minimum en fond de couche) ou « couche de forme » correspondant à un objectif de densification q3 (98,5 % de l'OPN en moyenne et 96 % de l'OPN au minimum en fond de couche).

Remarque: d'autres définitions et spécifications figurent dans les différentes parties des normes NF EN 16907.

Tableau 1: Modalités d'utilisation

Zones issues de NF EN 16907-1 pour les remblais d'infrastructures	Description	Fonction	Conditions de compactage « q4 »	Conditions de compactage « q3 »	Commentaires Conditions spécifiques	Référentiel technique associé
A - Base	Zone du remblai en contact direct avec le terrain existant. Cette zone peut être divisée en couches, par exemple une couche drainante, une plateforme de travail, une couche de protection imperméable. Elle peut inclure une substitution du terrain existant jusqu'à une certaine profondeur, son amélioration par traitement à la chaux et/ou aux liants, ou la mise en place de géosynthétique. Elle peut jouer un rôle en cas d'amélioration du sol-support de remblai.	Base de remblai sans fonction particulière			Pour tout remblai de $H < 15$ m, l'objectif q4 est en principe suffisant. Pour des remblais de grande hauteur ou des problèmes spécifiques, la conception géotechnique peut nécessiter des énergies de compactage plus élevées (q3).	[9]
		Plateforme de travail			Compactage q4 ou q3 suivant les contraintes de portance, de trafic ou de charge de travail envisagées.	
		Protection imperméable			Conditions de matériaux, d'épaisseur et de perméabilité à définir, suivant le type de protection envisagée. L'obtention d'une faible perméabilité peut nécessiter des conditions de mise en œuvre spécifiques.	[3]
		Couche de purge ou de substitution, bêche			Performances à définir suivant usage.	[9]
		Matelas de répartition/de transfert			Ces structures techniques existent dans les bases de remblai sur les sols renforcés ou améliorés	
		Base drainante			Matériaux granulaires ouverts de type 0/D ou d/D, en général non associés à des objectifs de densification, mais plutôt à des conditions de perméabilité et d'épaisseur.	

B - Noyau	Zone de remblai située entre la base du remblai et sa zone supérieure (lorsque la hauteur du remblai d'infrastructure est suffisante). Le noyau peut être protégé contre l'eau ou isolé pour éviter les risques de lixiviation, de gonflement, de dégradation.	Noyau sans fonction particulière			q4 dans le cas général. Des conditions particulières peuvent s'appliquer pour des remblais de grande hauteur ($H > 15$ m) ou relevant d'une conception ou d'un usage spécifique.	[6]
		Noyau à protéger			Conditions spécifiques de protection vis-à-vis du risque d'arrivée d'eau ou d'évolution du matériau à définir suivant les projets.	[9] - [10]
		Couche imperméable			Compactage q4 ou éventuellement q3 suivant les prescriptions spécifiques de l'ouvrage et la perméabilité recherchée.	[3]
C - Engagements (bord de remblai)	Zones latérales des remblais, qui peuvent avoir des fonctions variées, par exemple permettre des talus plus raides, protéger le noyau, servir de filtres, protéger contre l'érosion, mobiliser une butée, voire assurer une protection contre les effets de l'environnement (changeement climatique, animaux fouisseurs, etc.).	Bords de remblai sans fonction particulière			Une vigilance particulière doit être accordée au compactage des bords de remblai (méthode excédentaire, plateforme en W).	[9]
		Talus raidi			Matériaux spécifiques frottants ou stabilisés par traitement. Un compactage q3 peut s'avérer nécessaire en fonction des performances visées, notamment en termes de durabilité.	[5] - [6]
		Épaulement			Partie de remblai utilisée pour mobiliser une butée latérale et améliorer la stabilité générale.	[5] - [6]
		Protection du noyau, encagement			Conditions de protection à mettre en place (matériau, traitement, compactage...) à définir suivant le type de noyau, vis-à-vis de la sensibilité à l'eau, du risque de migration de fines, de polluants etc. Conditions spécifiques suivant le type de protection recherché : érosion, matériaux argileux sensibles au retrait - gonflement.	[5]-[6]-[9]-[11]
		Zone de filtre			Conditions sur les règles de filtre à appliquer en fonction du matériau à contenir (exemple : digues et barrages).	[7] - [8] - [9]
		Protection de talus			Conditions spécifiques suivant le type de protection recherché : érosion, migration de fines, matériaux argileux sensibles au retrait - gonflement.	[5]-[6]-[9]-[11]

D - Zone supérieure	Zone située entre le noyau et la couche de forme et la superstructure (chaussée, voie ferrée). Cette zone peut comprendre différentes couches telles que la « partie supérieure des terrassements » et une « couche de transition » pour séparer un matériau de remblai rocheux des couches granulaires sus-jacentes, une couche imperméable, ou toute autre couche caractérisée par une fonction particulière. Elle n'inclut pas les couches de superstructure.	Partie Supérieure des Terrassements			L'objectif q4 est suffisant si une couche de forme est prévue. Les consignes de compactage de la PST s'appliquent également en déblai, sur une épaisseur de l'ordre de 30 à 50 cm, en général.	[5] - [6]
		Couche de forme			Application normale du GTR.	[5] - [6]
		Couche de transition/réglage			Spécifications dépendant de la partie d'ouvrage concernée (PST ou couche de forme).	
Remblai technique	Remblai spécifique à un ouvrage ou une partie d'ouvrage, nécessitant des matériaux et des conditions de mise en œuvre pour satisfaire aux objectifs de conception recherchés. Ex. : remblais supports de fondations, remblais contigus aux ouvrages d'art, bloc technique ferroviaire	remblai technique.			Matériaux et conception spécifiques. Les conditions de compactage doivent être définies par la conception.	[1] - [2]
Remblai renforcé	Remblai intégrant une série de renfortements horizontaux, intercalés entre les couches successives du remblai : terre armée, ouvrage en terre renforcé par géosynthétiques, etc.	Remblai renforcé			Spécifications particulières issues de la conception du remblai renforcé à réaliser.	[4]

Recommandé dans le cas général. S'applique suivant les conditions spécifiques définies par la conception. Non recommandé.

Références bibliographiques:

- [1] Note d'information « Construire des remblais contigus aux ouvrages d'art » (Sétra, 2012).
- [2] Guide Remblaiement de tranchées (LCPC/SETRA, 1994).
- [3] Fascicule documentaire FD P 11-302 « Exécution des terrassements - Réalisation des ouvrages d'étanchéité en sol compacté »
- [4] Norme NF EN 14475 « Exécution de travaux géotechniques spéciaux - Remblais renforcés »
- [5] Guide technique Traitement des sols à la chaux et aux liants hydrauliques (LCPC/SETRA, 2000).
- [6] Norme NF EN 16907-4 « Terrassement - Partie 4: traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques ».
- [7] Norme NF G 38-061 « Utilisation des géotextiles et produits apparentés - Systèmes de drainage et de filtration - Dimensionnement et éléments de conception » et guides CFG Drainage filtration.
- [8] Guide Drainage routier (Sétra, 2006).
- [9] Guide technique Conception et réalisation des terrassements (Sétra, 2007).
- [10] Guides d'acceptabilité environnementale.
- [11] Guide CFG Protection contre l'érosion en talus.

1.7 - POINTS PARTICULIERS

1.7.1 - OBJECTIFS DU COMPACTAGE

Dans le projet de terrassement, on peut distinguer plusieurs tâches. Celle liée à la réalisation des ouvrages en terre de type remblai comporte une phase essentielle qui est le compactage des matériaux. Cette opération permet de réduire le volume des vides dans les matériaux utilisés, en particulier ceux générés au cours du processus d'extraction (foisonnement). En compactant ainsi, on augmente la masse volumique sèche et la résistance au cisaillement du matériau.

L'efficacité du compactage dépend :

- de la nature des matériaux : certains sont plus frottants et plus résistants par nature aux efforts de compactage ;
- de l'état hydrique des matériaux : l'absence d'eau rend les matériaux très résistants aux efforts de compactage et peut donner une fausse impression de bonne performance ; un matériau trop humide nécessite des énergies de compactage plus faibles au risque de mettre l'eau en pression dans le matériau ; la teneur en eau de l'optimum Proctor est celle qui permet le plus facilement la mise en place du matériau pour un résultat optimal ;
- du type de compacteurs et du mode d'action : par vibration, par pétrissage ou par compactage statique.

Par expérience et sous nos climats actuels, l'objectif par compactage permettant d'assurer la stabilité d'un remblai courant sous son poids propre est de rechercher une masse volumique sèche des sols supérieure à 95 % de l'optimum défini par l'essai Proctor normal. Ces éléments seront détaillés à la fin de ce fascicule 1 au chapitre « Compactage ».

Les tableaux qui figurent dans le fascicule 2, associés à la classification des matériaux, proposent des règles de compactage assurant cet objectif.

1.7.2 - HAUTEUR DES REMBLAIS

Les recommandations du GTR en termes de compactage s'appliquent aux remblais de hauteur inférieure à 15 m. En effet, l'utilisation des matériaux, classés selon le GTR 2023 en remblai, est définie en fonction de la hauteur des remblais. Cette hauteur a été quantifiée sur la base d'un objectif de densification q4.

Ces recommandations en termes de compactage visent à assurer leur stabilité interne, c'est-à-dire permet, pour la grande majorité des projets, de garantir l'absence de flUAGE et/ou de tassements des remblais sous leur poids propre et les charges courantes. Pour des usages particuliers, tels que les remblais de grande hauteur, ces recommandations doivent faire l'objet de spécifications et de règles quelquefois plus contraignantes.

Au-delà de 15 m, les règles de compactage doivent être définies par une étude spécifique.

Cas des remblais de hauteur supérieure à 15 m

Dans un remblai de grande hauteur, le tassement est d'autant plus important que l'énergie de compactage est faible par rapport à la charge statique des couches sus-jacentes. Les sols rencontrés peuvent être réutilisés s'ils ne sont pas trop 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 (par exemple, le rocher sain).

Pour s'accommoder des matériaux hétérogènes effectivement disponibles, il faut en optimiser et en maîtriser l'emploi par une affectation choisie par zone.

Ce zonage consiste à affecter les matériaux disponibles dans les différentes parties du remblai (les talus, le noyau, la base et la PST), de telle sorte que chaque partie d'ouvrage ait ensuite les qualités nécessaires pour s'accommoder des sollicitations qu'elle reçoit, ainsi que des circulations d'eau prévisibles.

Pour les grands remblais, la prévision du comportement mécanique des sols au cours du temps est mal appréhendée par les essais d'identification préconisés par ce présent guide, quand ces matériaux sont plus ou moins argileux et *a fortiori* lorsqu'ils sont extraits en blocs au déblai (cas des argilites, des marnes rocheuses, etc.). Il est alors souvent intéressant de réaliser des essais spécifiques sur ces matériaux tels que des essais triaxiaux, des essais œdométriques et des essais de perméabilité pour mieux cerner leur comportement dans le temps, lorsque les sols disponibles s'y prêtent. Pour certains matériaux particuliers (argiles plastiques, surconsolidées ou indurées, etc.), ces essais deviennent indispensables : ils montrent, en particulier, que les pentes courantes des talus de remblai peuvent être incompatibles avec leur tenue dans le temps, dès qu'il y a risque de saturation. Pour les matériaux non compatibles avec l'essai Proctor, tels que les marnes, les calcaires tendres, les craies, etc., seuls des essais en vraie grandeur permettent de définir les conditions de mise en œuvre : la teneur en eau optimale de compactage, fragmentation, taux de compactage, etc.

1.7.3 - AUTRES ASPECTS À PRENDRE EN COMPTE AU NIVEAU DU COMPORTEMENT DES SOLS ET DES ROCHES

Il est parfois nécessaire, pour s'assurer que le sol considéré ne contient pas d'éléments ou de minéraux pouvant influer sur le comportement et donc sur les conditions d'utilisation en remblais et/ou en couche de forme, de réaliser d'autres essais que ceux utilisés pour la classification.

Ces aspects dépassent le cadre du présent document car ils entrent dans le domaine de la conception géotechnique. Ils sont rappelés ici à titre informatif.

1.7.3.1 - Retrait - gonflement

La sensibilité des matériaux au retrait - gonflement n'est pas un critère de classification des sols au sens du GTR 2023.

Le retrait correspond à une diminution du volume du sol par départ d'eau pouvant provoquer une fissuration superficielle des plateformes et/ou talus (photographie 1). Le gonflement correspond à une augmentation de volume par apport d'eau pouvant provoquer une pression supplémentaire et des déformations.

Photographie 1: Exemple de phénomène de retrait avec apparition d'une fissure longitudinale
(Source : Observatoire des Routes Sinistrées par la Sécheresse pour optimiser les réparations (ORSS))



Avec le changement climatique et le renforcement des situations extrêmes, il est vraisemblable que la plage hydrique actuelle des sols s'élargisse et que l'amplitude et la fréquence des déformations liées à ce phénomène augmentent, entraînant une aggravation des désordres.

De manière générale, la sensibilité d'un sol au retrait - gonflement dépend de:

- sa nature minéralogique;
- sa teneur en eau (à la mise en œuvre et après exposition aux variations météorologiques);
- sa compacité;
- son traitement éventuel;
- l'environnement de l'ouvrage.

Ainsi, certains matériaux, notamment les argiles, les limons et les marnes peuvent contenir des minéraux ou des espèces minérales présentant des risques de retrait - gonflement qui interviennent sur le comportement du matériau soit en l'état, soit même après traitement.

Les conditions de réemploi de ces matériaux restent définies dans les tableaux du fascicule 2.

Toutefois, le risque de retrait - gonflement doit être étudié dans la conception géotechnique pour définir les dispositions constructives adaptées aux conditions d'environnement (principalement hydrauliques), à la géométrie et à la stabilité des ouvrages en terre.

La protection des ouvrages contre les effets du gonflement et le retrait des sols s'appuie sur deux stratégies principales:

- maîtriser les variations de volume du sol:
 - maintenir constante la teneur en eau du sol existant,
 - modifier le sol (traitement) ou le remplacer ; limiter ou supprimer les effets du gonflement ou du retrait;
- modifier la rigidité et la résistance de la structure,
 - maîtriser la teneur en eau de mise en œuvre et les conditions de compactage associées,
 - adapter la conception de l'ouvrage (géométrie, assainissement, végétation, environnement).

Nota : des essais mécaniques permettent de caractériser le risque de retrait - gonflement (voir guide technique IFSTTAR de juillet 2017 « Retrait et gonflement des argiles - Caractériser un site pour la construction - Guide 1).

1.7.3.2 - Aptitude au traitement

Certaines espèces minérales (pyrite, serpentine, smectite, sulfate, etc.) ou la présence de matières organiques peuvent conduire, même après traitement, à des comportements particuliers de type gonflement et/ou perturbation de la prise.

Dans les tableaux de réemploi des sols en remblai ou en couche de forme, il est noté dans certains cas « réemploi possible après traitement ». Pour viser cet objectif, **il est impératif de s'assurer que le matériau considéré réagit bien au traitement**. Pour ce faire, il convient de réaliser des essais d'aptitude au traitement (NF P94-100). Si l'aptitude du sol au traitement est confirmée, il faudra réaliser une étude conforme aux prescriptions du GTS2000 et définir les conditions de réemploi de ce matériau.

1.7.3.3 - Prise en compte de la météorologie

La connaissance d'un bilan hydrique « précipitation-évaporation » annuel à partir des données statistiques de la Météorologie nationale permettra de préciser les périodes de l'année les plus propices à l'exécution des travaux de traitement (ou d'évaluer les surcoûts si ces périodes ne peuvent être respectées et notamment dans le cas des traitements de sols).

Il est recommandé de s'appuyer pour cela sur le guide Météorologie et terrassements.

1.7.4 - SITUATIONS DE TERRASSEMENTS PARTICULIÈRES

1.7.4.1 - Matériaux contenant de l'amiante

Le repérage avant travaux de l'amiante (qu'il soit environnemental ou qu'il soit ajouté à un produit manufacturé) est obligatoire. Ce repérage avant travaux (« RAT ») a pour objet l'évaluation préalable des risques « amiante » liés à l'opération envisagée. De la responsabilité du donneur d'ordre, le RAT est primordial pour toute entreprise qui interviendra sur le site, depuis les travaux de reconnaissance et d'investigation jusqu'aux travaux de réalisation du projet, pour adapter en conséquence ses moyens humains, techniques et de prévention.

Cas des matériaux (sols et roches en place) contenant naturellement de l'amiante dit environnemental:

Il est conseillé d'ores et déjà de suivre la norme NF P94-001 « Repérage amiante environnemental - Étude géologique des sols et des roches en place - Mission et méthodologie ». Cette norme parue en octobre 2021 devrait devenir d'application obligatoire par un arrêté à venir.

Cas des matériaux issus de la déconstruction d'une infrastructure existante:

Il est conseillé d'ores et déjà de suivre la norme NF X46-102 « Repérage amiante - Repérage des matériaux et produits contenant de l'amiante dans les ouvrages de génie civil, infrastructures de transport et réseaux divers - Mission et méthodologie ». Cette norme parue en novembre 2020 devrait devenir d'application obligatoire par un arrêté à venir.

1.7.4.2 - Utilisation de géosynthétiques

Les géosynthétiques sont couramment employés en terrassement, en remplacement ou en complément de certaines solutions traditionnelles.

Dans les terrassements, la principale utilisation concerne les géotextiles de séparation et de filtration: l'intercalation du géotextile entre deux couches (couche de forme granulaire sur un sol fin sensible à l'eau, par exemple) permet, en évitant leur mélange, de conserver les caractéristiques du matériau granulaire et, dans certains cas, de réduire l'épaisseur de la couche de forme (fascicule 1, § 4.3.5).

Les guides établis par le Comité Français des Géosynthétiques permettent de dimensionner le géotextile, en fonction du contexte et de l'objectif recherché, et proposent une méthodologie de mise en œuvre.

D'autres utilisations sont possibles:

- renforcement: géosynthétiques de renforcement (type « géogrilles » ou équivalent);
- drainage: géocomposites, par exemple.

CHAPITRE 2

Classification des matériaux utilisés pour la construction des remblais et des couches de forme

CLASSIFICATION DES MATERIAUX UTILISES POUR LA CONSTRUCTION DES REMBLAIS ET DES COUCHES DE FORME

2.1 - NECESSITE D'UNE CLASSIFICATION SPECIFIQUE

Les différents systèmes de classifications géotechniques des sols et des matériaux rocheux proposés jusqu'à présent ont été établis avec le souci de servir l'ingénieur dans l'ensemble des différents domaines du génie civil où ces matériaux sont concernés (ouvrages en terre, fondations, stabilité des pentes, assises de chaussée ou élaboration des granulats, etc.). Cette recherche d'une classification universelle ne peut couvrir toute la complexité des comportements des matériaux. Les propriétés qui sont significatives pour un certain usage ne sont souvent plus les mêmes dès que l'on s'intéresse à un autre usage. Ceci conduit alors à rechercher des classifications spécifiques à chaque grand domaine d'utilisation de ces matériaux.

Ainsi, pour la réalisation des remblais et des couches de forme, les différentes classifications en usage au niveau international se sont montrées mal adaptées soit parce qu'elles étaient établies sur la base de paramètres n'ayant pas, ou peu, de signification vis-à-vis des problèmes rencontrés, soit surtout parce qu'elles occultaient certains aspects capitaux (l'état hydrique des sols sensibles à l'eau, le caractère évolutif de certains matériaux rocheux, ou encore la dimension maximale des plus gros éléments présents dans le sol).

La classification des sols et matériaux rocheux présentée ci-après est conforme à la classification de la norme européenne NF EN 16907-2 tout en conservant l'esprit des classifications proposées dans la RTR de 1976 et le GTR de 1992. Elle apporte certaines améliorations déjà évoquées dans le préambule mais peut aussi perturber, par certains aspects, les habitudes préconisées dans les anciens guides, dont notamment le changement des lettres utilisées pour l'identification des différentes classes et les modifications de seuils ou de références d'essai.

Tout sol ou matériau rocheux peut donc être « rangé » selon ce système de classification dès lors que les valeurs des paramètres sur lesquels il s'appuie sont connues et que les essais permettant de les déterminer sont reconnus significatifs sur le sol ou le matériau rocheux considéré.

Les matériaux issus de carrières, utilisés en remblai ou en couche de forme, sont assimilés à des sols ou des roches selon les mêmes critères de classification que les sols ou les roches. Cette classification reste cependant axée sur les conditions de réutilisation en remblai et en couche de forme et, en particulier, ne rend pas compte des problèmes liés aux difficultés d'extraction.

2.2 - CLASSIFICATION DES SOLS

Les sols sont des matériaux naturels constitués de grains pouvant se séparer aisément par simple trituration ou éventuellement sous l'action d'un courant d'eau. Ces grains peuvent être de dimensions très variables, des argiles aux blocs. Les sols sont de nature et d'origine géologique diverses : alluvions, matériaux meubles sédimentaires, dépôts glaciaires ; dépôts organiques, sols résiduels², etc.

Les sols ayant une teneur en matières organiques supérieure à 2 % sont classés conformément au chapitre 2.4.

2. Les sols résiduels sont formés sur place par un processus d'altération physico-chimique des roches (exemple : arènes granitiques, latérites, etc.).

2.2.1 - PARAMÈTRES RETENUS POUR LA CLASSIFICATION DES SOLS

Les paramètres retenus se rangent en trois catégories:

- paramètres de nature;
- paramètres de comportement mécanique;
- paramètre d'état.

Au niveau européen, seuls les paramètres de nature (granulométrie et plasticité) sont utilisés.

Au niveau français seront ajoutés les paramètres d'états hydriques et, pour les matériaux sableux et graveleux, les paramètres de comportement mécanique et l'appréciation de la sensibilité à l'eau.

Ils sont déterminés sur la fraction 0/63 mm qui est la fraction susceptible d'être identifiée par les essais de laboratoire usuels.

La notion de sensibilité à l'eau est prise dans ce document dans un sens assez restrictif, car il est à peu près certain qu'un sol totalement insensible à l'eau n'existe pas. Cette notion doit être comprise comme définissant seulement la plus ou moins grande variation de la portance d'un sol sous l'effet d'une variation donnée de sa teneur en eau (du fait notamment de son exposition aux agents météorologiques). Aussi un sol est d'autant plus sensible à l'eau que sa chute de portance est élevée pour une faible augmentation de sa teneur en eau et inversement. Toutefois cette notion ne couvre ni la perte de traficabilité du sol du fait d'une augmentation de sa glissance lors d'une pluie même faible, ni les aspects liés à sa mise en œuvre dans l'eau, ni son comportement vis-à-vis de l'érosion pluviale, de l'érosion interne, du gel, etc.

A - Paramètres de nature

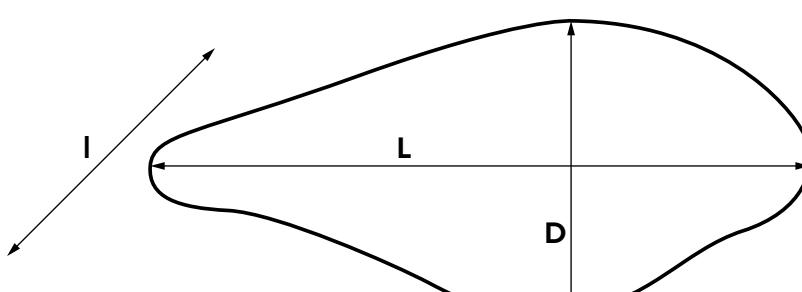
Ils se rapportent à des caractéristiques intrinsèques, c'est-à-dire qui ne varient pas ou peu, dans le temps et/ou au cours des différentes manipulations que subit le sol au cours de sa mise en œuvre. Il convient d'être vigilant sur la définition de ces paramètres et leur changement pour les matériaux évolutifs (voir § 2.3).

Les paramètres retenus concernent la granularité et l'argilosité.

A.1 - La granularité (norme NF EN ISO 17892-4)

Les particules de sol dans la nature sont rarement sphériques et leur forme peut être caractérisée selon trois dimensions:

Figure 3: Définition de la L_{\max}



L plus grande longueur

D plus grand diamètre (permettant de passer une maille de tamis $\geq D$)

I dimension perpendiculaire au plan LD et inférieure à D

Photographie 2: Illustration L_{\max} (Source : UGE)

En géotechnique, la dimension la plus utilisée est le diamètre, qui correspond non pas à la plus grande longueur, mais à la dimension pour laquelle le bloc passerait au travers d'une maille de tamis, ce qui peut équivaloir à l'une des plus petites dimensions dans le cas de blocs allongés. L'utilisation d'autres dimensions que le D_{\max} s'avère particulièrement intéressante pour le réemploi de certains matériaux:

a) L_{\max} : c'est la dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol. En présence de blocs allongés ou sous forme de plaque, c'est la plus grande longueur de ces blocs.

Ce paramètre peut être estimé de façon visuelle, notamment en présence de gros blocs, ou par un mètre ruban.

Ce paramètre est déterminant pour choisir les ateliers de terrassements utilisables et notamment pour évaluer l'épaisseur des couches élémentaires et les conditions de malaxage éventuel avec un liant. C'est également un paramètre important à connaître pour apprécier la représentativité des essais de laboratoire.

Seuil retenu: 250 mm : c'est la valeur proposée pour distinguer les matériaux blocailleux (ou rocheux) des sols ; la valeur de L_{\max} est également utilisée dans la définition des épaisseurs de couches élémentaires lors de la mise en œuvre ainsi que pour les dispositions d'élimination des plus gros éléments.

b) D_{\max} : c'est le plus grand diamètre des éléments contenus dans le sol. Dans le cas de blocs allongés, D_{\max} est inférieur à L_{\max} .

Ce paramètre peut être estimé de façon visuelle, notamment en présence de gros blocs (pour des matériaux supérieurs à 63 mm), mais, dans la mesure où une analyse granulométrique peut être réalisée, on considère que D_{\max} est équivalent au D_{95} du sol.

Remarque: ce paramètre ne doit pas être confondu avec le paramètre D utilisé pour la définition des classes granulaires d/D (par exemple, 0/63 mm) lors de la commercialisation et de la spécification de matériaux normalisés (en référence aux normes NF EN 13242, NF EN 13285 et NF P18-545 relatives aux granulats et aux spécifications de matériaux pour usage en GNT pour assises de chaussée). Le paramètre D est alors le diamètre supérieur de la classe granulaire considérée. Cette désignation admet la présence d'un refus non nul à D (présence d'un tamisat). Les exigences sur le pourcentage toléré de refus à D varient suivant l'utilisation finale des matériaux.

Seuil retenu: 63 mm: c'est la valeur proposée pour distinguer les sols fins, sableux et graveleux (classes F, I, S et G), des sols blocailleux (classes VC); c'est aussi une valeur limite couramment admise actuellement pour distinguer les sols pouvant être malaxés intimement avec un liant pour constituer des couches de forme de qualité; enfin, le comportement de la fraction 0/63 mm d'un sol peut être correctement appréhendé à partir des essais de laboratoire usuels.

Lorsque le matériau comporte des éléments fins et une fraction grossière 63/D non négligeable (classe VC), on distingue deux sous-classes:

- la sous-classe VC1 qui comprend les matériaux dont le comportement en remblai est contrôlé par la fraction > 63 mm pour lesquels il n'est plus admissible d'assimiler leur comportement à celui de leur fraction 0/63 mm;
- la sous-classe VC2 qui rassemble les matériaux dont le comportement en remblai est contrôlé par la fraction 0/63 mm qui doit être classée conformément aux tableaux de classification sols.

Dans les deux cas, on associera à cette sous-classe la classification de la fraction 0/63 mm comme classification complémentaire.

Figure 4: Illustration des différences entre un sol VC1 et un sol VC2



Pour tenir compte des caractéristiques de la fraction 0/63 mm, l'identification des sols de la classe VC est précisée à l'aide d'un double symbole du type VC2Fi, VC1Si, Fi, Si ou Gi étant la classe de la fraction 0/63 mm du matériau considéré. La valeur du D_{max} peut être indiquée en exposant de la sous-classe. Exemple: VC2¹⁵⁰S3h est un sol de classe VC2 dont le D_{max} est de 150 mm et la fraction 0/63 mm un sol de la classe S3h. Dans certains cas particuliers, la référence devra être la L_{max} .

c) Le tamisat à 63 µm: ce paramètre mesuré sur la fraction 0/63 mm du sol permet de distinguer les sols riches en fines et, dans une large mesure, d'évaluer leur sensibilité à l'eau.

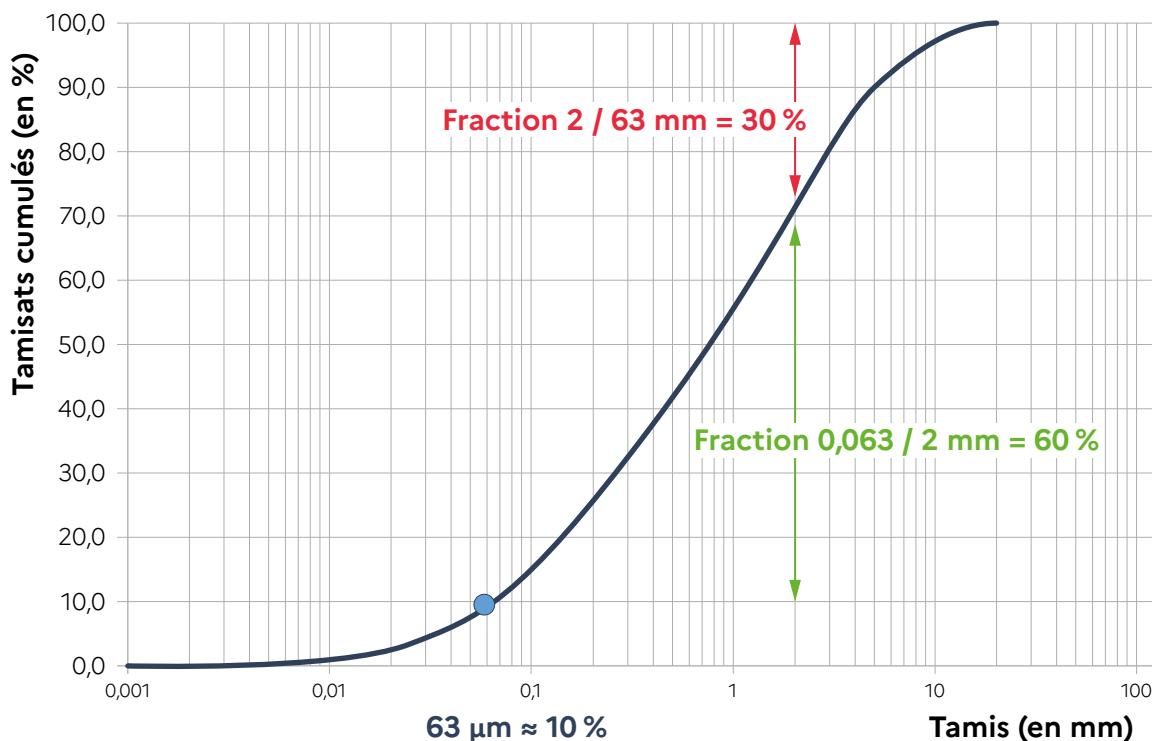
Seuil retenu:

- 35 %: c'est le seuil au-delà duquel le comportement du sol peut être considéré comme régi par celui de la fraction fine ($\leq 63 \mu\text{m}$);
- 5 %: c'est un seuil conventionnel permettant d'établir une distinction entre les matériaux sableux et graveleux pauvres ou riches en fines;
- 5 %: c'est un seuil conventionnel permettant d'établir une distinction entre les matériaux sableux et graveleux très pauvres en fines.

Dans la classification décrite dans ce document, trois seuils sont pris en compte dans les cas particuliers de définition des sols insensibles à l'eau : à 5, 10 et 12 %.

d) Le ratio entre la fraction 0,063/2 mm et la fraction 2/63 mm: ce paramètre permet d'établir une distinction entre les sols à tendance sableuse et les sols à tendance graveleuse.

**Figure 5: Illustration fraction sableuse ou graveuse
à partir des fractions 63 µm, 2 mm et 63 mm**



- fraction 0,063/2 mm > fraction 2/63 mm: sols à tendance sableuse;
- fraction 2/63 mm > fraction 0,063/2 mm: sols à tendance graveuse.

Pour les sols à tendance sableuse, le seuil de 70 % sur le tamisat à 2 mm est également utilisé pour la définition des états hydriques.

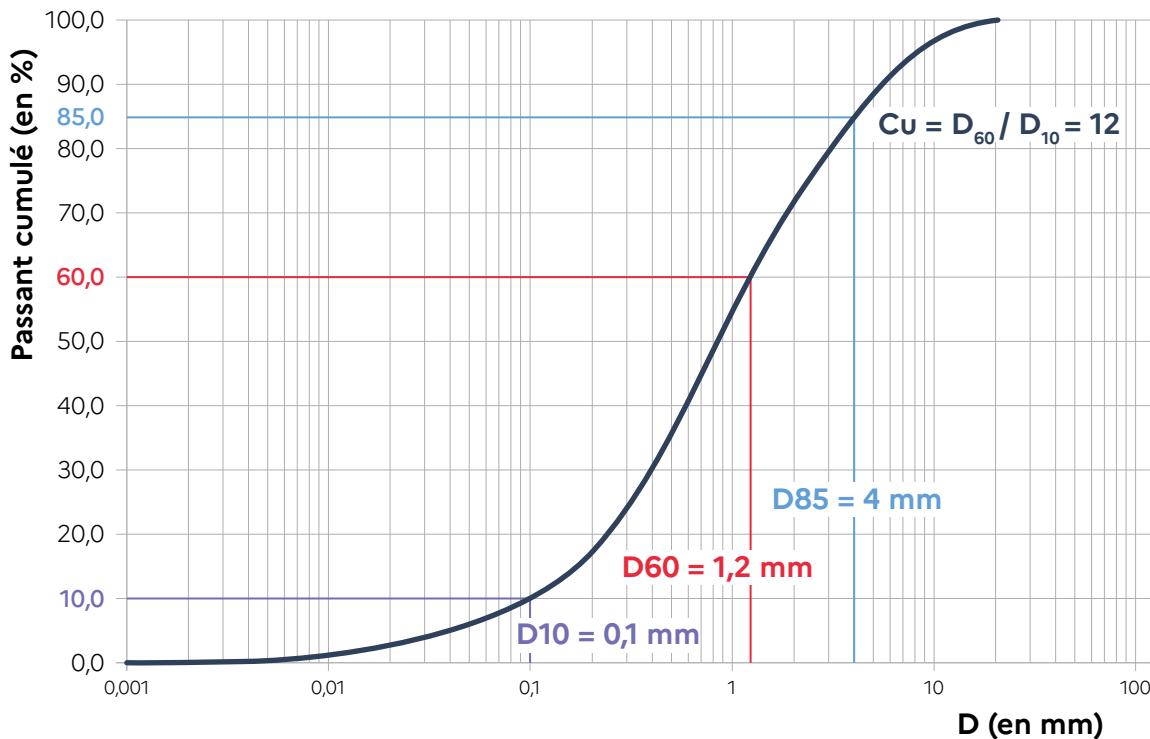
e) Le coefficient d'uniformité C_u : ce paramètre, introduit dans la norme européenne, permet de donner une indication sur la forme de la courbe granulométrique des sols étudiés. Il caractérise la répartition en taille des éléments qui composent un matériau de type sol (norme NF EN ISO 14688-2). Il se calcule de la façon suivante:

$$C_u = D_{60}/D_{10}$$

Avec:

- C_u : coefficient d'uniformité;
- D_{60} : tamis correspondant à 60 % du passant cumulé sur la courbe granulométrique;
- D_{10} : tamis correspondant à 10 % du passant cumulé sur la courbe granulométrique.

Seuil retenu: 6: la granulométrie est étalée si C_u est supérieur ou égal à 6; elle est dite uniforme ou non étalée dans le cas contraire.

Figure 6: Illustration des tamis permettant de définir le C_u **Remarque:**

- dans le cas d'un pourcentage de fines compris entre 10 et 15 %, la détermination du C_u nécessite la réalisation d'une analyse sédimentométrique. Néanmoins, en l'absence d'analyse sédimentométrique:
 - si $D_{60} \geq 400 \mu\text{m}$, alors $C_u > 6$ et les sols peuvent être classés comme ayant une granulométrie étalée (classes S1, S3, G1, G3);
 - si $D_{60} < 400 \mu\text{m}$, alors dans ce cas le C_u est indéterminé et on considérera alors les sols comme ayant une granulométrie uniforme (classes S2, S4, G2 et G4);
- un sol de granulométrie étalée est réputé plus facile à compacter qu'un sol uniforme.

A.2 - L'argilosité

a) L'indice de plasticité I_p (norme NF EN ISO 17892-12): c'est le paramètre le plus couramment utilisé pour caractériser l'argilosité des sols. Son interprétation est d'autant plus fiable que la proportion pondérale de la fraction 0/400 μm (fraction servant à l'essai) contenue dans le sol étudié est importante et que l'argilosité de cette fraction est grande.

Au-delà d'une proportion de 50 % de cette fraction et d'une valeur de 12, l'interprétation de l' I_p est simple, mais elle devient difficile lorsque cette proportion tombe en dessous de 35 % et la valeur de l' I_p en dessous de 7.

Seuils retenus:

- 12: limite supérieure des sols faiblement argileux;
- 22: limite supérieure des sols moyennement argileux;
- 40: limite supérieure des sols argileux;
- 55: limite supérieure des sols très argileux ajoutée pour tenir compte des différents retours d'expérience.

b) La valeur de bleu de méthylène V_{BS} (NF EN 17542-3): il s'agit d'un autre paramètre permettant de caractériser l'argilosité d'un sol dont l'application à l'identification des sols est usuellement pratiquée qu'en France. Ceci explique qu'elle est introduite au niveau européen uniquement en second par rapport à la limite de plasticité. Ce paramètre représente la quantité de bleu de méthylène pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules du sol, ou autrement dit une grandeur directement liée à la surface spécifique du sol.

Seuils retenus:

- 0,1 : seuil en dessous duquel on ne peut pas mesurer d'activité des fines argileuses. On peut alors considérer que le sol est insensible à l'eau sans études complémentaires (au sens défini précédemment), ce critère doit cependant être complété avec la valeur du tamisat à 63 µm qui doit être inférieur ou égal à 10 %;
- 0,2 : seuil au-dessus duquel apparaît la sensibilité à l'eau;
- 1,5 : seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux;
- 2,5 : seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne;
- 6 : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux;
- 8 : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.

Remarque: choix entre I_p et V_{BS} ³

L' I_p et la V_{BS} d'un sol étant tous deux des paramètres évaluant l'argilosité, il est utile de préciser les domaines respectifs d'application de chacun d'eux dans l'identification des sols.

La V_{BS} d'un sol est une grandeur qui exprime globalement et de manière proportionnelle la quantité et l'activité de l'argile contenue dans le sol étudié. Elle est applicable à l'identification de tous les sols contenant une fraction 0/5 mm. C'est pourquoi, dans la présente classification, toutes les classes de sols sont distinguées en tout ou partie à partir de ce paramètre.

Dans le cas des sols moyennement à très argileux, l' I_p présente quelques avantages sur la V_{BS} . C'est un paramètre pour lequel on dispose d'une longue expérience dans l'interprétation, et qui est plus sensible que la V_{BS} dès que les sols deviennent vraiment argileux. Il s'agit aussi d'un paramètre qui est à la fois un paramètre d'identification, mais aussi de comportement. En effet, l' I_p définit l'intervalle de teneur en eau dans lequel le sol reste souple et déformable (le domaine « plastique ») tout en conservant une certaine résistance au cisaillement. La connaissance de cet intervalle est, d'une manière générale, très utile dans la conception des ouvrages en terre.

Dans le cadre de la classification GTR 2023, on utilisera prioritairement la V_{BS} pour les sols fins limoneux (F1), les sols intermédiaires I et les sables et graves pour définir leur sensibilité à l'eau.

Dans la présente classification, ces éléments ont été pris en compte en réservant la possibilité d'identifier un sol à partir de l'un ou l'autre de ces deux paramètres dans le cas des sols moyennement à très argileux. Lorsque cette possibilité est prévue, le critère d'argilosité figurant **en caractère gras** dans les tableaux du fascicule 2 est celui qu'il convient de choisir en priorité.

Nota: dans la classification européenne NF EN 16907-2, il est possible de classer les sols fins par leur limite de liquidité w_L (classes FL, FM, FH et FV). Ces classes ne sont pas utilisées dans le présent document. Les sols résiduels sont formés sur place par un processus d'altération physico-chimique des roches (exemple : arènes granitiques, latérites, etc.).

B - Paramètres de comportement mécanique

Ces paramètres ne sont pris en considération que pour juger de l'utilisation possible des sols en couche de forme. Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic et qui, de ce fait, peuvent être utilisés tels quels dans la construction des couches de forme, de ceux qui risquent de se fragmenter pour se transformer en un sol constitué en majorité d'éléments fins, inutilisable dans son état naturel sans dispositions particulières (traitement, etc.).

Les paramètres de comportement considérés dans la classification sont : les **coefficients Los Angeles (LA)** (norme NF EN 1097-2) et **micro-Deval en présence d'eau (MDE)** (norme NF EN 1097-1), mesurés sur la fraction granulaire 10/14 mm⁴ (ou à défaut sur la fraction 6,3/10 mm⁴) et le coefficient de friabilité des sables (FS) mesuré sur la fraction 0,2/2 mm ou 0,2/4 mm (norme NF P18-576)

3. Dans la classification européenne, la limite de liquidité et l' I_p sont utilisés de façon « classique » pour la classification des sols. La valeur de V_{BS} peut être cependant utilisée, elle est indiquée entre parenthèses

4. Obtenu par criblage ou concassage des éléments grossiers.

Seuils retenus:

- 45 pour les valeurs LA et MDE;
- 60 pour les valeurs FS.

Remarque: les essais micro-Deval et Los Angeles peuvent être réalisés sur d'autres fractions granulaires. Les seuils ci-dessus ne sont applicables que sur les fractions citées plus haut.

C - Paramètres d'état

Il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol, mais sont fonction de l'environnement dans lequel il se trouve.

Pour les sols meubles sensibles à l'eau, le seul paramètre d'état considéré dans la présente classification est l'état hydrique (selon NF P11-300): son importance est capitale vis-à-vis de toutes les problématiques de remblai et de couche de forme.

Cinq états hydriques sont distingués dans la présente classification:

■ L'état « très humide » (th)

Il correspond à une valeur de teneur en eau au-dessus de laquelle le matériau n'est plus traficable et pour laquelle l'objectif de densification peut difficilement être atteint.

Dans l'optique de l'optimisation d'emploi des matériaux du site, l'utilisation de matériaux ayant un état hydrique très humide **en remblai peut être envisagée à partir du moment où elle s'accompagne d'une étude permettant de justifier cette possibilité et notamment des moyens utilisés pour réduire l'état hydrique de ces matériaux soit à un état hydrique humide, soit à un état hydrique moyen**. Pour ce faire, les techniques pouvant être utilisées sont identiques à celles utilisées pour l'état h: voir chapitre ci-dessous.

■ L'état « humide » (h)

C'est un état hydrique important avec une teneur en eau élevée, caractérisé principalement à partir de l'indice portant immédiat (I_{IP}). Bien que la traficabilité soit difficile, la réutilisation du sol est autorisée en prenant des dispositions particulières:

- compactage faible pour des matériaux non traités;
- recours au traitement à la chaux et/ou aux liants hydrauliques: ceci aura pour résultats, d'une part, de diminuer les teneurs en eau des matériaux (donc leur état hydrique), mais également leur plasticité. Dans ce cas, l'étude devra s'attacher à définir si le matériau est apte au traitement ainsi que les conditions de sa mise en œuvre;
- utilisation de techniques d'aération mécaniques de ces matériaux (charrues, pulvimeur...). Cette technique ne peut être envisagée que si les teneurs en eau des matériaux sont peu éloignées de la limite de l'état humide et par temps bien ensoleillé (si possible venteux). De plus, la forte plasticité de certains matériaux pourra empêcher le recours à ces techniques en raison de la difficulté à leur faire perdre de l'eau;
- incorporation d'un autre matériau, ou le même, ayant un état hydrique plus sec. S'il s'agit du même matériau, on aura recours à la même classification pour travailler sur le réemploi et sur le compactage, mais avec un état hydrique qu'il faudra définir. Si un matériau différent du premier est utilisé, il faudra veiller à réaliser les essais nécessaires à l'identification et à la classification du matériau « mélange » obtenu;
- limitation de leur emploi à des remblais de faible hauteur;
- autres techniques: drainage, stockage, gestion de mouvements des terres, etc.

Ces différentes techniques sont estimées comme normales dans les conditions technico-économiques françaises courantes actuelles.

■ L'état d'humidité « moyen » (m)

C'est l'état où les teneurs en eau sont proches de la teneur en eau de l'optimum Proctor normal. C'est également l'état d'humidité optimum pour les terrassements: contraintes minimales pour la mise en œuvre avec obtention de caractéristiques géotechniques suffisantes pour la majorité des ouvrages en terre courants, sans avoir besoin de traiter ou d'améliorer l'état hydrique des sols.

Cependant, dans le cas de recherche de performances mécaniques plus élevées (PST/arase ou raidissement de talus), il peut être nécessaire d'avoir recours à des améliorations.

■ L'état « sec » (s)

C'est un état hydrique correspondant à une teneur en eau faible mais autorisant encore une mise en œuvre en prenant des dispositions particulières estimées comme normales dans les conditions technico-économiques courantes actuelles:

- humidification: l'arrosage s'accompagne obligatoirement d'une action de malaxage pour que l'eau s'incorpore bien au sol. Suivant l'argilosité du matériau, cette technique peut demander un certain délai,
- surcompactage: un compactage intense (pour atteindre l'objectif de densification q4) est généralement suffisant, mais dans certains cas, la référence à l'optimum Proctor Modifié peut être exigée ou à une référence plus contraignante. Une attention particulière devra être portée au compactage d'un sol sec. En effet, dans certaines situations (particulièrement pour les sols F1 et F2), le surcompactage n'évite pas, par la suite, des désordres sur des remblais de moyenne et grande hauteur en présence d'eau d'infiltration ou de remontée de nappe.

De plus, cet état hydrique:

- s'associe à un I_{IP} élevé à très élevé (portance à court terme) qui peut donner un faux sentiment de sécurité vis-à-vis de la qualité du compactage et de la traficabilité, donc de l'évolution à long terme de l'ouvrage en terre,
- implique des mesures vis-à-vis de l'émission de poussières.

■ L'état « très sec » (ts)

C'est un état hydrique correspondant à une teneur en eau très faible n'autorisant plus en général la réutilisation du sol dans les conditions technico-économiques courantes actuelles.

Dans l'optique de l'optimisation d'emploi des matériaux du site, l'utilisation de matériaux ayant un état hydrique très sec en remblai peut être envisagée à partir du moment où elle s'accompagne d'une étude permettant de justifier cette possibilité et notamment des moyens utilisés pour augmenter l'état hydrique de ces matériaux soit à un état hydrique sec, soit à un état hydrique moyen. Pour ce faire, les techniques pouvant être utilisées sont identiques à celles utilisées pour l'état (s): voir chapitre ci-dessus.

Paramètres utilisés pour caractériser l'état hydrique:

La présente classification a retenu, pour caractériser l'état hydrique d'un sol, l'un ou l'autre des trois paramètres suivants:

- la position de la teneur en eau naturelle (w_n) de la fraction du matériau soumise à l'essai Proctor par rapport à l'**optimum Proctor normal** (w_{OPN}) exprimée par le rapport: $\frac{w_n}{w_{OPN}}$. **Ce rapport est le paramètre d'état le plus fiable pour caractériser les états (s) et (ts)** car les difficultés d'obtention de la compacité requise en dépendent directement. Sa signification est en revanche moins claire pour distinguer les états (h) et (th);
- la position de la teneur en eau naturelle (w_n) par rapport aux limites d'Atterberg (w_L et w_p) qui s'exprime par l'**Indice de consistance (Ic)**⁵.

$I_c = \frac{W_L - W_n}{W_p}$. L'Ic permet de caractériser correctement les cinq états (th), (h), (m), (s) et (ts) **mais seulement dans le cas des sols fins moyennement et très argileux comportant au moins 80 % à 90 % d'éléments $\leq 400 \mu\text{m}$** ⁶;

5. Norme NF EN ISO 17892-12

6. La w_n à considérer pour le calcul de l'Ic doit être rapportée à la fraction 0/400 μm .

- l'**indice portant immédiat (IPI)**⁷ qui exprime la valeur de l'Indice CBR immédiat mesuré sans surcharge ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor normal et à une teneur en eau définie. Cette teneur en eau peut être dite naturelle lorsqu'elle correspond à celle mesurée au moment du prélèvement.

L'IPI est en général le paramètre à privilégier pour caractériser les états (h) et (th) car il traduit concrètement les difficultés de circulation des engins. En revanche, il perd sa signification dans les états (s) et (ts).

Seuils retenus :

Ils sont indiqués dans les tableaux de la classification des sols figurant dans le fascicule 2.

Il convient de noter qu'il peut ne pas y avoir correspondance parfaite entre les valeurs de ces paramètres (par exemple, un sol F1h ayant une teneur en eau comprise entre 1,1 et 1,25 w_{OPN} , peut ne pas présenter un I_{IPI} strictement compris entre 3 et 8).

L'**indice CBR après 4 jours d'immersion (CBR_i)** caractérise la portance du matériau immergé. Ce paramètre est utilisé dans certains cas pour caractériser « le caractère non sensible à l'eau » d'un matériau en complément de la connaissance du pourcentage de fines et de la V_{BS} .

Seuil retenu :

20 : valeur à partir de laquelle on considère que le matériau conserve suffisamment de portance en cas d'humidification pour être qualifié d'« insensible à l'eau ». (Pour des passants à 63 µm et des valeurs de V_{BS} données, cf. fascicule 2.)

Photographie 3: Moule CBR immergé (Source : Eiffage)



2.2.2 - EXEMPLE DE TABLEAU DE CLASSIFICATION DES SOLS

On trouvera dans l'annexe 1 du second fascicule, la classification détaillée des sols (classes F, I, S et G). À titre d'exemple, un extrait de cette annexe est reproduit ci-après (tableau 2) pour les sols de la classe F.

7. Norme NF EN 13286-47.

Tableau 2 : Classification des sols F

Classement selon la nature					Classement selon l'état hydrique	
Paramètres de nature 1 ^{er} niveau de classification	Classe	Paramètres de nature 2 ^e niveau de classification	Sous-classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous- classe
$D_{\max} \leq 63 \text{ mm}$ et tamisé à $63 \mu\text{m} > 35 \%$	F Sols fins	$V_{BS} \leq 2,5$ ou $I_p \leq 12$	F1 Limos peu plastiques, loess, silts alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	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 V_{BS} , compte tenu de l'imprécision attachée à la mesure de I_p .	$IPI \leq 3$ ou $w_n \geq 1,25 w_{OPN}$	F1th
					$3 < IPI \leq 8$ ou $1,25 w_{OPN} > w_n \geq 1,1 w_{OPN}$	F1h
		$12 < I_p \leq 22$ ou $2,5 < V_{BS} \leq 6$	F2 Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques, arènes...	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 I_p atteint des valeurs ≥ 12 , il constitue le critère d'identification le mieux adapté.	$8 < IPI \leq 25$ ou $1,1 w_{OPN} > w_n \geq 0,9 w_{OPN}$	F1m
					$0,9 w_{OPN} > w_n \geq 0,7 w_{OPN}$	F1s
		$22 < I_p \leq 40$ ou $6 < V_{BS} < 8$	F3 Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...	Ces sols sont très cohérents à teneur en eau moyenne et faible, et collants ou glissants à l'état humide, d'où la 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 notamment leur consistance.	$0,7 w_{OPN} > w_n$	F1ts
					$IPI \leq 2$ ou $Ic \leq 0,95$ ou $w_n \geq 1,3 w_{OPN}$	F2th
		$40 < I_p \leq 55$ ou $V_{BS} > 8$	F4 Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	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 de faible hauteur est envisageable avec un traitement adapté. Leur emploi en remblai et couche de forme nécessite dans tous les cas des études spécifiques démontrant la possibilité de leur mise en œuvre pour des remblais de faible hauteur.	$2 < IPI \leq 6$ ou $0,95 < Ic \leq 1,05$ ou $1,3 w_{OPN} > w_n \geq 1,1 w_{OPN}$	F2h
					$6 < IPI \leq 15$ ou $1,05 < Ic \leq 1,15$ ou $1,1 w_{OPN} > w_n \geq 0,9 w_{OPN}$	F2m
		$I_p > 55$		L'utilisation des argiles très plastiques en l'état n'est pas envisageable hors étude spécifique et restera limitée à des remblais de faible hauteur .	$1,15 < Ic \leq 1,3$ ou $0,9 w_{OPN} > w_n \geq 0,7 w_{OPN}$	F2s
					$1,3 < Ic$ ou $0,7 w_{OPN} > w_n$	F2ts
					$IPI \leq 2$ ou $Ic \leq 0,85$ ou $w_n \geq 1,4 w_{OPN}$	F3th
					$2 < IPI \leq 4$ ou $0,85 < Ic \leq 1$ ou $1,4 w_{OPN} > w_n \geq 1,2 w_{OPN}$	F3h
					$4 < IPI \leq 10$ ou $1 < Ic \leq 1,1$ ou $1,2 w_{OPN} > w_n \geq 0,9 w_{OPN}$	F3m
					$1,1 < Ic \leq 1,25$ ou $0,9 w_{OPN} > w_n \geq 0,7 w_{OPN}$	F3s
					$1,25 < Ic$ ou $0,7 w_{OPN} > w_n$	F3ts
					$IPI \leq 1$ ou $Ic \leq 0,8$ ou $w_n \geq 1,4 w_{OPN}$	F4th
					$1 < IPI \leq 3$ ou $0,8 < Ic \leq 1$ ou $1,4 w_{OPN} > w_n \geq 1,2 w_{OPN}$	F4h
					$3 < IPI \leq 10$ ou $1 < Ic \leq 1,1$ ou $1,2 w_{OPN} > w_n \geq 0,9 w_{OPN}$	F4m
					$1,1 < Ic \leq 1,2$ ou $0,9 w_{OPN} > w_n \geq 0,7 w_{OPN}$	F4s
					$1,2 < Ic$ ou $0,7 w_{OPN} > w_n$	F4ts
					Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique.	F4+

2.3 - CLASSIFICATION DES MATERIAUX ROCHEUX

Bien qu'après son extraction, un déblai rocheux soit transformé en un matériau susceptible d'être considéré, au moins partiellement, comme un sol meuble au sens défini au § 1.2 précédent, **il faut au préalable être en mesure de prévoir, à partir de la roche en place, le comportement du matériau après abattage.** Ce besoin a conduit à établir un classement des matériaux rocheux sur la base de leur nature géologique, de résultats d'essais (fragmentabilité, dégradabilité, masse volumique... pratiqués sur des prélèvements représentatifs) et de l'expérience que l'on possède de leur comportement au cours des différentes phases du terrassement.

Pour caractériser un massif rocheux en vue de son emploi en remblai ou en couche de forme, le géotechnicien est donc conduit à procéder en deux temps :

- la première étape consiste à identifier, au moins sommairement, la nature pétrographique de la roche en s'appuyant principalement sur la documentation et le raisonnement géologique. Cette identification apporte déjà des informations importantes d'ordre qualitatif sur les caractères généraux de la roche et son comportement prévisible; toutefois, cette première identification est en général insuffisante pour renseigner le géotechnicien sur les possibilités réelles d'utilisation du matériau;
- la seconde étape vise à préciser comment le matériau va se comporter tout au long des phases de terrassement: extraction, chargement, régâlage, compactage sous la circulation des engins lourds et sous la pluie, et s'il risque encore d'évoluer, une fois l'ouvrage en service, sous l'action des contraintes mécaniques, de l'eau ou du gel. Il s'agit là d'une opération complexe qui exige que le géotechnicien dispose d'une description précise du massif et qu'il ait une bonne connaissance des différentes techniques d'extraction et de mise en œuvre afin de pouvoir évaluer leurs effets sur le comportement du matériau.

Ce n'est qu'au terme de cette seconde étape qu'il peut évaluer les possibilités d'emploi des matériaux issus d'un déblai rocheux: granularité obtenue, comportement sous trafic, caractère évolutif. Il faut toutefois admettre qu'une part d'incertitude existera toujours du fait que ces données résultent d'hypothèses dont la fiabilité dépend de nombreux facteurs (compétence et expérience du géotechnicien, complexité géologique du site, moyens et délais d'étude disponibles, etc.).

La classification des matériaux rocheux présentée ci-après reprend cette démarche en se référant toutefois essentiellement à l'expérience des matériaux rocheux terrassés en France.

La problématique de l'extraction des matériaux rocheux n'est pas traitée dans le GTR 2023. Les tableaux 6, 10 et 11 de la norme NF EN 16907-2 (classifications selon la résistance à la compression, l'espacement des fissures/fractures relevées, et la vitesse des ondes sismiques) peuvent servir à classer les roches et les massifs rocheux en vue de cette problématique.

Dans ce qui suit, on ne s'intéressera qu'à la partie « roches extraites » pour définir leur classification.

2.3.1 - CLASSIFICATION DES MATERIAUX ROCHEUX D'APRÈS LA NATURE PÉTRO-GRAFIQUE DE LA ROCHE

Trois classes principales de matériaux rocheux sont distinguées à partir des grandes familles de roches habituellement considérées: les matériaux rocheux issus des roches sédimentaires puis ceux issus des roches magmatiques et, enfin, les matériaux issus des roches métamorphiques.

Dans le cas des roches sédimentaires, la classification est subdivisée suivant les principales natures de roches rencontrées dans cette catégorie: craies (CH), calcaires (Li), roches argileuses (Cl), roches siliceuses (Sa, Co), roches salines (SR). Cette subdivision s'avère indispensable, car les matériaux issus de chacune des roches précitées présentent des comportements différents dans leur utilisation en remblai et en couche de forme.

Dans le cas des matériaux provenant de roches magmatiques (Vo) et métamorphiques (Me), une subdivision complémentaire a été introduite par rapport à l'ancienne version du GTR, et ce conformément à la norme européenne, de façon à mieux prendre en compte la nature géologique de la roche.

Le classement des roches commence par l'identification de l'origine géologique, même si le nom des classes débute par la classe de résistance.

De façon à bien prendre en compte la norme européenne, un nouveau groupe de matériaux a été introduit: le groupe matériaux naturels particuliers (« AN ») dans lequel sont répertoriés les schistes houillers non calcinés (noirs).

Photographie 4: Schistes noirs (Source: Eurovia)



Photographie 5: Schistes rouges (Source: Eurovia)



2.3.2 - CLASSIFICATION DES MATERIAUX ROCHEUX D'APRÈS LEUR ÉTAT ET LEURS CARACTÉRISTIQUES MÉCANIQUES

Comme cela a été indiqué, la connaissance de la seule nature pétrographique de la roche dont est issu un matériau rocheux n'est généralement pas suffisante pour prévoir tous les problèmes que peut poser son utilisation en remblai ou en couche de forme.

Outre la question du choix de la méthode d'extraction qui n'est pas traitée ici, les aspects à considérer sont:

- l'aptitude du matériau à se fragmenter sous les sollicitations appliquées au cours des différentes phases de la mise en œuvre et de l'extraction et, en particulier, la possibilité ou le risque de produire une proportion d'éléments fins suffisante pour avoir un comportement proche d'un sol sensible à l'eau;

Photographie 6: Marne évolutive en bloc (en dessous) marne après évolution (au-dessus) (Source: Eiffage)



Photographies 7 et 8: Évolution d'une marne en dépôt. Photo de gauche, la marne est en bloc, compacte. Photo de droite, même bloc après évolution « sous sollicitation naturelle » (Source: Eiffage)



- la potentialité d'une évolution postérieurement à la mise en œuvre sous l'action des contraintes mécaniques seules ou conjuguées avec celles de l'eau et du gel;

Photographie 9: Calcaire biodétritique gélif (Source: Eiffage)



- la teneur en eau dans le cas de matériaux très fragmentables tels que certaines craies, marnes, schistes sédimentaires, etc., qui peuvent renfermer dans leur structure une importante quantité d'eau qui se communiquera inévitablement aux éléments fins produits au cours du terrassement;
- la teneur en éléments solubles dans le cas de roches salines.

Les techniques d'extraction (explosif, ripage, fraisage, etc.) ou l'homogénéité du massif conduisent à une certaine variabilité des matériaux extraits pouvant augmenter ou diminuer leur caractère évolutif ou sensible à l'eau.

Il est donc nécessaire de caractériser les matériaux rocheux vis-à-vis de ces aspects à partir de différents paramètres dont les suivants sont considérés comme les plus représentatifs.

Paramètres d'état et de comportement mécanique retenus dans la classification des matériaux rocheux

■ Le coefficient Los Angeles (LA) (norme NF EN 1097-2)

■ Le coefficient micro-Deval en présence d'eau (MDE) (norme NF EN 1097-1)

Ces deux paramètres sont introduits pour les roches relativement dures : granites, gneiss, calcaires et grès durs, etc. Leur interprétation vise essentiellement les possibilités d'emploi de ces matériaux en couche de forme, voire en couche de chaussée (norme NF EN 13 242).

■ La masse volumique de la roche déshydratée en place (pd) (norme NF P94-064)

Ce paramètre qui présente l'avantage d'être aisément mesurable est en corrélation étroite avec la fragmentabilité des matériaux tels que les craies et les calcaires tendres. Son interprétation vise essentiellement les possibilités d'emploi de ces matériaux en remblai.

■ Le coefficient de fragmentabilité (I_{FR}) (NF EN 17542-2)

Ce coefficient s'exprime par le rapport des D_{10} d'un échantillon de granularité initiale donnée, mesurés avant et après lui avoir fait subir un pilonnage conventionnel avec la dame Proctor normal.

L'interprétation de ce paramètre vise les possibilités d'emploi en remblai des matériaux rocheux évolutifs et en couche de forme de certains matériaux rocheux plus ou moins friables pour lesquels les coefficients LA et MDE manquent de sensibilité (roches argileuses, certaines roches siliceuses, schistes houillers, etc.).

■ Le coefficient de dégradabilité (I_{DGa}) (NF EN 17542-1)

Ce coefficient s'exprime par le rapport des D_{10} d'un échantillon de granularité initiale donnée, mesurés avant et après l'avoir soumis à des cycles de séchage/immersion conventionnels. Son interprétation vise essentiellement les possibilités d'emploi en remblai des matériaux issus de roches argileuses (marnes, schistes sédimentaires, etc.).

■ La teneur en eau naturelle (w_n) (norme NF EN 17892-1)

L'influence de ce paramètre n'est prise en compte dans la classification que pour certaines craies et roches argileuses très fragmentables.

■ La teneur en éléments solubles (% NaCl, gypse, etc.) (normes NF ISO 11048, NF EN 1744-5)

L'interprétation de ce paramètre est évidemment limitée au cas des roches salines.

Valeurs seuils retenues pour les paramètres d'état et de comportement des matériaux rocheux

Elles figurent de manière détaillée dans l'annexe 1 (cf. fascicule 2).

2.3.3 - CAS DES MATÉRIAUX ROCHEUX DURS

Les matériaux rocheux durs présentant après extraction une L_{max} (par appréciation visuelle) inférieure ou égale à 250 mm sont à classer en tant que sols grossiers.

2.3.4 - EXEMPLE DE TABLEAU DE CLASSIFICATION DES MATÉRIAUX ROCHEUX

On trouvera dans le fascicule 2, annexe 1, la classification détaillée des matériaux rocheux. À titre d'exemple, un extrait est reproduit ci-après (tableau 3) pour les matériaux calcaires (Rx Li) et les craies (CHi).

Tableau 3: Exemple de classification des roches

Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique et le comportement		
Nature pétrographique de la roche		Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe	
Roches sédimentaires	Roches carbonatées	CH Craie	<p>La craie est un empilement de particules de calcite dont les dimensions sont de l'ordre de 1 à 10 µm.</p> <p>Cet empilement constitue une structure d'autant plus fragile que la porosité est grande (ou, inversement, que la densité sèche est faible).</p> <p>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.</p> <p>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.</p> <p>À l'inverse, lorsque la teneur en eau est faible, la craie devient un matériau rigide, très portant mais difficile à compacter.</p> <p>Enfin, certaines craies denses à très denses peuvent continuer à se fragmenter après mise en œuvre, sous l'effet des contraintes mécaniques et du gel, principalement.</p>	$\rho_d > 1,95$	Craie très dense CH1
			$1,7 < \rho_d \leq 1,95$	Craie dense CH2	
			$1,55 < \rho_d \leq 1,7$ et $w_n \geq 27$	Craie de densité moyenne	CH3 h
			$1,55 < \rho_d \leq 1,7$ et $22 \leq w_n < 27$		CH3 m
			$1,55 < \rho_d \leq 1,7$ et $18 \leq w_n < 22$		CH3 s
			$1,55 < \rho_d \leq 1,7$ et $w_n < 18$		CH3 ts
			$\rho_d \leq 1,55$ et $w_n \geq 31$		CH4 th
			$\rho_d \leq 1,55$ et $26 \leq w_n < 31$		CH4 h
			$\rho_d \leq 1,55$ et $21 \leq w_n < 26$	Craie peu dense	CH4 m
			$\rho_d \leq 1,55$ et $16 \leq w_n < 21$		CH4 s
			$\rho_d \leq 1,55$ et $w_n < 16$		CH4 ts
Li	Calcaires rocheux divers Exemples : • calcaires grossiers; • travertins; • tufs et encroûtements, etc.	Cette classe regroupe l'ensemble des matériaux calcaires rocheux. Les matériaux R3 Li de L_{max} inférieure à 250 mm doivent être classés avec les sols (cf. fascicule 1, § 2.3.3). 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.	$MDE \leq 45$	Calcaire dur R3 Li	
			$MDE > 45$ et $\rho_d > 1,8$	Calcaire de dureté moyenne R4 Li	
			$\rho_d \leq 1,8$	Calcaire fragmentable R5 Li	

2.4 - CLASSIFICATION DES SOLS ORGANIQUES (O), DES MATERIAUX NATURELS PARTICULIERS (AN) DES SOUS-PRODUITS INDUSTRIELS ET DES MATERIAUX RECYCLÉS (CLASSES AM, AR)

2.4.1 - SOLS ORGANIQUES O : CAS DES SOLS CONTENANT UN POURCENTAGE EN MATIÈRE ORGANIQUE (C_{OM}) SUPÉRIEUR À 2 % (CLASSE Oi)

Les matières organiques proviennent de la décomposition des végétaux dans les sols, au contact de l'eau et de l'air, ce qui donne notamment, suivant leur teneur, les terres végétales, les tourbes, les sols vasards, les sols ligneux, les humus forestiers, etc. Leur présence, pour les plus organiques d'entre eux, est relativement localisée et reconnaissable à leur odeur et à leur couleur noirâtre.

La possibilité d'utiliser des sols avec matières organiques dans les ouvrages en terre dépend de leur teneur dans ces sols: selon son importance, il peut y avoir des risques pour la stabilité et la pérennité de ces ouvrages. Leur désagrégation peut provoquer des tassements en remblai et leur caractère acide peut perturber la prise des liants hydrauliques lors du traitement de sols. Par ailleurs, leur utilisation peut aussi être déterminante pour la stabilité de l'ouvrage: cas de la terre végétale, mise en œuvre sur les pentes de talus.

Détermination de la teneur en matières organiques - Classification des sols organiques

Dans la classification européenne, les sols présentant une teneur en matières organiques supérieure à 2 % sont répertoriés en dehors de la classification des sols géotechniques. Les sols contenant de la matière organique sont, dans un premier temps, classés selon leur teneur en matières organiques C_{OM} et sont, dans un deuxième temps, caractérisés suivant leur granulométrie et leur argilosité. Leur classe est donc précisée par un double symbole du type O1Fi, O2li, etc.

La norme européenne de classification « terrassements » (NF EN 16907-2) préconise pour cela l'utilisation de la méthode d'analyse par perte au feu, conformément à la norme NF EN 17685-1. Cette méthode permet de quantifier la perte de masse de l'échantillon après calcination à 550 °C. À cette température, on estime qu'excepté l'eau évaporée à basse température, la perte de masse mesurée correspond à la calcination des matières organiques (combustion et relargage sous forme de CO_2).

Cependant, cette méthode peut conduire à des teneurs en matières organiques inexactes: en effet, dans certains cas, il peut y avoir libération d'eau dans la même gamme de température. C'est le cas du gypse, des phases cimentaires de type C(A)SH (présents notamment dans les bétons concassés). Il peut y avoir également un apport par des argiles (perte d'eau jusqu'à 200-230 °C). Des travaux de recherche ont été publiés pour proposer une correction des valeurs de perte au feu pour les matériaux argileux (*Teneur en matières organiques des sols: résultats du projet MATOSOL*, Bulletin CRR (Centre de recherches routières) n°116, juillet-août-septembre 2018, Bruxelles X, P409259).

D'autres méthodes de détermination de la teneur en matières organiques existent et peuvent être adaptées dans certains cas, comme par exemple la méthode au dichromate de potassium (NF P94-055) ou au permanganate de potassium (projet de norme européenne en cours d'élaboration). Ces dernières méthodes peuvent néanmoins poser des problèmes si d'autres couples oxydo-réducteurs (métaux dans les scories par exemple, ou hydrocarbures aromatiques polycycliques (« HAP ») sont présents dans le sol car ils peuvent également réagir (C_{OM} surestimée).

Tableau 4: Classification des sols contenant de la matière organique et possibilité de réemploi

% Matières organiques (selon NF EN 17685-1)	Classification	Sols	Utilisation en ouvrage en terre	Utilisation en couche de forme
< 2 %	Classification sols ou roches	Non organiques	Oui	Oui
de 2 à 6 %	O1	À faible teneur en matières organiques	Oui (uniquement en remblai courant, moins de 10 m de hauteur)	Oui avec étude particulière à partir de 3 %
de 6 à 20 %	O2	À teneur en matières organiques modérée	À privilégier pour les surfaces à enherber, en merlons paysagers ou phoniques	Non
> 20 %	O3	Tourbe	Non	Non

2.4.2 - MATERIAUX ALTERNATIFS AU SENS DE LA NORME EUROPÉENNE: MATERIAUX NATURELS PARTICULIERS ET MATERIAUX AN, AM OU AR

Pour les matériaux alternatifs, selon la classification européenne, on distingue:

- les matériaux naturels traités mécaniquement: classe AN comme les matériaux utilisés en remblai, couche drainante, roche concassée, sable lavé. On se référera aux classifications données dans les chapitres précédents et relatifs à la classification des sols et des roches;
- les matériaux élaborés (y compris les matériaux fabriqués secondaires): classe AM comme les cendres, laitier, granulats légers expansés, classification qui sera détaillée dans ce qui suit;

Photographie 10: Stock de laitiers (Source: Eiffage)

- les matériaux recyclés: classe AR comme les bétons concassés, débris de briques, pneumatiques, matériaux issus de l'arasement ou du fraisage routier, débris, ballast recyclé.

Les matériaux alternatifs sont des matériaux particuliers dont l'emploi en remblai et en couche de forme peut dans certains cas se révéler intéressant du point de vue technique et économique, à condition de ne pas nuire à l'environnement. Toutefois, les critères au travers desquels il convient d'examiner chaque famille de matériaux entrant dans cette catégorie pour en déduire ses possibilités d'emploi sont à la fois très divers et spécifiques à la famille de matériaux considérée.

La classification proposée a été établie à partir du recensement des principales familles de matériaux de cette catégorie, susceptibles d'être concernées en France par une utilisation en remblai ou en couche de forme.

Divers documents en application confirment l'intérêt et l'incitation forte à valoriser les matériaux et déchets inertes plutôt que les diriger vers un dépôt définitif:

- directive-cadre du 19 novembre 2008 et loi de transition énergétique pour la croissance verte et ses différents documents d'application;
- loi relative à la lutte contre le gaspillage et l'économie circulaire (2020);
- plans départementaux de prévention et de gestion des déchets;
- schémas régionaux des carrières (« SRC »);
- pacte d'engagement des acteurs des infrastructures de mobilité (2021);
- code de la commande publique qui intègre l'environnement dans les clauses d'attribution des marchés et autorise les variantes environnementales;
- règlements de voirie de collectivités locales qui incitent à l'utilisation de ces matériaux.

Actuellement, un cadrage environnemental spécifique pour les matériaux existe en France via des guides fixant des seuils associés à des usages spécifiques en technique routière:

- guide *Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière / Évaluation environnementale* (mars 2011). Il s'applique à tous les types de matériaux alternatifs et propose une démarche itérative de caractérisation environnementale basée sur trois niveaux d'expérimentation (lixivation, percolation et planche expérimentale).

D'autres guides sont spécifiques à des familles de matériaux alternatifs issus de déchets. L'approche expérimentale, basée sur les retours d'expérience et les modélisations, a permis de fixer ces seuils en fonction des seuls essais de lixiviation. Des restrictions d'usage (domaines d'emploi dans l'infrastructure, volume, localisation par rapport au contexte du chantier: captage AEP, parc national, présence de cours d'eau) sont définies en fonction de valeurs seuils sur deux champs: le stockage temporaire (en phase travaux) et le domaine d'usage.

À titre d'exemple, les guides suivants sont parus, à la date de rédaction du présent guide. On trouvera ci-dessous une liste non exhaustive qu'il conviendra d'actualiser:

- guide *Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière - Les laitiers sidérurgiques* (octobre 2012);
- guide *Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière - Mâchefers d'incinération des déchets non dangereux* (MIDND, octobre 2012);
- guide *Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière - Matériaux de déconstruction issus du BTP* (janvier 2016);
- guide *Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière - Les cendres de centrale thermique au charbon pulvérisé* (juillet 2019);
- guide *Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière - Les sables de fonderie* (juillet 2019);
- les guides publiés sur le site officiel du ministère chargé de l'environnement <https://www.ecologie.gouv.fr/> sortie-statut-dechet-terres-excavees-et-sediments.

Nota: à ce jour, il est important de noter qu'à l'exception du guide d'application aux MIDND, les autres documents ont une valeur de guide méthodologique. Le guide MIDND est une traduction de l'arrêté du 18 novembre 2011 (JORF n° 0277 du 30 novembre 2011, page 20152, texte n° 10).

Chacune des dix-neuf familles dénombrées est caractérisée par le (ou les) paramètre(s) qui détermine(nt) les possibilités d'emploi. Lorsque l'expérience actuelle est suffisante, des valeurs seuils de ces paramètres sont proposées, permettant d'établir des distinctions à l'intérieur d'une même famille.

Les tableaux du § 2.5 présentent cette classification en se limitant toutefois à une définition générale des matériaux entrant dans chacune des familles ainsi qu'à celle du (ou des) paramètre(s) considéré(s) comme significatif(s) vis-à-vis de leurs possibilités d'emploi. La classification complète de ces matériaux, avec les valeurs seuils des paramètres retenus ainsi que des commentaires explicatifs, est présentée dans l'annexe 1 du fascicule 2.

Tableau 5: Exemple de tableau annexe 1 fascicule 2 de classement pour les ballasts recyclés et MIDND

Famille de Matériaux	Caractères principaux	Classement selon l'état hydrique et le comportement		
		Paramètres retenus	Valeurs seuils	Sous-classe
AR-A6 Ballast recyclé	<p>Le ballast recyclé provient de chantiers de dépose, de renouvellement ou de maintenance des voies ferrées. Il correspond à un granulat 31,5/50 mm de pierres concassées extraites de roches massives à l'exclusion de tout matériau calcaire ou alluvionnaire. Jusque dans les années quatre-vingt-dix, le ballast pouvait contenir jusqu'à 15 % de matériaux calcaire, alluvionnaire voire laitier de haut fourneau.</p> <p>Le vieillissement des voies (fines d'attrition, gravillons, remontées boueuses...) participe à l'augmentation de la teneur en fines ($< 63 \mu\text{m}$). Lorsque cette teneur en fines est élevée (fin de vie du ballast) on observe alors du ballast colmaté.</p> <p>Le vieillissement du ballast en voie n'a pas d'impact sur ses performances intrinsèques (dureté).</p> <p>Une réutilisation peut nécessiter une élaboration en fonction de l'usage prévu.</p> <p>À noter que la réutilisation en tant que ballast ferroviaire doit se conformer aux référentiels ferroviaires spécifiques et n'est pas traitée dans le présent document.</p>		<p>Se rapporter à la classe de sols correspondante pour obtenir les conditions de réutilisation.</p>	
AM-B1 Mâchefers d'incinération de déchets non dangereux	<p>Il s'agit de mâchefers:</p> <ul style="list-style-type: none"> • bien incinérés; • criblés; • déferraillés; • recyclables au sens de l'arrêté du 18 novembre 2011; • stockés plusieurs mois avec une limitation à trois ans. 	<p>Les mâchefers ont un comportement vis-à-vis de l'eau différent des matériaux grenus naturels: leur teneur en eau à l'optimum Proctor est plus élevée ($15 \leq w_{OPN} \leq 20\%$) et leur portance chute avec une augmentation de la teneur en eau même s'ils ne contiennent pas de particules argileuses. La V_{BS} n'est pas un critère discriminant de leur sensibilité à l'eau.</p> <p>Le paramètre caractéristique retenu est leur état hydrique en fonction du rapport entre teneur en eau naturelle et teneur en eau à l'optimum Proctor ou de l'IPI.</p> <p>Les mâchefers peuvent néanmoins être considérés comme insensibles à l'eau s'ils remplissent les deux critères suivants:</p> <ul style="list-style-type: none"> • passant à $63 \mu\text{m} \leq 10\%$, • et $CBR_i > 20$. 	<p>IPI < 10 $w > 1,3 w_{OPN}$</p> <p>$1,2 w_{OPN} \leq w < 1,3 w_{OPN}$ $10 \leq IPI \leq 20$</p> <p>$0,8 w_{OPN} \leq w < 1,2 w_{OPN}$ $IPI > 20$</p> <p>$0,6 w_{OPN} \leq w < 0,8 w_{OPN}$</p> <p>$w < 0,6 w_{OPN}$</p>	<p>AM-B1th</p> <p>AM-B1h</p> <p>AM-B1m</p> <p>AM-B1s</p> <p>AM-B1ts</p>

D'autres matériaux font l'objet de la classification européenne pour leur utilisation et/ou recyclage, tels que les pneus, et ne sont pas rappelés dans ces tableaux. Ces matériaux nécessitent l'application de protocoles spéciaux pour leur mise en œuvre.

Les symboles de classification utilisés sont issus de travaux de normalisation européenne publiés CEN TS 17438 « Matières premières secondaires prises en compte dans l'élaboration des normes granulats du CEN/TC 154 ».

2.5 - SYNOPTIQUE DE CLASSIFICATION DES MATERIAUX SELON LEUR NATURE

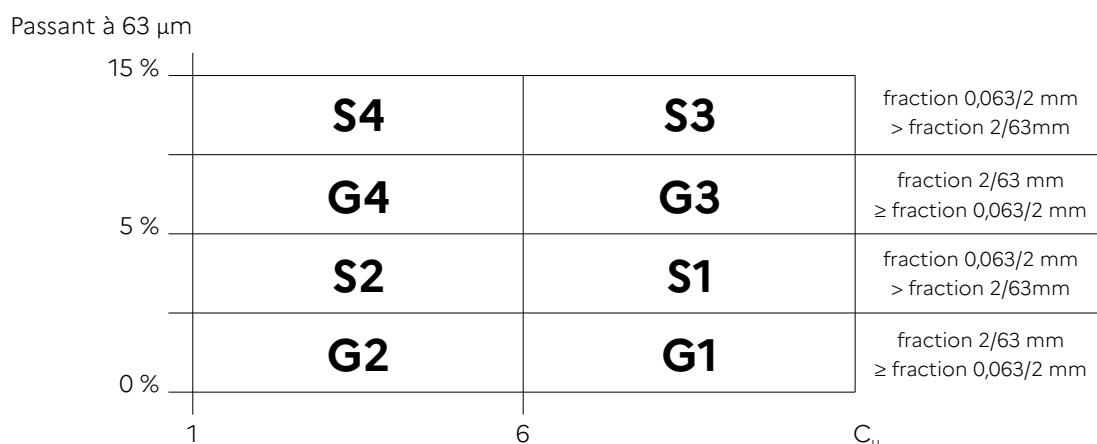
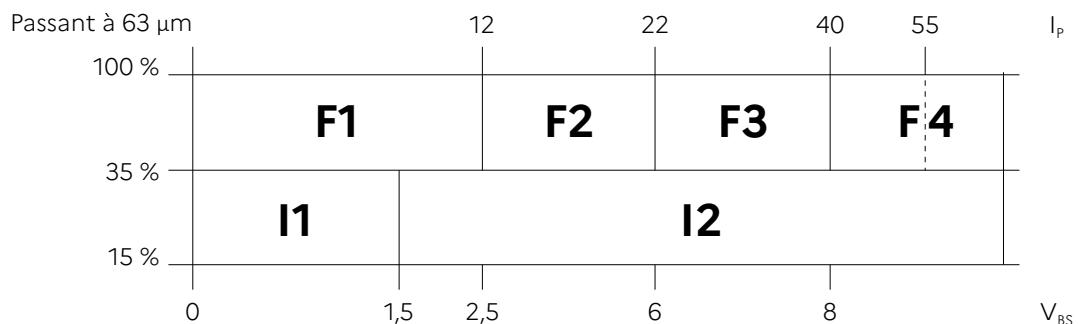
2.5.1 - CLASSIFICATION DES SOLS

Les principales modifications par rapport à la classification de 1992 portent :

- changement 63 µm au lieu de 80 µm;
- changement 63 mm D_{max} au lieu de 50 mm;
- modification de la limite de l' I_p à 22 au lieu de 25;
- modification de la limite à 15 % passant à 63 µm au lieu de 12 % à 80 µm;
- utilisation du C_u dans ce premier niveau de classement. La V_{BS} et le passant à 2 mm interviennent pour définir l'état hydrique et la sensibilité à l'eau des matériaux Si et Gi;
- définition des symboles issue des termes anglais ($F = fine soil$, $I = intermediate soil$, $S = sand$, $G = gravel$, $VC = very coarse soil$).

SOLS avec $D_{max} \leq 63$ mm

Figures 7 et 8: Synoptiques de classification des sols avec $D_{max} \leq 63$ mm



SOLS avec $D_{\max} > 63 \text{ mm}$ **Figures 9: Synoptique de classification des sols avec $D_{\max} > 63 \text{ mm}$**

Classe	Description
VC1	Matériaux roulés et matériaux anguleux très charpentés (fraction 0/63 mm ≤ 60 à 80 %)
VC2	Matériaux roulés et matériaux anguleux peu charpentés (fraction 0/63 mm > 60 à 80 %)

Exemples de classification**Tableau 6: Exemple de classification**

Identification	Justifications granulométriques	Classification
Sol avec: <ul style="list-style-type: none"> • $D_{\max} = 30 \text{ mm}$ • passant à 63 µm de 60 % • $I_p = 25$ 		F3
Sol avec: <ul style="list-style-type: none"> • $D_{\max} = 50 \text{ mm}$ • passant à 63 µm de 12 % • passant à 2 mm de 60 % • $C_u = D_{60}/D_{10} = 25$ 	<ul style="list-style-type: none"> • % fraction sableuse 0,063/2 mm: 48 % • % fraction graveleuse 2/63 mm: 40 % <p>fraction 0,063/2 mm > fraction 2/63 mm</p>	S3
Sol avec: <ul style="list-style-type: none"> • $D_{\max} = 80 \text{ mm}$ • passant à 63 µm de 4 % (sur la fraction 0/63 mm) • passant à 2 mm de 40 % (sur la fraction 0/63 mm) • $C_u = D_{60}/D_{10} = 50$ 	<ul style="list-style-type: none"> • % fraction sableuse 0,063/2 mm: 36 % • % fraction graveleuse 2/63 mm: 60 % <p>fraction 2/63 mm ≥ fraction 0,063/2 mm</p>	VC2G1

2.5.2 - CLASSIFICATION DES ROCHES NATURELLES - ROCHES EN MASSE

On note:

- distinction des roches volcaniques et métamorphiques;
- définition des symboles issue des termes anglais (CH = chalk, Li = limestone, Cl = clay, Sa = sandstone, Co = conglomerate, SR = salt rock, Vo = volcanic rock, Me = metamorphic rock).

Tableau 7: Synoptique de classification des roches

Nature pétrographique de la roche		Classe
Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies
		Calcaires
	Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...
	Roches siliceuses	Grès
		Brèches, poudingues, conglomérats
	Roches salines	Sel gemme, gypse
	Roches magmatiques	Granites, basaltes, trachytes, andésites
Roches métamorphiques		Me

2.5.3 - CLASSIFICATION DES SOLS ORGANIQUES

Tableau 8: Classification des sols organiques

Classe	Description
O1	Sols à faible teneur en matières organiques
O2	Sols à teneur en matières organiques modérée
O3	Tourbe

2.5.4 - CLASSIFICATION DES MATERIAUX NATURELS PARTICULIERS

Tableau 9: Synoptique de classification des matériaux naturels particuliers

Classe	Description
AN-H1	Produit de dragage cohésif
AN-H2	Produit de dragage non cohésif
AN-G2	Schistes houillers non calcinés (noirs)
AN-G3	Schistes houillers fragmentables ou riches en pyrite ou avec un taux de charbon élevé

2.5.5 - CLASSIFICATION DES MATERIAUX ANTHROPIQUES

Tableau 10: Classification des matériaux anthropiques

Mélange de matériaux de déconstruction	Fraisat d'enrobé	AR-A5	AR-A1	
	Béton concassé		AR-A2	
	Produit de déconstruction concassé (hors béton)		AR-A3	
	Matériaux traités et non traités		AR-A4	
Ballast recyclé			AR-A6	
Mâchefer d'incinération de déchets non dangereux - MIDND			AM-B1	
Cendres volantes (CVCT) silico-alumineuses de charbon			AM-C1a	
Laitiers	Laitier granulé/vitrifié de haut-fourneau	AM-D	AM-D1	
	Laitier cristallisé de haut-fourneau		AM-D2	
	Laitier de convertisseur à oxygène		AM-D3	
	Laitier d'aciérie électrique en filière carbone		AM-D4	
	Laitier d'aciérie électrique en filière inox et allié		AM-D5	
	Laitier de métallurgie secondaire		AM-D6	
Sous-produits de fonderie	Sable de fonderie	AM-F	AM-F1	
	Laitier de fonderie en four cupola		AM-F2	
Schistes houillers	Schistes houillers calcinés (rouge)		AM-G1	

CHAPITRE 3

Conditions d'utilisation des matériaux en remblai

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN REMBLAI

3.1 - PRINCIPES RETENUS

Les conditions d'utilisation doivent être respectées pour autoriser l'emploi en remblai des différentes classes et sous-classes de matériaux présentées dans le chapitre précédent.

Ces conditions sont exprimées, en exigences techniques directement intégrables dans les cahiers des charges des marchés pour obtenir la qualité recherchée pour ces ouvrages.

Elles ont été définies dans le double souci :

- d'une part, de viser le juste niveau de qualité technique nécessaire, compte tenu des possibilités des matériels d'exécution actuels et des pratiques habituelles ;
- d'autre part, de tenir compte des coûts moyens des différentes techniques et méthodes utilisées actuellement. De ce fait, il est possible que certaines conditions d'utilisation non envisagées dans le présent document puissent être retenues et donner satisfaction dans des contextes technico-économiques différents où ne s'appliquent pas les mêmes règles de délais de construction, de niveau de service ou de coût. En particulier, dans cet esprit, on a considéré que les matériaux sensibles à l'eau se trouvant dans un état hydrique très humide (th) ou très sec (ts) n'étaient pas réutilisables normalement dans les remblais ou les couches de forme sauf étude spécifique (cf. § 2.2.1).

3.2 - PRÉSENTATION DES TABLEAUX DES CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN REMBLAI

Pour chaque classe ou sous-classe de matériaux définie dans la classification, les tableaux figurant dans le fascicule 2 (dont un extrait est présenté au § 3.5 du présent chapitre), indiquent les conditions de mise en œuvre à respecter en fonction de la situation météorologique constatée au moment où le matériau est mis en remblai. Ne sont indiquées dans ces tableaux que les conditions particulières qui sont considérées comme nécessaires à l'obtention de la qualité.

Les tableaux comportent cinq colonnes :

- dans la première colonne est indiqué le cas envisagé, défini par la classe, la sous-classe et l'état du matériau. Lorsque l'état est caractérisé par la teneur en eau, il s'agit de l'état hydrique constaté à l'extraction. Cet état hydrique peut être plus ou moins modifié au moment de la mise en remblai suivant la situation météorologique du moment et suivant la technique de mise en œuvre adoptée. C'est d'ailleurs un des intérêts du document que de faire apparaître la technique de mise en œuvre à respecter pour tirer le meilleur profit de la situation météorologique ;
- la deuxième colonne comporte, dans un but pédagogique, des observations générales sur le comportement du matériau considéré. Ces observations contribuent à la justification technique des conditions d'utilisation proposées ;
- la troisième colonne concerne la situation météorologique durant l'extraction et la mise en remblai. Pour chaque cas, les différentes situations météorologiques pouvant se présenter sont envisagées. Elles sont désignées par les signes ++, +, =, -. Ces symboles expriment le sens dans lequel a tendance à varier la teneur en eau en fonction de la situation météorologique :
 - ++ exprime que la situation météorologique a pour effet d'accroître la teneur en eau du matériau de manière brutale et imprévisible. Ce cas est traduit dans les tableaux par l'expression « pluie forte » ;

- + exprime que la situation météorologique a pour effet d'accroître la teneur en eau de manière lente et relativement prévisible. Ce cas est traduit dans les tableaux par l'expression « pluie faible »;
- = exprime que la situation météorologique n'a pas d'action sensible sur la teneur en eau du matériau considéré. Ce cas est traduit dans les tableaux par l'expression « ni pluie - ni évaporation importante »;
- - exprime que la situation météorologique a pour effet de diminuer la teneur en eau du matériau (il s'agit toujours d'une diminution qui peut être considérée comme relativement prévisible sous les climats français). Ce cas est traduit dans les tableaux par l'expression « évaporation importante ».

Remarque: ces symboles ne correspondent pas à des seuils quantifiables des paramètres décrivant la situation météorologique (hauteur ou intensité de pluie, par exemple), car les effets de la pluie ne sont pas indépendants du vent, de la température et du sol lui-même. C'est au géotechnicien du chantier qu'il appartient de caractériser la situation météorologique au moment de la mise en œuvre avec toute l'expertise qui s'impose. Dans le contexte des travaux de terrassement, il paraît difficile de vouloir aller au-delà de cette appréciation.

- Dans la quatrième colonne figurent les conditions d'utilisation en remblai. Ces conditions s'appliquent au cas de matériau indiqué dans la première colonne dans l'hypothèse de la situation météorologique portée dans la troisième. Comme dans tout système de classification, un cas de matériau donné dans un état donné représente en fait une certaine gamme de possibilités comprises entre des limites inférieure et supérieure. Les conditions d'utilisation indiquées visent donc la situation moyenne du milieu de la gamme. Dans certains cas, plusieurs solutions sont proposées et elles sont alors désignées par un titre soulignant l'aspect caractéristique de la solution. L'ordre de la présentation n'implique cependant pas entre elles de priorité ou de hiérarchie.
- Dans la cinquième colonne figurent des codes correspondants aux différentes conditions d'utilisation. L'utilité de ces codes est notamment de permettre une formulation rapide des conditions d'emploi lorsqu'une grande variété de sols doit être prise en compte dans un projet ainsi qu'une détection immédiate des éléments qui différencient deux ou plusieurs solutions.

3.3 - COMMENTAIRES SUR LES CONDITIONS D'UTILISATION PRÉSENTÉES DANS LES TABLEAUX

Les conditions d'utilisation en remblai présentées dans les tableaux se groupent en sept rubriques symbolisées par une lettre.

- E: extraction,
- G: action sur la granularité,
- W: action sur la teneur en eau,
- T: traitement,
- R: régalage,
- C: compactage,
- H: hauteur de remblai (entre le terrain naturel et la cote projet).

3.1.1 - RUBRIQUE E: EXTRACTION

Le mode d'extraction des déblais peut interférer sensiblement sur la qualité des remblais dans la mesure où:

- l'extraction en couche (d'épaisseur de l'ordre de 0,1 à 0,3 m) permet une bonne fragmentation et un tri relatif des différentes couches de matériaux. Elle a la particularité d'exposer au maximum les sols aux agents atmosphériques, ce qui selon les cas peut être un effet recherché ou au contraire contre-indiqué;
- l'extraction frontale se caractérise évidemment par des effets exactement opposés. Elle offre en plus la possibilité, dans les formations stratifiées, de sélectionner le niveau présentant la meilleure portance pour le réserver à la circulation des engins de transport.

Photographie 11: Extraction au motor-scraper, engin d'extraction en couches minces par excellence, ici le bouteur le pousse (technique push-pull) (Source: Cerema)



Photographie 12: Extraction à la pelle en rétro pour extraction frontale (Source: SCSNE)



3.1.2 - RUBRIQUE G: ACTION SUR LA GRANULARITÉ

Dans cette rubrique sont envisagées différentes actions visant à modifier la granularité du matériau entre son extraction et la fin de sa mise en remblai. Parmi ces actions figurent:

- l'élimination des éléments avec $L_{\max} > 800 \text{ mm}$. Cette valeur constitue en effet une limite maximum des blocs admissibles dans le corps d'un remblai compte tenu des performances des compacteurs les plus puissants actuellement ;
- l'élimination des éléments avec $L_{\max} > 250 \text{ mm}$. Cette valeur constitue la longueur maximale des blocs permettant encore un malaxage du sol avec un agent de traitement ;
- la fragmentation complémentaire après extraction. Cette modalité s'applique également aux matériaux rocheux évolutifs ou en forme de plaque. L'objectif recherché est d'obtenir un matériau ayant à la fois une L_{\max} compatible avec les compacteurs utilisés et une courbe granulométrique la plus étalée possible de manière à prévenir au maximum ses possibilités d'évolution à long terme et limiter la création de vides entre les gros éléments. Cette condition implique évidemment l'élimination des éléments avec $L_{\max} > 800 \text{ mm}$.

Photographie 13: Extraction de schistes, quartzophyllades sous forme de bancs à l'aide d'un brise-roche (Source: SCSNE)



Les moyens utilisables pour agir sur la granularité sont variés: pétardage, concassage, utilisation d'engins spéciaux tels que rouleaux à pieds « dameurs », chenillage avec de gros bouteurs, fragmentation à l'aide de marteaux ou burins hydrauliques, etc.

3.1.3 - RUBRIQUE W: ACTION SUR LA TENEUR EN EAU

Il s'agit des différentes mesures pouvant être prescrites pour modifier l'état hydrique des matériaux (notamment l'aération par conditions météorologiques favorables ou l'humidification) pour:

- diminuer la teneur en eau :
 - cette opération consiste le plus souvent en une aération permettant de profiter de conditions météorologiques favorables. Elle peut devoir s'accompagner d'une scarification ou d'un ameublissemement préalable pour augmenter la surface d'aération. Une vigilance particulière de la météorologie doit accompagner ce temps d'aération (dont les délais peuvent être importants) pour ne pas perdre les bénéfices de cette phase; l'essorage par dépôt provisoire constitue également une modalité que l'on peut spécifier (délai d'essorage, mode de constitution des dépôts...) en fonction du chantier,
 - le drainage préalable, dont le dimensionnement doit faire l'objet d'une étude spécifique;
- augmenter la teneur en eau :
 - par simple humidification: cela consiste en un arrosage simple durant la mise en œuvre. Elle n'a pour objectif que de maintenir l'état hydrique du matériau lorsque les conditions météorologiques sont « évaporantes »,
 - par humidification avec pour objectif le changement d'état hydrique du matériau. Dans ce cas il faut être conscient qu'il s'agit d'une opération qui exige de grandes quantités d'eau et le recours à un brassage ou un malaxage pour la faire pénétrer au sein du matériau (une vérification de l'efficacité de l'opération s'impose avant d'en généraliser l'application sur tout un chantier).

Photographies 14 et 15: Humidification par enfouisseuse (Source: SCSNE)



3.1.4 - RUBRIQUE T: TRAITEMENT⁸

Cette rubrique concerne les actions de traitement des matériaux avec de la chaux ou d'autres réactifs (ciments, cendres volantes, laitiers ou autres sous-produits industriels éventuellement). Avec des sols fins moyennement ou très argileux, le traitement à la chaux occupe une place privilégiée au point qu'il soit justifié dans de nombreux cas de le recommander exclusivement.

Lorsqu'un traitement du matériau est préconisé, cela implique qu'une étude particulière soit faite pour préciser la faisabilité et l'intérêt de cette solution, les dosages et éventuellement les difficultés d'exécution. Sur le chantier, ce dosage doit être choisi en fonction de l'état hydrique des matériaux, constaté au moment de la mise en remblai. En particulier dans une situation météorologique évaporante, l'évaporation produite par le malaxage peut être suffisante pour permettre l'économie d'une grande partie, voire de la totalité, du produit de traitement; dans ce cas, il y a tout intérêt à imposer une aération simultanée avec le traitement.

Pour l'utilisation des matériaux en remblai, l'objectif du traitement est essentiellement la possibilité d'exécuter la mise en œuvre dans des conditions pratiques satisfaisantes. Par conséquent, on pourra en général se contenter d'un malaxage relativement sommaire avec des charrues. Pour les mêmes raisons, l'action du produit de traitement peut ne pas avoir d'effet définitif sur le matériau dès lors qu'il a permis sa mise en œuvre correcte. L'absence de risques de gonflements doit cependant toujours être vérifiée.

Photographie 16: Atelier de traitement par charrue à socs. Le mélange sol-chaux peut être malaxé sur une épaisseur atteignant sans difficulté 0,50 m, mais exige un nombre de passes sensiblement supérieur pour obtenir une qualité de malaxage comparable à celle produite par la charrue à disques qui, elle, a une profondeur de travail faible de l'ordre de 15 à 20 cm max) (Source: SCSNE)



3.1.5 - RUBRIQUE R: RÉGALAGE

Sous cette rubrique est donnée une indication sur l'épaisseur des couches élémentaires à mettre en œuvre. Il ne s'agit que d'une indication approximative compte tenu des méthodes de régalage utilisées en terrassement.

Cette notion d'épaisseur de régalage est cependant très importante pour la qualité de la mise en œuvre. On peut être amené à imposer pour une classe de matériau donnée un régalage en couche mince indépendamment des considérations liées au compactage, par exemple pour:

- garantir l'obtention de la fragmentation complémentaire de certains matériaux rocheux évolutifs;
- rechercher une mise à profit maximum de la situation météorologique (aération ou humidification des matériaux).

8. Des indications détaillées sur les conditions d'exécution des traitements de matériau en vue de leur utilisation en remblai sont fournies dans le guide technique SETRA-LCPC « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques » GTS.

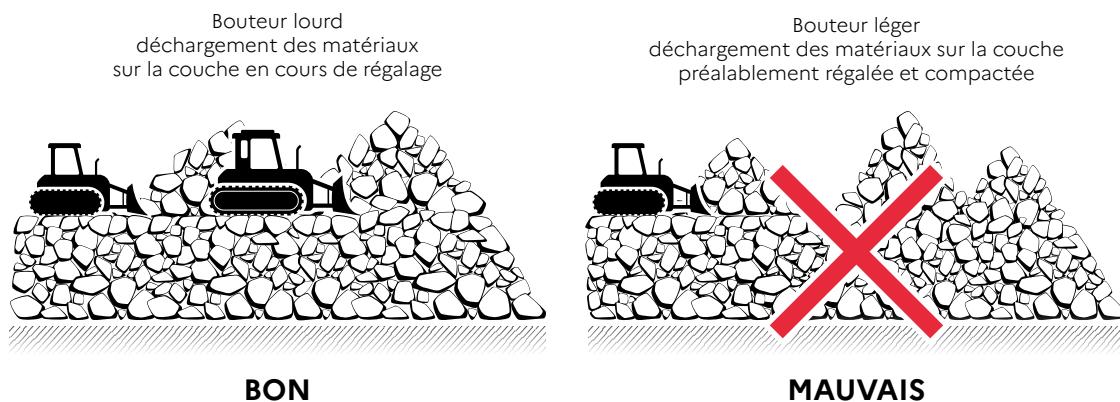
Pour fixer les idées, on peut retenir:

- qu'une couche « mince » a une épaisseur de 20 à 30 cm;
- qu'une couche « moyenne » a une épaisseur de 30 à 50 cm.

Il va de soi que la préconisation d'une couche moyenne autorise a fortiori l'exécution d'une couche mince et que, lorsqu'aucune modalité de régalage n'est préconisée, l'épaisseur maximale des couches élémentaires est définie par l'épaisseur de compactage possible sur le matériau envisagé avec le compacteur utilisé. Ces valeurs sont indiquées dans les tableaux de compactage de l'annexe 4 du fascicule 2.

Dans le cas des matériaux rocheux, le régalage doit systématiquement être réalisé par déchargement des matériaux à la partie supérieure de la couche en cours de mise en œuvre et poussage dans le talus de la couche à l'aide d'un bouteur de forte puissance (cf. illustration figure 9).

Figure 9: Schéma de la mise en œuvre des matériaux rocheux à recommander



3.1.6 - RUBRIQUE C: COMPACTAGE

Trois niveaux d'énergie sont distingués: faible, moyen, intense. Comme pour les épaisseurs de régalage, il s'agit d'une indication qualitative sur le niveau d'énergie de compactage requis par les différents matériaux. Les données quantitatives répondant précisément au cas de chantier considéré (couple matériau - compacteur) figurent dans le chapitre 5 « Compactage des remblais et des couches de forme » et dans l'annexe 4 du fascicule 2. De manière générale le compactage « faible » doit être appliqué aux matériaux humides pour éviter leur mise en surpression interstitielle et le compactage « intense » aux matériaux secs.

3.1.7 - RUBRIQUE H: HAUTEUR DES REMBLAIS

L'existence de cette rubrique tient au fait que les possibilités d'utilisation des matériaux sont fonction de la hauteur du remblai. Il est donc précisé, sous cette rubrique, que certaines conditions de mise en œuvre, qui sont acceptables pour des remblais de faible hauteur, ne doivent pas être employées pour des remblais plus élevés, car elles introduiraient des risques excessifs du point de vue du tassement ou de la stabilité. Il est à rappeler qu'il ne s'agit ici que de la stabilité et du tassement propres du corps de remblai. La question du comportement du sol de fondation doit être prise en considération par ailleurs de même que les questions de protection de talus.

En particulier, toutes les solutions qui parient sur l'amélioration des matériaux apportée par la situation météorologique n'offrent pas de garantie suffisante pour être admises dans la construction des remblais de grande hauteur.

À titre de référence, on considère que:

- les remblais de faible hauteur sont limités à 5 m;
- les remblais de hauteur moyenne sont limités à 10 m;
- les remblais de grande hauteur dépassent 10 m.

À partir de 10 m de hauteur, pour certains types de matériaux (sols fins, argileux, marneux, évolutifs, etc.), la conception et la réalisation du remblai nécessitent une attention spécifique pour réduire les risques d'instabilité interne: une attention doit être portée sur le zonage du remblai et le mouvement des terres.

Au-delà de 15 m de hauteur, les spécifications sur la nature, les caractéristiques et la mise en œuvre des matériaux sont à fixer avec la conception de l'ouvrage (voir le guide Sétra *Conception et de réalisation des terrassements*, fascicule 1, 2007).

Lorsqu'une condition d'utilisation n'est pas autorisée pour la réalisation d'un remblai de grande hauteur ou de hauteur moyenne, on peut en déduire que cette condition ne peut être appliquée dans la construction de la partie basse (partie située en dessous des 5 m supérieurs du remblai); en revanche les 5 m supérieurs de l'ouvrage peuvent être construits en suivant cette condition. Il convient cependant d'être prudent dans cette interprétation, car il n'est en général pas souhaitable de construire de grands ouvrages avec des parties en matériaux ayant des comportements mécaniques ou hydrauliques très différents. Par conséquent, la décision de s'en remettre à cette interprétation doit résulter d'une réflexion prenant en compte l'ensemble des données techniques, économiques et organisationnelles particulières à l'ouvrage considéré. À ce sujet, il convient de rappeler que, dans tous les cas, les grands remblais doivent être conçus comme des ouvrages d'art, définis individuellement dans le marché et suivis de telle sorte qu'ils puissent faire l'objet d'un dossier d'ouvrage.

3.4 - TABLEAU RÉCAPITULATIF DES CONDITIONS POUVANT ÊTRE IMPOSÉES POUR UTILISER LES DIFFÉRENTS MATÉRIAUX EN REMBLAI

Tableau 11: Tableau récapitulatif des conditions pouvant être imposées pour utiliser les différents matériaux en remblai

Rubrique	Code	Conditions d'utilisation
E Extraction	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Extraction en couches (0,1 à 0,3 m)
	2	Extraction frontale (pour un front de taille > 1 à 2 m)
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Élimination des éléments $L_{max} > 800$ mm
	2	Élimination des éléments $L_{max} > 250$ mm pour traitement
	3	Fragmentation complémentaire après extraction
W Action sur la teneur en eau	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Réduction de la teneur en eau par aération
	2	Essorage par mise en dépôt provisoire
	3	Arrosage pour maintien de l'état
	4	Humidification pour changer d'état
T Traitement	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Traitement avec un réactif ou un additif adaptés
	2	Traitement à la chaux seule
R Régalage	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Couches minces (20 à 30 cm)
	2	Couches moyennes (30 à 50 cm)
C Compactage	1	Compactage intense
	2	Compactage moyen
	3	Compactage faible
H Hauteur des remblais	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Remblai de hauteur faible (≤ 5 m)
	2	Remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)

3.5 - EXEMPLE DE TABLEAU DES CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN REMBLAI

Le tableau 12 ci-après, extrait de l'annexe 2 du fascicule 2, reproduit les conditions d'utilisation à appliquer à la sous-classe de sol F2h.

Tableau 12: Exemple de tableau de réemploi des sols F2h en remblai

F2h	<p>Ces sols sont difficiles à mettre en œuvre en raison de leur portance faible. La mise en dépôt provisoire et le drainage préalable ne sont habituellement pas des solutions envisageables dans le climat français moyen. Le matelassage est à éviter au niveau de l'arase-terrassement.</p>	+	pluie faible	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON
			ni pluie, ni évaporation importante	Solution 1: traitement T: traitement à la chaux C: compactage moyen	0 0 0 2 0 2 0
		-	ni pluie, ni évaporation importante	Solution 2: utilisation en l'état C: compactage faible H: remblai de faible hauteur (≤ 5 m)	0 0 0 0 0 3 1
		-	évaporation importante	Solution 1: aération E: extraction en couches W: réduction de la teneur en eau par aération R: couches minces C: compactage moyen H: remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	1 0 1 0 1 2 2
				Solution 2: traitement T: traitement à la chaux C: compactage moyen	0 0 0 2 0 2 0

Remarque: l'examen de ce tableau met en évidence la formulation extrêmement synthétique du libellé de ces conditions. Cette formulation est particulièrement adaptée à une traduction directe en termes de prescriptions dans les cahiers des charges.

Cependant, sur le chantier, il est clair que de telles prescriptions ne sauraient être appliquées sans un minimum d'interprétation fondée sur l'expertise de celui qui a la charge de les faire respecter. Ainsi, dans l'exemple du sol F2h ci-dessus, il serait évidemment aberrant d'ordonner l'arrêt de la mise en œuvre de ce type de sol par situation météorologique très évaporante, si l'état hydrique est assez voisin de l'état moyen et si la hauteur du remblai à réaliser est de l'ordre de 6 à 7 m, sous prétexte que l'atelier ne permet pas l'extraction en couches minces. En revanche, une grande attention devra être portée à la bonne exécution de l'aération à la mise en remblai.

CHAPITRE 4

Conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme

CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

4.1 - CONCEPTION DE LA COUCHE DE FORME

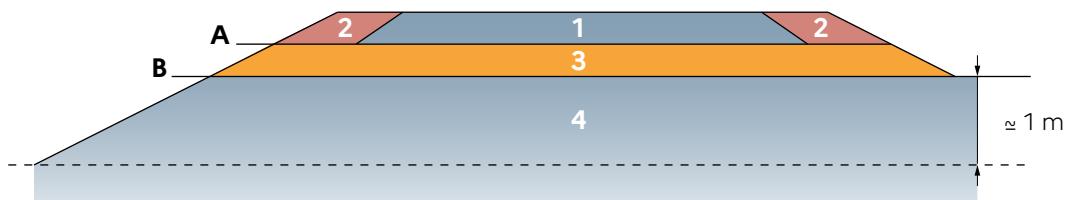
4.1.1 - DEFINITION ET NATURE DE LA COUCHE DE FORME

La couche de forme est une structure plus ou moins complexe permettant d'adapter les caractéristiques aléatoires et dispersées des matériaux de remblai ou du terrain en place, aux caractéristiques mécaniques, géométriques, hydrauliques et thermiques prises comme hypothèses dans la conception de la chaussée.

La surface supérieure de cette structure d'adaptation constitue la « plateforme support de chaussée » (« PF »).

On désigne par partie supérieure des terrassements (« PST »), la zone supérieure (environ 1 m d'épaisseur) des terrains en place (cas des profils en déblai) ou des matériaux rapportés (cas des profils en remblai). La plateforme de la PST est l'arase de terrassement (« AR ») (figure 10).

Figure 10: Définition des différents termes



- | | |
|---|--|
| 1 Chaussée
(couches de roulement, base et fondation) | A Plateforme support de chaussée (PF) |
| 2 Accotements | B Arase terrassement (AR) |
| 3 Couche de forme | |
| 4 Partie supérieure des terrassements PST : épaisseur d'environ 1 m de sol naturel (section en déblai) ou de matériau rapporté (section en remblai) située sous la couche de forme | |

Selon les cas de chantier (nature des sols, climat, environnement hydrogéologique, trafic de chantier, etc.), la couche de forme se présentera sous des formes différentes. Elle peut être :

- inexistante car inutile lorsque les matériaux constituant le remblai ou le sol en place ont eux-mêmes les qualités requises ;
- limitée à l'apport d'une seule couche d'un matériau ayant les caractéristiques nécessaires ; c'est le concept traditionnel de la couche de forme ;
- constituée d'une superposition de couches de matériaux différents répondant à des fonctions distinctes, incluant par exemple un géotextile, des matériaux grossiers, une couche de fin réglage, un enduit gravillonné, etc. Cette association conçue rationnellement permet de former une structure d'adaptation dont la surface présente les caractéristiques requises pour une plateforme support de chaussée.

4.1.2 - FONCTIONS ET CONCEPTION DE LA COUCHE DE FORME

La couche de forme répond à la fois à des objectifs de court terme (vis-à-vis de la phase de réalisation de la chaussée) et de long terme (lorsque l'ouvrage est en service). Selon les cas de chantier, on cherchera à assurer, avec la couche de forme, l'ensemble ou certaines des fonctions suivantes.

À court terme (figure 11):

- un nivellation de la plateforme support de chaussée permettant de réaliser la couche de fondation dans les tolérances d'épaisseur fixées;
- une portance suffisante, compte tenu en particulier des aléas météorologiques, pour une exécution correcte du compactage des couches de chaussées et l'obtention d'un bon uni;
- une protection du sol-support vis-à-vis des intempéries;
- une traficabilité permettant la circulation, dans de bonnes conditions, des engins approvisionnant les matériaux de la couche de fondation;
- éventuellement, supporter le trafic de chantier pour d'autres besoins.

Figure 11: Fonctions à court terme de la couche de forme



À long terme:

- l'homogénéisation de la portance du support pour concevoir des chaussées d'épaisseur constante;
- le maintien dans le temps, en dépit des fluctuations de l'état hydrique des sols-supports sensibles à l'eau, d'une portance minimale pouvant être estimée avec une précision suffisante au stade du dimensionnement de la structure de chaussée;
- une amélioration de la portance de la plateforme pour optimiser le coût de l'ensemble couche de forme - structure de chaussée;
- la protection thermique des sols-supports gélifs;
- une contribution au drainage de la chaussée, etc.

Dans un certain nombre de situations correspondant à de petits ou moyens chantiers, l'épaisseur de la couche de forme est fixée avec le seul objectif de permettre la réalisation de la chaussée, dans des conditions météorologiques favorables, en assurant les fonctions « à court terme » définies précédemment.

Cette démarche peut alors conduire à retenir une couche de forme de plus faible épaisseur que celle préconisée dans le présent document. Mais dans ce cas, l'épaisseur de la couche de forme sera en général insuffisante pour :

- améliorer de façon sensible la portance à long terme des sols-supports ;
- réduire l'influence des variations de portance des sols-supports sensibles à l'eau ;
- obtenir une faible dispersion et la pérennité des caractéristiques mécaniques de la couche de forme (dans le cas des matériaux traités).

Il faudra alors admettre qu'il ne sera pas tenu compte d'un quelconque effet mécanique de cette couche de forme dans le dimensionnement de la chaussée. À l'inverse, l'optimisation du coût du projet terrassement-chaussée peut être étudiée avec des épaisseurs ou des performances de la couche de forme supérieures aux valeurs préconisées dans le présent document.

En ce qui concerne enfin la conception du projet terrassement-chaussée :

- dans tous les cas, c'est au niveau de la couche de forme que la question de la protection au gel du sol-support doit être examinée car c'est là en général que la protection recherchée peut être obtenue au moindre coût ;
- dans la réflexion sur la conception du drainage des eaux d'infiltration à travers le corps de chaussée et les accotements, le choix des dispositions constructives devra être cohérent avec les caractéristiques hydrauliques des matériaux de la couche de forme et de la PST.

Il s'avère ainsi que la conception de la couche de forme requiert une réflexion renouvelée à chaque chantier pour tenir compte des objectifs visés et des conditions de réalisation des travaux. Cette réflexion doit notamment considérer :

- l'aptitude des matériaux disponibles à être employés en couche de forme ;
- l'épaisseur de la couche de forme à réaliser selon les matériaux retenus, les conditions de chantier et la saison durant laquelle les travaux de terrassements et de chaussées seront exécutés ;
- les gains éventuels sur le coût global de la chaussée, tirés d'un accroissement d'épaisseur de la couche de forme.

4.1.3 - CRITÈRES ASSOCIÉS À LA CONSTRUCTION DE LA CHAUSSÉE

En premier lieu, pour que la couche de forme puisse être exécutée de manière satisfaisante, il est nécessaire que l'ornierage de l'arase des terrassements soit limité, ce qui amène à rechercher à ce niveau, une portance minimale à court terme. L'expérience montre qu'une valeur de module EV2 à la plaque (ou module équivalent à la Dynaplaque) de l'ordre d'au moins 35 MPa est nécessaire pour mettre en œuvre une couche de forme en matériaux traités, tandis qu'une couche de forme en matériaux granulaires peut être exécutée sur une arase de 15 à 20 MPa seulement.

Pour la réalisation des couches de chaussée, les exigences minimales préconisées antérieurement sont maintenues :

- la plateforme support de chaussée doit être nivélée avec une tolérance qui doit être définie dans les CCTP et dépendants de la nature de la couche de forme et de la structure de chaussée. À titre indicatif, la valeur proposée dans le GTR de 1992 était de + ou - 3 cm ;
- la déformabilité de la plateforme au moment de la mise en œuvre des couches de chaussée doit être telle que :
 - le module de déformation soit supérieur à 50 MPa. Ces essais peuvent être réalisés par des essais à la plaque (NF P94-117-1) ou module équivalent à la dynaplaque (NF P94-117-2), ou
 - la déflection relevée au deflectographe Lacroix (NF P98-200-3) ou à la poutre Benkelman (NF P98-200-2) sous essieu de 13 tonnes soit inférieure à 2 mm.

Dans certaines conditions, comme celles de grands chantiers sur lesquels la circulation sur la couche de forme sera importante, ou du fait de la nature des matériaux de la couche d'assise et des conditions d'exécution de chantier envisagées (épaisseurs et matériels de compactage), il pourra s'avérer utile d'adopter des seuils plus exigeants, mais cela ne doit pas être systématique et doit être raisonné. On pourra utilement se référer à la note d'information n° 1 de 2018 (Cerema) sur la méthodologie de mesure de la portance des plateformes.

4.2 - MATÉRIAUX DE COUCHE DE FORME

Pour qu'un matériau puisse être employé en couche de forme, il faut qu'il satisfasse aux critères définis ci-après. Certains matériaux pourront être utilisés en l'état, d'autres pourront être rendus aptes à un emploi en couche de forme moyennant une modification de leur nature et/ou de leur état par une technique appropriée décrite en 4.2.2. Une vérification des critères définis ci-après doit alors être effectuée sur le matériau élaboré.

4.2.1 - CRITÈRES À SATISFAIRE

Les critères à prendre en considération concernent :

- l'insensibilité à l'eau ;
- la dimension des plus gros éléments ;
- la résistance sous circulation des engins de chantier ;
- l'insensibilité au gel, le cas échéant ;
- les performances mécaniques pour le cas des matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.

Ces critères s'appliquent, quelle que soit la nature des matériaux (naturels, alternatifs, etc.).

Le respect de l'ensemble de ces critères est impératif dans le cas des grands chantiers. Dans les autres cas, certaines exigences telles que la traficabilité tout temps peuvent être modulées. À chaque fois, c'est à l'ingénieur géotechnicien d'apprécier les écarts admissibles en fonction des risques encourus en particulier sur les délais d'exécution.

Insensibilité à l'eau

Le matériau de couche de forme doit avoir des caractéristiques mécaniques très peu dépendantes de son état hydrique, soit à l'état naturel, soit par une modification appropriée (traitement avec de la chaux et/ou des liants hydrauliques, élimination de la fraction 0/d, etc.), de manière à garantir :

- à court terme, pour la saison prévue pour l'exécution des travaux, la circulation quasi tout temps des engins approvisionnant les matériaux de chaussée ;
- à long terme, le maintien des caractéristiques mécaniques de cette couche quel que soit l'état hydrique sous la chaussée en service.

Les critères pour déterminer l'insensibilité à l'eau des matériaux non traités diffèrent suivant la nature des matériaux (sols naturels, recyclés, mâchefers, laitiers, etc.). Ils sont définis matériau par matériau dans le fascicule 2. Pour certains matériaux alternatifs, il sera seulement précisé dans le fascicule 2 que les critères à appliquer pour déterminer l'insensibilité à l'eau sont les mêmes que ceux pour les sols naturels.

Critères

Pour les matériaux naturels qui ne satisfont pas ces critères, dans la limite d'une V_{BS} inférieure à 0,2 et d'un passant à 63 µm inférieur à 12 %, il pourra être réalisé une étude spécifique afin de démontrer l'insensibilité à l'eau du matériau. Cette étude spécifique pourra comprendre selon les enjeux :

- essais de caractérisation : Granulométrie, V_{BS} ;
- CBR immergé ;
- courbes Proctor et IPI ;
- planches d'essai avec mesure à la plaque, avant et après arrosage.

Les sols traités restent souvent sensibles à l'eau au jeune âge. Le choix du liant et de son dosage doit en tenir compte. Cette sensibilité à l'eau est appréciée à partir de la chute de résistance en compression après immersion⁹ et de la période prévisionnelle des travaux.

⁹. Des indications pour ces études sont données dans le guide technique SETRA/LCPC « Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques » GTS.

Dimension des plus gros éléments

La plus grande longueur des éléments doit permettre d'éviter la ségrégation, d'assurer un niveling de la plateforme dans les tolérances requises (en général + ou - 3 cm (cf. 4.1.3)) et, le cas échéant, un malaxage intime avec les produits de traitement.

Pour un usage en couche de forme non traitée, la L_{max} doit satisfaire en règle générale:

- $L_{max} \leq 250$ mm;
- et $L_{max} \leq 1/2$ de l'épaisseur de la couche élémentaire compactée.

Dans le cas d'une couche de forme sur une PST1 où le matériau de couche de forme sert également de blocage, la limite de 250 mm peut être exceptionnellement augmentée. Une couche de réglage doit également être prévue.

Pour rappel, au § 2.3.2, les matériaux rocheux durs présentant après extraction et/ou élaboration une L_{max} (par appréciation visuelle) inférieure ou égale à 250 mm sont classés en tant que sols grossiers.

Dans certains cas, il peut être nécessaire de prévoir une couche de réglage de 5 à 10 cm en matériaux à granulométrie plus petite et respectant les critères précédents.

Ces prescriptions s'appliquent sur la L_{max} du matériau. Pour rappel, lorsque l'on désigne un matériau par sa classe granulaire d/D , d et D sont des diamètres de particules et la plus grande longueur d'une particule peut être plus grande que son diamètre dans le cas d'une particule allongée. Dans le cas de particules de matériau n'ayant pas une forme allongée, L_{max} se rapproche du D_{max} comprise entre 1,4 D et 2 D (cf. § 2.2.1), ce qui donne approximativement les prescriptions suivantes:

Tableau 13: Épaisseur de la couche de forme élémentaire compactée en fonction du L_{max} selon le 0/D du matériau correspondant

Épaisseur de la couche élémentaire compactée de couche de forme	30 cm	35 cm	40 cm	45 cm	50 cm	60 cm
L_{max} autorisée	150 mm	175 mm	200 mm	225 mm	250 mm	250 mm
Matériau 0/D correspondant	0/90 mm	0/100 mm	0/120 mm	0/135 mm	0/150 mm	0/150 mm

Pour un usage en couche de forme traitée, la plus grande longueur des éléments doit permettre le malaxage du sol avec le ou les produit(s) de traitement, ou le réglage de la plateforme conformément aux exigences imposées. En général, on retient pour la dimension maximale les valeurs suivantes: D_{max} : 63 mm pour les matériaux devant être malaxés en centrale et 100 mm avec un malaxage en place. Des valeurs sensiblement supérieures peuvent être admises dans certains cas de chantiers en fonction de la puissance des matériels de malaxage (en place et en centrale) et de la dureté des matériaux considérés.

Résistance au trafic de chantier

Un matériau de couche de forme, utilisé sans traitement avec un liant hydraulique, doit être suffisamment résistant à la fragmentation et à l'attrition pour ne pas donner lieu, sous l'effet du compactage et du trafic, à la formation d'éléments fins en surface qui le rendraient sensible à l'eau. Cette résistance est appréciée à partir des résultats d'essais mécaniques (Los Angeles, micro-Deval en présence d'eau, friabilité des sables).

Il faut encore que sa résistance aux efforts tangentiels transmis par les pneumatiques (en accélération, virage, freinage) soit suffisante pour éviter tout risque d'enlisement (problèmes rencontrés surtout avec les matériaux granulaires homométriques roulés).

Sensibilité au gel (annexe C de NF P98-086)

L'incidence néfaste du gel s'apprécie sous deux aspects :

- la dégradation des roches et des matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques par « gélification » ;
- le gonflement au gel des sols par « cryosuccion ».

Gélification

L'action répétée du gel sur des granulats saturés d'eau peut provoquer une dégradation de ceux-ci par fragmentation ou microfissuration, particulièrement lorsqu'ils sont issus de roches poreuses. Cette sensibilité au gel est appréciée par un essai normalisé : « Résistance au gel-dégel » (norme NF EN 1367-1).

Dans le cas de matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, le gel peut provoquer la rupture de liaisons intergranulaires créées par la prise hydraulique du liant, du fait du gonflement de l'eau interstitielle au cours de sa solidification. Cette sensibilité au gel est appréciée par « l'essai de gélification des matériaux traités ». Pour que le matériau traité soit utilisable en couche de forme, la différence de résistance en traction mesurée à 28 jours, entre une éprouvette témoin et l'éprouvette soumise aux cycles de gel définis par l'essai, ne doit pas excéder 50 %.

Cryosuccion

Le phénomène de cryosuccion se traduit en présence d'eau par deux conséquences vis-à-vis de la chaussée : un gonflement du support pendant la phase de gel et, pour les sols fins sensibles à l'eau, une réduction importante de portance au moment du dégel. Cette sensibilité à la cryosuccion qualifiée de sensibilité au gel est appréciée par l'essai de laboratoire : « Essai de gonflement au gel, d'un matériau 0/20 » (norme NF P98-234-2).

Cependant, pour que la sensibilité au gel se manifeste effectivement en place, il faut par ailleurs une forte teneur en eau initiale et une possibilité d'alimentation en eau, éléments dont il sera tenu compte dans le diagnostic porté sur le risque associé au gel.

Photographie 17 : Effet du gel sur matériau fin limono-argileux.

Éprouvette de sol après un essai de gonflement au gel. La partie haute (située à gauche de la photo) est celle sollicitée par une température négative et la partie basse (à droite sur la photo) est plongée dans de l'eau à température positive. Le gradient de température provoque le phénomène de cryosuccion dans les sols très gélifs, c'est-à-dire une aspiration de l'eau libre vers les zones de température négative, et des lentilles de glace se matérialisent au niveau du front de gel (Source : Cerema)



Critères

Les matériaux de couche de forme sont considérés comme insensibles au gel s'ils vérifient les critères suivants:

- insensibilité à l'eau, selon le chapitre précédent;
- et
- insensibilité à la gélification si l'un des critères suivants est vérifié:
 - soit $LA \leq 45$ et $MDE \leq 45$ (selon NF EN 1097-2 et NF EN 1097-1),
ou
 - de catégorie F4 (essai de résistance au gel-dégel selon la norme NF EN 1367-1, essai réalisé sur la classe la plus représentative du matériau),
ou
 - $WA_{24} \leq 2\%$ (valeur d'absorption d'eau selon NF EN 1097-6, essai réalisé sur la classe la plus représentative du matériau).

Les matériaux de couche de forme traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques sont considérés comme insensibles au gel s'ils sont insensibles à la cryosuction, c'est-à-dire s'ils ont une pente p à l'essai de gonflement au gel (NF P98-234-2) inférieure ou égale à $0,05 \text{ mm}/(\text{°C h})^{1/2}$.

En l'absence de résultat d'essai de gonflement au gel, les matériaux traités à la chaux seule, à l'exception des craies et des marnes, sont considérés comme non gélifs si, à l'âge correspondant à la première apparition statistique possible du gel dans la région considérée, leur résistance à la compression simple (NF EN 13286-41) est supérieure ou égale à 2,5 MPa.

Pour les craies et les marnes, traités à la chaux seule et en l'absence de résultat d'essai de gonflement au gel, ceux-ci peuvent être considérés comme non gélifs « SGn » s'ils respectent les critères suivants:

- mouture inférieure ou égale à 20 mm;
- passant à 5 mm supérieur ou égal à 60 %;
- résistance à la compression simple (NF EN 13286-41) à l'âge correspondant à la première apparition statistique possible du gel dans la région considérée supérieure ou égale à 2,5 MPa.

En cas d'incohérence pour la classification de la sensibilité au gel entre les résultats de résistance en compression et gonflement au gel pour un même matériau, les résultats de l'essai de gonflement (NF P98-234-2) prévalent sur les autres.

En l'absence de résultat d'essai de gonflement au gel, les matériaux traités aux liants hydrauliques (éventuellement associés à la chaux), à l'exception des craies et des marnes qui ne respectent pas tous les critères suivants:

- mouture inférieure ou égale à 20 mm;
- passant à 5 mm supérieur ou égal à 60 %,

sont considérés comme non gélifs « SGn » si, à l'âge correspondant à la première apparition statistique possible du gel dans la région considérée, leur résistance à la compression diamétrale « Rit » (NF EN 13286-42) est supérieure ou égale à 0,25 MPa. En cas d'incohérence pour la classification de la sensibilité au gel entre les résultats de résistance en compression diamétrale et gonflement au gel pour un même matériau, les résultats de l'essai de gonflement (NF P98-234-2) prévalent sur les autres.

Performances mécaniques pour les sols traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques

Les performances mécaniques des matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques pour un usage en couche de forme doivent faire l'objet d'études de traitement conformément au GTS, aux normes NF P94-102-1 et NF P94-102-2 et à la norme NF EN 16907-4.

Le traitement des matériaux à la chaux seule en couche de forme est uniquement applicable pour les sols F3.

Pour les matériaux traités aux liants hydrauliques, éventuellement associés à la chaux, la classe mécanique du matériau de couche de forme se détermine à partir :

- de l'abaque de la figure 12 qui définit des zones selon les valeurs à 90 jours du module de Young (NF EN 13286-43) et de la résistance en traction directe (NF EN 13286-42) mesurés sur des éprouvettes moulées à la compacité prévisible en fond de couche (8 cm inférieurs)¹⁰ ;
- du tableau 14 relatif au mode de traitement pour tenir compte de différences dans l'homogénéité du matériau traité.

Figure 12: Classement des matériaux traités selon leurs caractéristiques mécaniques déterminées sur éprouvette à 90 jours

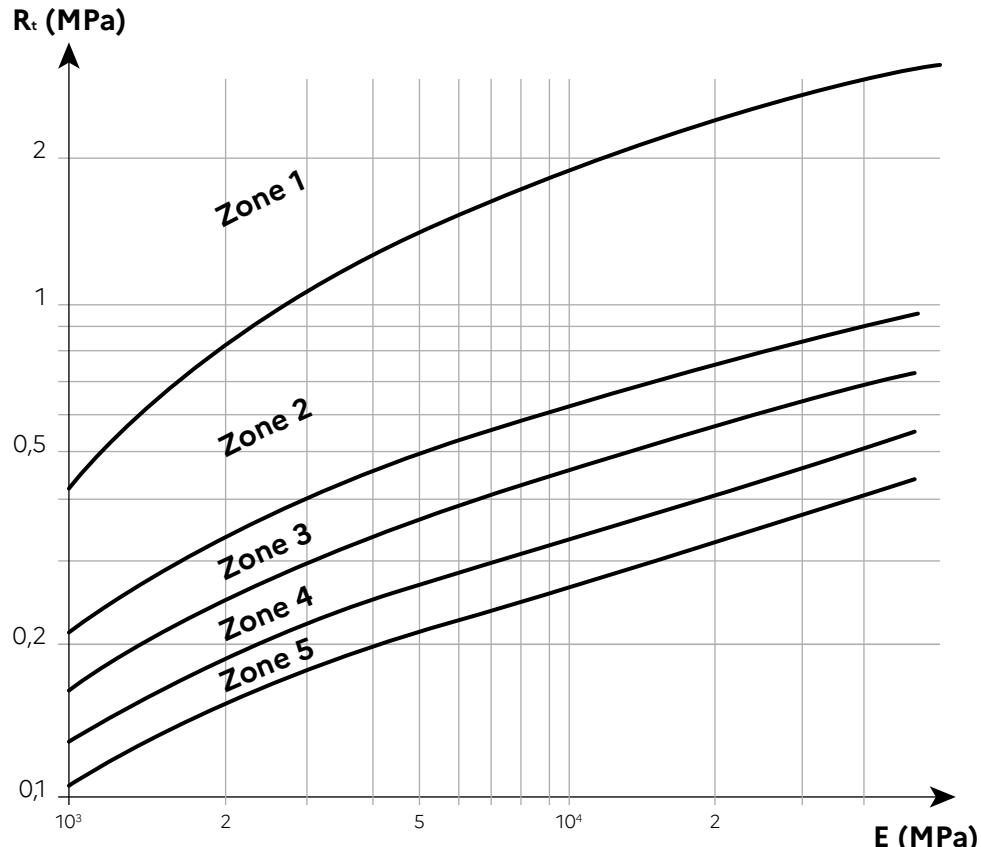


Tableau 14: Mode de traitement pour tenir compte de différences dans l'homogénéité du matériau traité

Traitement en centrale	Traitement en place	Classe mécanique selon le mode de traitement
Zone 1		1
Zone 2	Zone 1	2
Zone 3	Zone 2	3
Zone 4	Zone 3	4
Zone 5	Zone 4	5

10. a) La valeur de la compacité en fond de couche prise en considération dans l'étude de formulation doit être validée par des mesures effectuées sur une planche d'essai en début de chantier.

b) Dans le cas où l'on réalise des essais de traction par fendage, la résistance en traction directe R_t sera évaluée à partir de RTB par la relation : $R_t = 0,8 RTB$.

4.2.2 - TECHNIQUES DE PRÉPARATION ET DE PROTECTION DES MATERIAUX POUR EMPLOI EN COUCHE DE FORME

Ces techniques sont répertoriées et codifiées dans le tableau 15. Ce tableau est à l'image de celui relatif aux conditions d'utilisation des sols en remblai, mais ne comporte pas de rubrique sur les conditions de compactage. Le compactage exigé pour une couche de forme sera toujours poussé pour obtenir la qualité q3 (définie en 5.1), quels que soient les matériaux et la technique d'amélioration utilisés. Les valeurs des paramètres e et Q/S définissant le niveau de compactage requis sont données dans les tableaux de l'annexe 4 du fascicule 2.

Les techniques considérées se rangent en quatre rubriques.

Rubrique G: actions sur la granularité

Les actions suivantes peuvent être envisagées:

- l'élimination de la fraction fine sensible à l'eau 0/d par criblage dans l'état naturel ou avec lavage-débourbage. La valeur d souvent retenue est d'environ 10 mm. Des valeurs plus faibles peuvent être choisies notamment lorsque le criblage se fait par lavage. La technique peut encore s'avérer intéressante pour certains matériaux jusqu'à $d = 20$ mm. L'élimination de la fraction 0/d permet d'obtenir un matériau insensible à l'eau mais qui peut présenter une certaine instabilité sous trafic. Dans ce cas il convient de procéder à un sablage superficiel voire à une couche de fin réglage (cf. plus loin rubrique protection superficielle). Dans les cas où cette modalité est prescrite, des valeurs des coefficients LA et MDE légèrement supérieures à celles indiquées en 2.2.1 peuvent être admises sans toutefois dépasser le seuil de 50;
- l'élimination de la fraction grossière ne permettant pas le malaxage du sol avec le ou les produit(s) de traitement, ou le réglage de la plateforme conformément aux exigences imposées. En général, on retient pour la plus grande dimension (D_{max}) les valeurs suivantes: 63 mm pour les matériaux devant être malaxés en centrale et 100 mm¹¹ avec un malaxage en place. Ces valeurs dépendent de la puissance des matériels et de la dureté des matériaux considérés.
L'élimination de la fraction grossière d'un matériau peut se faire selon différents modes: concassage, fragmentation en place à l'aide de briseurs de pierres, engins à chenilles et/ou rouleaux à grilles très lourds, écrêtage par cibles mobiles, engins épierreurs, etc.;
- l'élimination à la fois de la fraction fine sensible à l'eau et de la fraction grossière;
- la fragmentation de la fraction grossière pour produire une certaine quantité d'éléments fins, afin d'obtenir l'enrobage des blocs en cas de traitement avec un liant hydraulique (cas des craies dures et moyennement dures ou des calcaires tendres).

Rubrique W: actions sur l'état hydrique

Ces actions sont très importantes pour garantir le bon compactage à l'objectif q3 pour tous les matériaux et pour assurer le bon déroulement de la prise hydraulique en cas de traitement. Le respect d'un état hydrique aussi voisin que possible de la teneur en eau à l'optimum Proctor normal, soit du mélange matériau/liant soit du matériau naturel, est indispensable pour obtenir les performances mécaniques élevées escomptables.

Les actions sur l'état hydrique envisageables sont un arrosage pour maintenir la teneur en eau durant le malaxage (pour les matériaux traités notamment) et le compactage, ou une humidification de la masse du matériau pour ramener son état hydrique de sec à moyen. Dans ce cas, il faut être conscient que les quantités d'eau peuvent être importantes car il faut, d'une part, apporter l'eau nécessaire à l'augmentation de la teneur en eau pondérale recherchée, et d'autre part compenser les pertes dues à l'évaporation durant l'homogénéisation.

¹¹. Des valeurs sensiblement supérieures peuvent être admises dans certains cas de chantiers avec des matériaux fragmentables par des malaxeurs très puissants. Des valeurs sensiblement supérieures peuvent être admises dans certains cas de chantiers avec des matériaux fragmentables par des malaxeurs très puissants.

Rubrique T: traitement

Cette rubrique rassemble les actions consistant à mélanger différents produits tels que la chaux (éventuellement sous forme de lait de chaux), des liants hydrauliques (ciment, cendres volantes, laitiers...) ou des correcteurs granulométriques, pour conférer au matériau des performances mécaniques supérieures à celles qu'il possède à l'état naturel et durables tout au long de la vie de l'ouvrage.

Cinq modalités différentes de traitement sont envisagées. Ce nombre relativement élevé traduit le fait qu'il n'est souvent pas possible de se prononcer sur la technique de traitement la plus appropriée au projet, à partir de la seule donnée de la classe de sol; il faut considérer aussi les conditions économiques.

Dans le cas du traitement avec de la chaux ou des liants hydrauliques, il convient:

- de déterminer, par une étude de laboratoire, le choix du ou des produits de traitement, les dosages nécessaires pour atteindre les performances mécaniques recherchées, et la plage de teneur en eau du mélange sol/liant dans laquelle il est réaliste d'espérer obtenir ces résistances;
- de s'assurer de la pérennité des liaisons engendrées par le traitement (non-apparition d'espèces cristallines gonflantes à moyen et long terme en particulier);
- de réaliser le traitement selon des modalités beaucoup plus rigoureuses que celles acceptables pour un traitement sans objectif de performance de long terme (utilisation d'épandeurs précis, de malaxeurs puissants à arbre horizontal et d'arroseuses réglables et fiables, élaboration éventuelle du mélange en centrale, etc.).

Photographies 18 et 19: Malaxeur à arbre horizontal garantissant une épaisseur de sol traité constante avec une bonne mouture (Source: SCSNE)



Des indications détaillées sur les modalités d'étude et d'exécution des traitements des sols appliqués à la réalisation des couches de forme sont fournies dans le guide technique « *Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques* » GTS.

Suivant la nature et l'état des matériaux, le traitement à préconiser peut être:

- un traitement aux liants hydrauliques (ciments normalisés, liants hydrauliques routiers (« LHR »), cendres volantes, laitiers broyés, etc.). Ce traitement est principalement adapté aux matériaux peu ou pas argileux voire pour certains liants hydrauliques routiers aux sols moyennement argileux. L'association de chaux pourra être retenue selon l'état hydrique;
- un traitement mixte chaux + liant hydraulique (ciment ou LHR) dans le cas des sols argileux;
- un traitement à la chaux seule. Ce traitement est plus spécialement adapté aux sols argileux et très argileux;
- un traitement associant liant hydraulique et correcteur granulométrique dans le cas de sols granulaires peu « traficables », si le bilan économique s'avère favorable par rapport au seul emploi de liant hydraulique;
- un traitement par apport d'un correcteur granulométrique. Dans ce cas, le malaxage et le dosage du correcteur n'exigent pas la même rigueur. Des techniques telles qu'un répandage du correcteur à la niveleuse et un malaxage à la charrue à disques, ou réalisé suivant la méthode dite de « dépôt-reprise » peuvent s'avérer suffisantes. Les caractéristiques du correcteur granulométrique doivent être validées par une étude géotechnique.

Le cas échéant, on prendra en compte l'effet du gel, à la fois du point de vue du délai séparant l'exécution du traitement de l'apparition des périodes de gel, et sous l'angle de la résistance mécanique à viser pour résister aux contraintes engendrées par le gel (cf. § 4.2.1).

Rubrique S : protection superficielle

Les matériaux granulaires non traités utilisables en couche de forme requièrent quelquefois une protection de surface pour leur donner une résistance suffisante aux efforts tangentiels créés par les pneumatiques des engins (accélérations, freinages, virages), ou garantir les exigences de nivellation.

Dans le cas des matériaux traités à la chaux ou aux liants hydrauliques, ce rôle se double de celui, tout aussi important, de maintenir leur état hydrique relativement constant durant la période de prise et de durcissement. Ceci impose que la protection appliquée demeure peu perméable (vis-à-vis des percolations comme de l'évaporation) pendant le temps correspondant. Des indications plus détaillées sur le choix des techniques de protection figurent spécifiquement dans le GTS2000.

D'autres objectifs peuvent être encore poursuivis avec cette protection comme la recherche d'un bon accrochage avec la couche de fondation, la réduction des poussières sous le trafic...

Suivant les matériaux de couche de forme utilisés, les techniques de protection superficielle pouvant être appliquées sont :

- un enduit de cure gravillonné ou éventuellement clouté en cas de circulation. Ce type de protection, qui fait appel à des émulsions de bitume, s'applique tout particulièrement aux matériaux traités. Le choix entre gravillonnage ou cloutage est fonction de la granulométrie du matériau (les plus fins étant cloutés). L'absence de gravillonnage peut être envisagée quand le trafic à supporter est faible et que les matériaux sont d'origine assez « charpentés »;
- une couche de fin réglage. Il s'agit d'une couche de quelques centimètres d'épaisseur, constituée d'un granulat très frottant, qui est réalisée à la surface d'une couche de forme en matériau granulaire insensible à l'eau, mais relativement grossier. Elle peut se réduire à un simple sablage superficiel (à raison de 7 à 10 l/m² d'un sable concassé 0/5) dans le cas de matériaux granulaires dont on a éliminé la fraction 0/d et dont le D_{max} est inférieur à 63 mm. Cette couche doit être constituée de matériaux adaptés aux caractéristiques des matériaux mis en couche de forme et aux objectifs de dimensionnement attendus (portance et réglage). Cette couche ne doit pas être réalisée de façon systématique.

Tableau 15: Synthèse des actions pouvant être réalisées sur un matériau mis en couche de forme

Rubrique	Code	Technique de préparation des matériaux
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Élimination de la fraction 0/d sensible à l'eau
	2	Élimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol
	3	Élimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plateforme
	4	Élimination de la fraction 0/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plateforme
	5	Fragmentation de la fraction grossière pour l'obtention d'éléments fins
W Action sur la teneur en eau	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Arrosage ou humidification pour gestion de l'état hydrique
T Traitement	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Traitement avec un liant hydraulique (ciment ou LHR)
	2	Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux
	3	Traitement mixte: chaux + liant hydraulique
	4	Traitement à la chaux seule
	5	Traitement avec un liant hydraulique et éventuellement un correcteur granulométrique
S Protection superficielle	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Enduit de cure éventuellement gravillonné
	2	Enduit de cure gravillonné éventuellement clouté
	3	Couche de fin réglage

4.2.3 - TABLEAUX DES CONDITIONS D'UTILISATION EN COUCHE DE FORME POUR LES DIFFÉRENTES CLASSES DE MATÉRIAUX

Les tableaux complets figurent dans l'annexe 3 du second fascicule. À titre d'exemple, un extrait concernant les sols G31 est reproduit ci-après (tableau 16). Ces tableaux ont une présentation analogue à celle des conditions d'utilisation des matériaux en remblai (cf. § 3.5).

Tableau 16: Exemple de tableau d'utilisation des matériaux en couche de forme - Cas des G31

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS
G11ins G21ins G31ins G41ins	<p>Ces sols insensibles à l'eau et constitués par des granulats résistants sont utilisables en couche de forme soit dans leur état naturel, soit traités avec un liant hydraulique en place ou en centrale⁵.</p> <p>L'utilisation dans leur état naturel nécessite la vérification des spécifications complémentaires pour les matériaux non traités de couche de forme (insensibilité au gel, D_{max}, cf. fascicule 1).</p>	++ ou + = ou -	pluie même forte	Utilisation en l'état
				Solution 1 : utilisation en l'état
			pas de pluie	Solution 2 : W : arrosage ou humidification pour gestion de l'état hydrique T : traitement avec un liant hydraulique S : application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné
G11 G21 G31 G41	<p>Les sols de cette classe contiennent une fraction fine en faible quantité mais cependant suffisante pour leur conférer une grande sensibilité à l'eau.</p> <p>Leur fraction grenue est résistante et ne risque donc pas de se broyer sous l'action du trafic. Pour utiliser ces sols en couche de forme deux solutions sont applicables :</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Éliminer par tout moyen ad hoc la fraction o/d responsable de la sensibilité à l'eau. Le matériau ainsi élaboré devient insensible à l'eau. Il faut alors se reporter à la classe du matériau élaboré. Ce dernier doit alors vérifier les spécifications complémentaires pour les matériaux non traités de couche de forme (résistance mécanique, insensibilité au gel, D_{max}, cf. fascicule 1). Il est toutefois conseillé de répandre en surface une couche de fin réglage de 2 à 3 cm d'épaisseur d'un granulat frottant pour améliorer la traficabilité. b) Traiter ces matériaux avec les liants hydrauliques en place (ou en centrale lorsqu'ils sont dans un état moyen ou sec)⁶. 	+ = ou -	pluie faible	Situation météorologique ne permettant pas une mise en œuvre correcte.
			pas de pluie	W : arrosage ou humidification pour gestion de l'état hydrique T : traitement avec un liant hydraulique S : application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné

On peut tirer de l'examen de cet extrait de tableau que :

- dans le cas des sols de la classe G31, la possibilité existe d'utiliser ces matériaux à condition d'en éliminer la fraction 0/d, ce qui a pour effet de les rendre insensibles à l'eau ;
- chaque fois qu'un matériau peut être employé sans traitement avec un liant, une solution est aussi proposée avec traitement. Ces deux solutions ne sont évidemment pas équivalentes techniquement et économiquement. Il revient au projeteur de choisir en fonction de la stratégie qu'il s'est donnée ;
- l'utilisation en couche de forme de matériaux traités avec un liant n'est en principe pas autorisée par pluie même faible en raison de la nécessité d'avoir la maîtrise de l'état hydrique du mélange sol + liant.

4.3 - DIMENSIONNEMENT DE LA COUCHE DE FORME

4.3.1 - NOTIONS DE COURT TERME / LONG TERME

La démarche de conception développée dans le GTR considère à la fois les caractéristiques de court terme, fréquemment associées aux conditions observées lors des travaux, et celles de long terme, c'est-à-dire représentatives des conditions escomptables pendant toute la vie de l'ouvrage.

a) Les caractéristiques dites à court terme peuvent dépendre de la période d'observation, notamment en ce qui concerne l'état hydrique des matériaux. Elles sont souvent favorables en conditions estivales et défavorables en conditions hivernales. Ces variations peuvent modifier les conditions de réalisation des travaux si elles diffèrent de celles identifiées lors des études géotechniques, et nécessiter des dispositions d'aménagement telles que le drainage provisoire ou définitif, le traitement des sols ou des modifications dans le mouvement des terres et le choix des matériaux.

b) Les caractéristiques dites à long terme visent à modéliser les valeurs minimales de portance, escomptables pendant la durée de service de la structure. Elles qualifient les classes de portance des arases (« AR ») et de plateformes (« PF »). Elles sont associées à des valeurs de module de déformabilité minimales, représentatives des conditions défavorables que pourra connaître la structure en considérant son environnement, les variations météorologiques et les dispositions d'aménagement retenues. Ces valeurs minimales sont utilisées pour dimensionner les structures qui seront construites sur la plateforme résultante. Le dimensionnement de l'AR et la PF résulte de l'étude de conception et ne dépend pas des conditions de travaux : il s'agit d'un choix opéré par le géotechnicien, l'équipe de conception et le maître d'ouvrage.

Les cas de PST sont ainsi considérés à court terme par rapport à la nature et à l'état hydrique des matériaux lors de la période d'observation. La portance qui en résulte à court terme reflète l'état hydrique et la qualité de l'état de surface au moment des travaux. Dans le cas de sols sensibles à l'eau, celle-ci peut évoluer à long terme.

Mesure de la portance des couples PST/AR

Les classes d'arase définies au § 4.3.3 impliquent, en fonction des classes de sols et de leurs états hydriques, des dispositifs d'amélioration des matériaux, de drainage ou d'imperméabilisation et une portance long terme minimale associée.

Cette portance long terme des classes d'arase ARi est celle escomptée durant la durée de vie de la chaussée et prise en compte pour le dimensionnement des couples ARi/PFi dans le cas de la mise en œuvre de couches de forme. Les valeurs peuvent être garanties si toutes les règles précisées dans le GTR 2023 sont respectées et contrôlées.

En phase chantier, la portance des arases mesurée à court terme doit être supérieure ou égale à la valeur du module préconisé à long terme. Dans le cas des PST1 à 3, compte tenu de la sensibilité à l'eau des matériaux de l'arase, il est nécessaire de contrôler la portance peu de temps avant la mise en œuvre des couches de recouvrement (couche de forme ou couches de chaussée).

Dans le cas de la PST4 où l'amélioration de l'arase par traitement est considérée durable, la mesure des portances peut être réalisée par anticipation à la mise en œuvre des couches de recouvrement. Toutefois, dans un contexte de chantier susceptible de recouvrir des épisodes climatiques agressifs (périodes hivernales) et/ou une circulation de chantier intense, il est recommandé de reconstruire la conformité de la portance peu de temps avant l'application de la couche de forme ou des couches de chaussée. De plus, la mise en œuvre d'une protection de surface et voire mécanique de l'arase est conseillée dans ce contexte.

Dans le cas des PST5 et PST6 constituées de matériaux insensibles à l'eau, les mesures de portance court terme sont assimilées aux portances long terme et peuvent être anticipées. Il n'est pas nécessaire de les reconstruire avant application des couches de forme ou des structures de chaussées.

D'une manière générale, il est conseillé de réaliser un contrôle de portance des arases au plus proche de la mise en œuvre des couches supérieures.

Mesure de la portance des Plateformes PFi

Les modules des classes PFi définis au § 4.3.4 sont ceux pris en compte pour le calcul et le dimensionnement de la structure de chaussée et correspondent aux performances minimales prévues pour la durée de vie de la chaussée.

En phase chantier, les mesures de portance court terme des plateformes doivent être réalisées à l'avancement de la couche de forme, non seulement pour confirmer que le niveau de module de dimensionnement long terme retenu est atteint, mais également en vue de détecter d'éventuelles anomalies et permettre des actions correctives.

Dans le cas où les plateformes préalablement réceptionnées en portance sont susceptibles de subir des conditions climatiques agressives (conditions hivernales) ou des trafics de chantier importants, un critère de réception minimale court terme supérieur au module long terme de dimensionnement peut s'avérer nécessaire. La portance court terme à définir doit alors faire l'objet d'une analyse en phase projet tenant compte de la planification des travaux et des sollicitations locales ou générales des plateformes (forme et trafic de chantier). De plus, la mise en œuvre d'une protection de surface et mécanique des couches de forme est fortement conseillée dans ce contexte.

Action du traitement des matériaux à la chaux ou au liant hydraulique

L'action des liants sur le sol dépend de :

- la nature du sol;
- la nature de la composition du liant et de son dosage;
- le taux de compactage atteint à la mise en œuvre;
- l'âge et la qualité du mélange;
- et
- des sollicitations extérieures (infiltration d'eau, température, vibrations, etc.).

Le traitement de sol peut avoir deux objectifs différents : l'amélioration ou la stabilisation.

Amélioration

C'est une opération qui consiste à améliorer, par addition d'un liant, les propriétés physiques du sol telles que la teneur en eau naturelle, la plasticité, l'aptitude au compactage. L'amélioration d'un matériau est recherchée pour une action à court terme afin de permettre la traficabilité et la mise en œuvre.

Dans l'utilisation du tableau de PST/AR, les sols traités dans un objectif d'amélioration seront considérés comme les matériaux non traités.

Stabilisation

C'est une opération consistant à modifier (généralement à moyen ou long terme) les caractéristiques du sol de manière à l'amener dans un état définitif de stabilité, en particulier vis-à-vis de l'action de l'eau et du gel, et à lui donner une résistance durable pouvant, le cas échéant, être mesurée par des essais typiques de matériaux solides.

La stabilisation d'un matériau est recherchée pour une action à long terme et est intégrée dans le dimensionnement de la partie d'ouvrage considérée. L'objectif de stabilisation est indispensable pour le classement en PST4.

4.3.2 - DÉMARCHE POUR FIXER L'ÉPAISSEUR

L'épaisseur de la couche de forme est déterminée par deux critères de dimensionnement:

- la portance à long terme de la plateforme;
- la protection au gel de la structure supportée.

Dimensionnement vis-à-vis de la portance à long terme

L'épaisseur de la couche de forme est déterminée au terme de la démarche suivante: la classification géotechnique des sols et les conditions hydrauliques intéressant le mètre supérieur supportant la couche de forme, zone appelée PST, permettent de distinguer sept cas, présentés dans le tableau 17 (cf. § 4.3.3).

À chaque PST est associée une ou deux classe(s) de portance à long terme de l'arase de terrassement, notée(s) ARI. Des classes d'objectif de portance à long terme sont définies dans le § 4.3.4.

Pour chaque cas de PST et pour les différents matériaux de couche de forme, il est alors préconisé des épaisseurs de couche de forme suivant l'objectif de plateforme (cf. § 4.3.5).

Dimensionnement vis-à-vis du gel

Pour les chaussées, le dimensionnement de l'épaisseur de la couche de forme est aussi fonction du calcul de dimensionnement au gel. Pour faire ce dimensionnement, le chargé d'étude géotechnicien devra avoir une caractérisation par un géotechnicien de la sensibilité au gel des matériaux de la PST (cf. fascicule 2, annexe 3).

La méthode de calcul de l'épaisseur de la couche de forme pour protéger les chaussées vis-à-vis du gel est donnée dans la norme NF P98-086 Dimensionnement des structures de chaussées.

Optimisation de la structure

Le calcul de la structure de chaussée et la vérification au gel menés avec cette plateforme, ou l'étude économique de l'ensemble terrassement-couche de forme-chaussée, pourront conduire à retenir une couche de forme de nature différente et d'épaisseur supérieure pour obtenir une plateforme de meilleure portance. Pour faire cette étude d'optimisation, il faudra effectuer une étude spécifique pour préciser les caractéristiques mécaniques et les coûts des matériaux de couche de forme possibles, et d'autre part se référer aux documents de dimensionnement des chaussées.

4.3.3 - LES DIFFÉRENTS CAS DE PARTIE SUPÉRIEURE DE TERRASSEMENT (« PST »)

Le tableau 17 distingue, selon la nature des matériaux et l'environnement hydrique, sept catégories de PST, notées de PST0 à PST6. Le cas de la PST0 correspond à une situation impropre à la réalisation d'une plateforme.

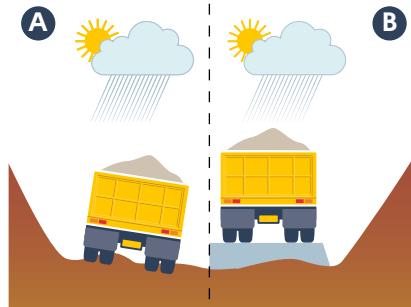
Photographie 20: Cas typique d'une PST0 impropre à la circulation de chantier et à la mise en œuvre d'une couche de forme (Source: SCSNE)

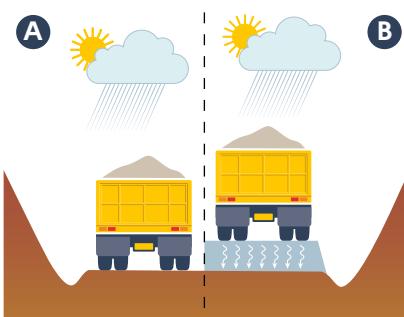
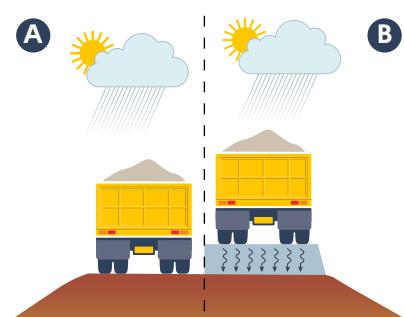


Les classes de portance de l'arase de terrassement introduites pour chaque cas de PST sont associées aux caractéristiques du sol-support dites à long terme, c'est-à-dire représentatives des conditions hydriques défavorables que pourra connaître la plateforme, pendant la durée de service de la chaussée (à l'exception de la problématique de gel-dégel traité à part). Le choix entre les classes ARI proposées est à faire selon les indications données dans la colonne commentaires du tableau.

Commentaires : Dans le cas de matériaux insensibles ou rendus insensibles à l'eau, ce qui est le cas des PST4, 5 et 6, la portance à long terme au niveau de l'arase terrassement peut être valablement appréciée par des mesures de portance (ou déformabilité) réalisées avant la mise en œuvre de la couche de forme. Dans le cas de matériaux sensibles à l'eau, il sera souvent difficile d'être en mesure de déterminer par avance quelles seront ces caractéristiques à long terme. L'état hydrique est variable avec les saisons et sera influencé par les dispositions constructives du projet: la configuration géométrique de la chaussée et la topographie des lieux, l'efficacité des mesures de drainage, la perméabilité des couches de chaussée et des accotements, etc.

Tableau 17: Synoptique des PST et des arases

Cas de PST	Schémas	Description	Commentaires et dispositions constructives	Classe de l'arase Portance à long terme
PST0		<p>Sols F1, F2, F3, F4, G1, G2, G3, G4, S1, S2, S3, S4, I1, I2, VC2 se trouvant dans un état hydrique (th)</p> <p>Contexte Profil rasant avec une nappe subaffleurante, ou en déblai dans des matériaux très humides. PST dont la portance risque d'être quasi nulle au moment de la réalisation des travaux.</p>	<p>Une PST0 ne permet pas la réalisation d'une couche de forme et nécessite un reclassement.</p> <p>En phase chantier, des dispositifs de type drainage, purge, substitution ou traitement avec un liant adapté sont nécessaires de manière à pouvoir reclasser la PST en PST1, 2, 3 ou 4.</p> <p>Un dispositif de rabattement de nappe peut s'avérer nécessaire.</p> <p>Un dispositif de drainage définitif est fortement conseillé.</p>	AR0
PST1		<p>Sols F1, F2, F3, F4, I2, VC2, R5 Cl, G1, G2, G3, G4, S1, S2, S3, S4, I1, VC2, CH3, CH4 et certains matériaux VC1, R5 Sa, R5 Co, R5 Vo et R5 Me dans un état hydrique (h).</p> <p>Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau de mauvaise portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A) et sans possibilité d'amélioration à long terme (B). Ce cas peut se présenter en remblai de faible hauteur ou en déblai.</p>	<p>Dans ce cas de PST, il convient:</p> <ul style="list-style-type: none"> soit de procéder à une amélioration du matériau sur une épaisseur adaptée par un traitement à la chaux ou aux liants hydrauliques. On est ramené au cas de PST2, 3 ou 4 selon le contexte et les conditions du traitement; soit d'exécuter une couche de forme en matériau granulaire insensible à l'eau de forte épaisseur (on reste dans le cas PST1). Cette disposition nécessite néanmoins une portance minimale de 15 à 20 MPa pour la mise en œuvre de la couche de forme. Si la portance à court terme est inférieure à 15 à 20 MPa, on est ramené au cas de PST0 et donc une amélioration de la PST est indispensable. <p>Il n'est pas possible de réaliser une couche de forme traitée sur une PST de cette classe. Pour une couche de forme traitée, il faut se ramener à un cas de PST supérieur.</p> <p>En déblai ou en profil rasant, un drainage de la PST est conseillé.</p>	AR1 20 MPa

Cas de PST	Schémas	Description	Commentaires et dispositions constructives	Classe de l'arase Portance à long terme
PST2		<p>Sols F1, F2, F3, F4, I2, VC2, R5 Cl, G1, G2, G3, G4, S1, S2, S3, S4, I1, VC2, CH3, CH4 et certains matériaux VC1, R5 Sa, R5 Co, R5 Vo et R5 Me dans un état hydrique (m) ou (s).</p> <p>Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A), mais pouvant chuter à long terme sous l'action de l'infiltration des eaux pluviales et d'une remontée de la nappe (B). Ce cas de PST comprend les sols sensibles à l'eau traités dans un but d'amélioration uniquement (qui ne permet pas le reclassement en PST4).</p>	<p>Bien que les exigences requises à court terme pour la plateforme support puissent être éventuellement obtenues au niveau de l'arase, il est cependant nécessaire de prévoir la réalisation d'une couche de forme. Le dimensionnement de l'épaisseur de la couche de forme prend en compte la possibilité de chute de portance à long terme.</p> <p>Si l'on peut réaliser un rabattement de la nappe à une profondeur suffisante et un drainage des eaux d'infiltration, on est ramené au cas de PST3. Si le drainage n'est pas suffisant, le classement est maintenu en PST2 (pour des matériaux F3 ou F4 on reste dans le cas PST2). Le risque de remontée de nappe doit être pris en compte dans le comportement de la couche de forme.</p>	AR1 20 MPa
PST3		<p>Sols F1, F2, F3, F4, I2, VC2, R5 Cl, G1, G2, G3, G4, S1, S2, S3, S4, I1, VC2, CH3, CH4 et certains matériaux VC1, R5 Sa, R5 Co, R5 Vo et R5 Me dans un état hydrique (m) ou (s).</p> <p>Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A), mais pouvant baisser à long terme sous l'action de l'infiltration des eaux pluviales (B). Ce cas se présente en l'absence de risque de remontée de la nappe dans la PST:<ul style="list-style-type: none"> • soit en remblai; • soit en déblai ou profils rasants avec des dispositifs de drainage profond de la PST. Ce cas de PST comprend les sols sensibles à l'eau traités dans un but d'amélioration uniquement (qui ne permet pas le reclassement en PST4).</p>	<p>Bien que les exigences requises à court terme pour la plateforme support puissent être éventuellement obtenues au niveau de l'arase, il est cependant nécessaire de prévoir la réalisation d'une couche de forme.</p> <p>En remblai: le classement de l'arase en AR2 nécessite que les matériaux soient à l'état m et des dispositions constructives de drainage à la base de la chaussée et d'imperméabilisation de l'arase permettant d'évacuer les eaux et d'éviter leur infiltration dans la PST. Le classement d'arase sera alors évalué selon la nature des matériaux (en général les sols fins ne permettent pas d'accéder en l'état à une AR2). Dans le cas contraire, le classement de l'arase sera AR1.</p> <p>Pour un sol dans un état hydrique (s), on sera limité au cas de l'AR1.</p> <p>En déblai ou profils rasants: en l'absence d'un drainage profond de la PST permettant un rabattement de la nappe, on sera limité au cas de la PST2. Dans le cas d'un drainage de la PST permettant de drainer les eaux en pied de talus ou les eaux de ruissellement et/ou d'infiltration, l'évaluation de la classe d'arase en AR1 ou AR2 sera similaire au cas des remblais.</p>	AR1 20 MPa AR2 50 MPa

Cas de PST	Schémas	Description	Commentaires et dispositions constructives	Classe de l'arase Portance à long terme
PST4		<p>Sols F, G1, G2, G3, G4, S1, S2, S3, S4, I1, I2, VC2, CH3, CH4, R5 Cl et certains matériaux VC1, R5 Sa, R5 Co, R5 Vo et R5 Me</p> <p>Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau stabilisés par un traitement à la chaux ou aux liants hydrauliques sur une épaisseur adaptée avec un minimum de 0,35 m. Dans le cas d'une PST1, un traitement en deux couches est nécessaire (0,70 m minimum) pour atteindre une PST4.</p>	<p>La durabilité du traitement est assurée par:</p> <ul style="list-style-type: none"> la vérification des performances par une étude appropriée et le contrôle d'exécution; une épaisseur de sol traité suffisamment dimensionnée; une finesse de mouture de la fraction fine du mélange 0/40 mm max; un dispositif de drainage approprié de la PST en déblai. <p>La portance de l'arase peut être localement élevée mais n'autorise pas un classement supérieur.</p> <p>La décision de réaliser une couche de forme sur cette PST dépend du projet</p>	AR2 50 MPa
PST5		<p>Sols S1ins, S2ins, S3ins, S4ins, et certains matériaux de la classe R5 Sa.</p> <p>Contexte PST en matériaux sableux fins insensibles à l'eau, posant des problèmes de traficabilité. Ce cas se présente en remblai ou en déblai en l'absence de risque de remontée de la nappe dans la PST.</p>	<p>Le drainage des sols-supports est à évaluer selon le contexte hydrogéologique. Il n'est en général pas nécessaire.</p> <p>La portance de l'arase de cette PST dépend beaucoup de la nature des matériaux.</p> <p>Les valeurs de portance à long terme peuvent être assimilées aux valeurs mesurées à court terme.</p> <p>La nécessité d'une couche de forme sur cette PST ne s'impose que pour satisfaire les exigences de traficabilité et peut se réduire à une couche de réglage.</p>	AR2 50 MPa AR3 120 MPa
PST6		<p>Sols G1ins, G2ins, G3ins, G4ins, CH1, CH2, R1, R2, R3 Cl, R3 Li, R3 Sa, R3 Co, R3 Vo, R3 Me, R4 Cl, R4 Li, R4 Sa, R4 Co, R4 Vo, R4 Me ainsi que certains matériaux VC1, R5 Li, R5 Co et R5 Vo.</p> <p>Contexte PST en matériaux graveleux ou rocheux insensibles à l'eau, posant des problèmes de réglage et/ou de traficabilité. Ce cas se présente en remblai ou en déblai.</p>	<p>Le drainage des déblais rocheux ne s'impose que pour éviter que l'eau s'accumule ou surgisse au travers de la structure de chaussée (cas de chaussées sur pente, déblai en milieu rocheux fracturé et lorsque la présence d'eau est avérée).</p> <p>Les valeurs de portance à long terme peuvent être assimilées aux valeurs mesurées à court terme.</p> <p>Si les sols présents en PST ont des caractéristiques de matériaux de couche de forme, alors la nécessité de cette dernière ne s'impose que pour les exigences à court terme (nivellation et traficabilité) et peut donc se réduire à une couche de fin réglage.</p>	AR2 50 MPa AR3 120 MPa

Nota: une portance minimale de 35 MPa au niveau de l'arase terrassement est nécessaire pour mettre en œuvre une couche de forme en matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques.

4.3.4 - PORTANCE À LONG TERME DE LA PLATEFORME

Pour le dimensionnement des structures de chaussée, la portance à long terme de la plateforme support de chaussée est déterminée à partir du couple PST - couche de forme.

Rappelons que la norme « Dimensionnement des structures de chaussées neuves » NF P98 086 de 2011 a divisé la classe « initiale » PF2 en deux classes : la PF2 (entre 50 et 80 MPa) et la PF2qs (PF2 de qualité supérieure, entre 80 et 120 MPa).

On distingue donc cinq classes de portance des plateformes définies par des plages de valeur de module de déformation réversible, selon le découpage donné par le tableau 18.

Tableau 18: Classement des PF

Module (MPa)	20 MPa	50 MPa	80 MPa	120 MPa	200 MPa	
Classe de plateforme		PF1	PF2	PF2qs	PF3	PF4

Le classement de la plateforme s'effectue ainsi :

- lorsque la couche de forme a au moins l'épaisseur préconisée par les tableaux du § 4.3.5, la classe de la plateforme est indiquée dans ces mêmes tableaux selon la PST et la nature de la couche de forme ;
- si l'épaisseur de la couche de forme est inférieure à la valeur préconisée, la classe de la plateforme à retenir est celle de la classe de l'arase de terrassement.

D'après les tableaux du § 4.3.5, on relève que la mise en œuvre d'une couche de forme ayant au moins l'épaisseur préconisée conduit à une plateforme PF2 minimum.

Le cas d'une plateforme PF1 peut être rencontré lorsque l'épaisseur de couche de forme mise en œuvre sur les cas de PST1, 2 ou 3 est inférieure à la valeur préconisée. Cette plateforme est en pratique peu utilisée, voire non recommandée pour les infrastructures routières. Elle est limitée aux cas de voiries légères telles que pistes cyclables, voies vertes, etc.

Pour les couches de forme en matériaux traités aux liants hydrauliques, une étude technico-économique est recommandée pour examiner si un reclassement de la plateforme en PF3 ou PF4 (cf. § 4.3.5.2) ne peut pas être obtenu moyennant une augmentation de l'épaisseur indiquée dans les tableaux.

Commentaires : Relation avec l'application de la norme NF P98-086 pour le calcul des structures de chaussées. Pour les classes de plateforme définies précédemment, on retiendra, comme module de Young dans le calcul représentant l'effet mécanique de la plateforme support de chaussée, les valeurs correspondant à la limite basse de la classe (tableau 19).

Tableau 19: Choix des modules de Young pour calcul des structures de chaussées

Module de calcul (MPa)	20	50	80	120	200
Classe de plateforme	PF1	PF2	PF2qs	PF3	PF4

Rappelons que l'épaisseur n'est pas le seul critère pour garantir la classe de PF. La régularité et la conformité des matériaux, la qualité du compactage, les dispositifs associés sont tous aussi importants pour garantir la durabilité des performances.

Nota: Une PST AR2 ne répond pas forcément aux caractéristiques d'une PF2.

4.3.5 - RÈGLES DE DIMENSIONNEMENT DES COUCHES DE FORME

4.3.5.1 - Dimensionnement des couches de forme en matériaux non traités

L'épaisseur préconisée pour la couche de forme est fixée de sorte qu'elle :

- satisfasse aux divers critères de résistance permettant une mise en œuvre correcte des couches de chaussée ;
- assure la pérennité d'une valeur minimale de portance à long terme de la plateforme.

Cette épaisseur préconisée dépend :

- du cas de PST et de la portance à long terme au niveau de l'arase des terrassements ;
- des caractéristiques du matériau constituant la couche de forme.

Les valeurs proposées viennent de l'expérience de chantier et correspondent à des trafics courants de chantier (limités à l'approvisionnement des matériaux de la couche de fondation). Dans le cas de trafics plus élevés, on majorera les épaisseurs préconisées de 10 à 20 cm.

Pour le cas de la PST1, les épaisseurs de couche de forme préconisées en matériaux granulaires non traités supposent une portance minimale au niveau de l'arase des terrassements de l'ordre de 15 à 20 MPa au moment de l'exécution.

Les matériaux utilisés pour la réalisation des couches de forme non traitées doivent répondre aux critères d'acceptation en couche de forme définis dans le § 4.2.

Les performances des matériaux de couche de forme dépendent de plusieurs paramètres de nature qui ont une influence sur leur module :

- **le D_{max} du matériau**: au-delà d'un D_{max} de 150 mm, une attention particulière devra être apportée sur les problèmes de ségrégation pour une utilisation en couche de forme ;
- **la forme de la courbe granulométrique**: les matériaux présentant une courbe granulométrique étalée permettent d'obtenir de meilleures portances grâce à une meilleure densification ;
- **la nature du matériau**: les matériaux d'origine magmatique sont plus résistants à l'attrition que les matériaux calcaires et gréseux, ce qui les rend plus difficiles à densifier et donc moins favorables pour l'obtention de portances élevées.

Dans le cas des objectifs PF2qs et PF3, il est intéressant de s'intéresser à ces paramètres. Ceci peut impliquer une démarche d'élaboration du matériau. L'obtention d'une PF3 est notamment très dépendante de la nature des matériaux.

Le dimensionnement des épaisseurs de couche de forme nécessite donc une connaissance des matériaux utilisés. Les paragraphes suivants proposent des seuils pour le dimensionnement des épaisseurs de couche de forme à utiliser suivant le niveau de connaissance des matériaux qui seront utilisés.

Règles sécuritaires de dimensionnement des plateformes

Dans le cas où les matériaux utilisés ne sont pas connus, les épaisseurs de couche de forme sont données dans le tableau suivant. Ces valeurs sont des valeurs sécuritaires qui garantissent l'obtention des performances visées :

Tableau 20: Règles sécuritaires d'épaisseur en cm de couche de forme non traitée

Classes de PST/AR	PST1	AR1		AR2				AR3	
		PST2	PST3	PST3	PST4	PST5	PST6	PST5	PST6
PF2	75 ⁽²⁾	50	40	30 ⁽¹⁾	(3)	(3)	(3)	-	-
PF2qs	100 ⁽²⁾	75	65	40	40	40	40	-	-
PF3	Certains matériaux granulaires ne permettent pas l'obtention d'une PF3 sans un traitement aux LHR; il n'est donc pas possible de proposer des épaisseurs de couche de forme qui garantissent l'obtention d'une PF3 quels que soient les matériaux. Pour le dimensionnement d'une PF3, il faut se référer aux règles d'optimisations des plateformes.							(3)	(3)

(1) Dans ce cas, la réalisation d'une couche de forme est obligatoire et il est généralement économiquement plus intéressant de chercher à obtenir au minimum une PF2qs.
(2) Dans ce cas, l'intercalation d'un géotextile de séparation/filtration entre la couche de forme en matériaux granulaires et le sol sensible à l'eau humide permet de sauvegarder les caractéristiques du matériau granulaire et de réduire ainsi l'épaisseur de la couche de forme de 10 cm.
(3) Si les sols présents en PST ont des caractéristiques de matériaux de couche de forme vérifiées par une étude appropriée, la couche de forme peut se limiter à une couche de réglage de 10 à 15 cm (GNT avec $D \leq 31,5$ mm) pour tenir les exigences de nivellement et résoudre les problèmes de traficabilité.

Règles d'optimisation des plateformes

Des performances plus élevées peuvent être obtenues avec des épaisseurs moindres que celles présentées dans le tableau précédent suivant la nature des matériaux de couche de forme dans le cas où les matériaux utilisés en couche de forme sont connus.

La prise en compte d'une classe de plateforme support de chaussée dans le dimensionnement de la chaussée à partir de retours d'expériences validés ou de planches d'essai pour détermination du module intrinsèque est possible en respectant les épaisseurs minimales définies dans le tableau suivant :

Tableau 21: Épaisseur minimale en cm de couche de forme non traitée dans le cas d'une optimisation

Classes de PST/AR	PST1	AR1		AR2				AR3	
		PST2	PST3	PST3	PST4	PST5	PST6	PST5	PST6
PF2	60 ⁽³⁾	50	35	25	(2)	(2)		-	-
PF2qs	75 ⁽³⁾	65	55	35	30	35		-	-
PF3⁽¹⁾		90	80	50				(2)	(2)

(1) Certains matériaux granulaires ne permettent pas l'obtention d'une PF3 sans un traitement aux LHR.
(2) Si les sols présents en PST ont des caractéristiques de matériaux de couche de forme, la couche de forme peut se limiter à une couche de réglage de 10 à 15 cm (GNT avec $D \leq 31,5$ mm).
(3) Dans ce cas, l'intercalation d'un géotextile de séparation/filtration entre la couche de forme en matériaux granulaires et le sol sensible à l'eau humide permet de sauvegarder les caractéristiques du matériau granulaire et de réduire ainsi l'épaisseur de la couche de forme de 10 cm.

4.3.5.2 - Dimensionnement des couches de forme en matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques

Dans le cas d'une couche de forme traitée à la chaux et/ou aux liants hydrauliques, les performances du mélange sol-liant devront être vérifiées avec une étude de traitement suivant les recommandations du GTS. Une couche de forme en matériaux traitée n'est pas conseillée sur une PST2 à cause du risque, en cas de remontée de nappe, d'endommager la couche de forme. Afin de garantir la pérennité de la couche de forme traitée, il est recommandé de la réaliser au moins sur une PST3. De plus, une portance minimale de 35 MPa est requise à court terme sur l'arase pour assurer la bonne mise en œuvre des matériaux de la couche de forme traitée.

Couches de forme en matériaux traités à la chaux seule

La réalisation d'une couche de forme en matériaux traités à la chaux seule n'est pas fréquente en France. Elle a été appliquée avec succès, par exemple dans les années quatre-vingt sur le chantier de l'autoroute A4 en utilisant des marnes du Keuper (Schaeffner et Causero, 1989).

Les matériaux considérés ici sont les matériaux F3 traités à la chaux seule. Les règles de dimensionnement correspondant aux couches de forme réalisées avec ces matériaux sont présentées dans le tableau suivant:

Tableau 22: Dimensionnement couche de forme en matériaux traités à la chaux seule

Classe AR	AR1			AR2		
Portance court terme	35 MPa			50 MPa		
Épaisseur couche de forme	50 ⁽²⁾	60 ⁽²⁾	70 ⁽²⁾	⁽¹⁾	45 ⁽²⁾	50 ⁽²⁾
Classe de plateforme	PF2	PF2qs	PF3	PF2	PF2qs	PF3

(1) Solution de couche de forme peu appropriée sauf à vouloir rechercher un dimensionnement en PF2qs ou PF3.
(2) L'obtention de la compacité recherchée en fond de couche conduit généralement à une mise en œuvre en 2 couches.

Couches de forme en matériaux traités aux liants hydrauliques éventuellement associés à la chaux

Pour un emploi avec traitement mixte : chaux/ciment, chaux/liants hydrauliques ou liants hydrauliques seuls, il est généralement possible, moyennant des conditions d'exécution et un dosage adaptés, d'atteindre des valeurs de portance élevées et d'obtenir une plateforme de classe PF3 voire PF4. Les matériaux traités sont issus des classes F, I, S, G et VC lorsque la faisabilité du traitement est acquise. L'épaisseur de la couche de forme (réalisée avec ces matériaux) à mettre en œuvre et le classement de la plateforme dépendent :

- de la classe de portance du sol-support;
- de la classe mécanique du matériau traité (dépendant des performances en laboratoire et du mode de traitement);
- de la qualité d'exécution.

Les épaisseurs de couche de forme en matériaux traités aux liants hydrauliques éventuellement associés à la chaux sont données dans le tableau suivant :

Tableau 23: Dimensionnement des couches de formes traitées aux liants éventuellement associés à la chaux

Classe AR	AR1					AR2		
Portance court terme	35 MPa					50 MPa		
Classe mécanique	3			30	40 ⁽¹⁾		25	30
	4	30	35	35	45 ⁽¹⁾	25	30	35
	5	35	45 ⁽¹⁾	50 ⁽¹⁾	55 ⁽¹⁾	30	35	45 ⁽¹⁾
Classe de plateforme	PF2	PF2qs	PF3	PF4	PF2qs	PF3	PF3	PF4

(1) L'obtention de la compacité recherchée en fond de couche conduit généralement à une mise en œuvre en 2 couches.

CHAPITRE 5

Compactage des remblais et des couches de forme

COMPACTAGE DES REMBLAIS ET DES COUCHES DE FORME

Les tableaux de compactage de l'annexe 4 et les indications mentionnées ci-après (cf. 5.4) donnent les conditions qui assurent la cohérence entre les facteurs définissant le cas de compactage, à savoir:

- le matériau tel que défini par la classification;
- le matériel de compactage utilisé (type d'engin, paramètres de construction et de fonctionnement, mode d'emploi);
- l'épaisseur compactée;
- l'objectif de compactage.

Cette approche est en accord avec la procédure de contrôle « en continu » des conditions de réalisation du compactage, dont l'intérêt par rapport au contrôle par mesure *in situ* de la masse volumique n'est plus à démontrer.

5.1 - PRESCRIPTIONS POUR LE COMPACTAGE

Les prescriptions pour le compactage sont fixées selon la nature des ouvrages, afin de:

- limiter les tassements des corps de remblai et assurer leur stabilité;
- obtenir des caractéristiques suffisantes de raideur et de résistance pour les couches de forme.

Deux objectifs de densification, désignés symboliquement par q3 et q4¹² sont définis:

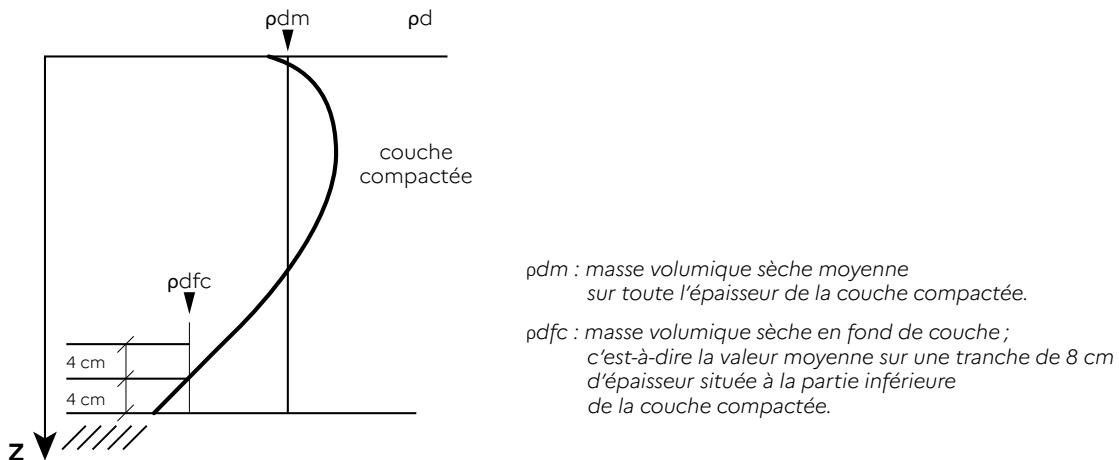
- q3: objectif ordinairement requis pour les couches de forme;
- q4: objectif ordinairement requis pour les remblais et de la PST.

Les prescriptions données dans les tableaux de compactage correspondent à la définition des modalités d'utilisation des compacteurs pour chaque couple : matériau/matériel.

Ces prescriptions ont été fixées à partir de nombreuses planches expérimentales accompagnées de mesures précises et répétées de la masse volumique en place, de l'observation du comportement d'ouvrages et d'un modèle mathématique calé sur ces données. Ce travail de rationalisation entrepris depuis la recommandation de 1976 a amené à réviser certaines exigences suite, en particulier, à des constatations répétées d'insuffisances marquées de compactage en fond de couche.

Avec la mise en œuvre par couche et les matériaux actuels, on observe en effet une variation de la masse volumique sèche sur la hauteur de la couche compactée, comme l'illustre la figure 13. Pour assurer un compactage correct, ceci conduit à considérer deux indicateurs:

¹². Les objectifs de densification q1 et q2, non considérés ici, s'appliquent aux assises de chaussées; q2 correspond généralement à une couche de fondation et q1 à une couche de base. Ces objectifs sont définis dans la norme NF P98-115 article 6.5.5.2.1.

Figure 13 : Courbe de référence d'une couche compactée

Les prescriptions moyennes des tableaux ont été établies pour atteindre les valeurs moyennes minimales suivantes de pdm et pdfc par nature d'ouvrage :

- q3 : objectif de densification pour le compactage des couches de forme :
 - $\text{pdm} \geq 98,5\% \text{ pdOPN}$;
et
- $\text{pdfc} \geq 96\% \text{ pdOPN}$.
- q4: objectif de densification pour le compactage des remblais :
 - $\text{pdm} \geq 95\% \text{ pdOPN}$;
et
- $\text{pdfc} \geq 92\% \text{ pdOPN}$.

Ces valeurs sont à considérer comme des repères, mais ne doivent pas être retenues comme prescriptions de compactage (non-pertinence de la référence Proctor pour de nombreux matériaux, impossibilité factuelle d'assurer un contrôle véritable et précis de l'ensemble des travaux par mesure de masse volumique, notamment pour ce qui concerne le fond de couche).

On notera que la masse volumique de la partie supérieure de la couche n'est pas directement prise en compte ici pour caractériser la qualité du compactage. Certaines dispositions particulières sont cependant préconisées en fonction du couple matériau/engin pour cette zone.

Lorsque des raisons précises amènent à reconsidérer les prescriptions données dans ce document, il conviendra de procéder à des planches expérimentales pour traduire les prescriptions en modalités d'utilisation des engins de compactage, à l'instar de ce qui est fait dans le présent document. On se reportera au § 5.5.5 pour des commentaires sur les planches d'essais.

5.2 - DONNÉES RELATIVES AUX MATERIAUX

Les matériaux sont identifiés en familles, classes et sous-classes d'états selon la classification définie par le chapitre 2.

5.3 - DONNÉES RELATIVES AUX COMPACTEURS

Classement et utilisation

Les définitions et classifications données ci-après font l'objet de normes (NF P98-736). Les compacteurs pris en compte dans ce document ont une largeur de compactage supérieure ou égale à 1,30 m. Les petits compacteurs (rouleaux vibrants, plaques vibrantes, pilonneuses) ont un classement et des conditions

d'utilisations qui sont précisées dans un autre document: guide *Remblayage des tranchées et réfection de chaussées* (SETRA, LCP, 1994). Les classes des plaques vibrantes les plus efficaces sont cependant intégrées dans le présent document pour le rendre le plus complet possible.

Les différentes familles d'engins considérées ici sont:

- les compacteurs à pneus: Pi;
- les compacteurs vibrants à cylindres lisses: Vi;
- les compacteurs vibrants à pieds dameurs: VPi;
- les compacteurs statiques à pieds dameurs: SPi;
- les plaques vibrantes: Pqi.

« i » est le n° de la classe; il croît avec l'efficacité du compacteur à l'intérieur de chaque famille. Le cas des compacteurs mixtes est précisé au § 5.3.3.

5.3.1 - LES COMPACTEURS À PNEUS (PI)

Le classement est fait selon la charge par roue CR (voir norme NF P98-760):

- P1: CR entre 25 et 40 kN;
- P2: CR entre 40 et 60 kN;
- P3: CR supérieure à 60 kN;

Les compacteurs à pneus sont lestables pour atteindre la charge par roue maximale prévue par le constructeur. Il y a généralement un rapport de l'ordre de 1 à 2 entre le poids à vide et le poids lesté. La recherche de la meilleure efficacité conduit à utiliser la charge par roue maximale compatible avec la « traficabilité ».

Un compacteur donné peut être rangé dans différentes classes; le classement retenu doit se rapporter à la charge par roue effective sur chantier.

La pression de gonflage maximale compatible avec la « traficabilité » est également recommandée, afin d'obtenir la meilleure efficacité.

La vitesse d'utilisation n'a pour limite supérieure que celle résultant de la sécurité de la conduite.

5.3.2 - LES COMPACTEURS VIBRANTS À CYLINDRES LISSES (VI)

Photographies 21 et 22: Compacteurs vibrants à cylindres lisses
(Source: BOMAG)



Classement et utilisation

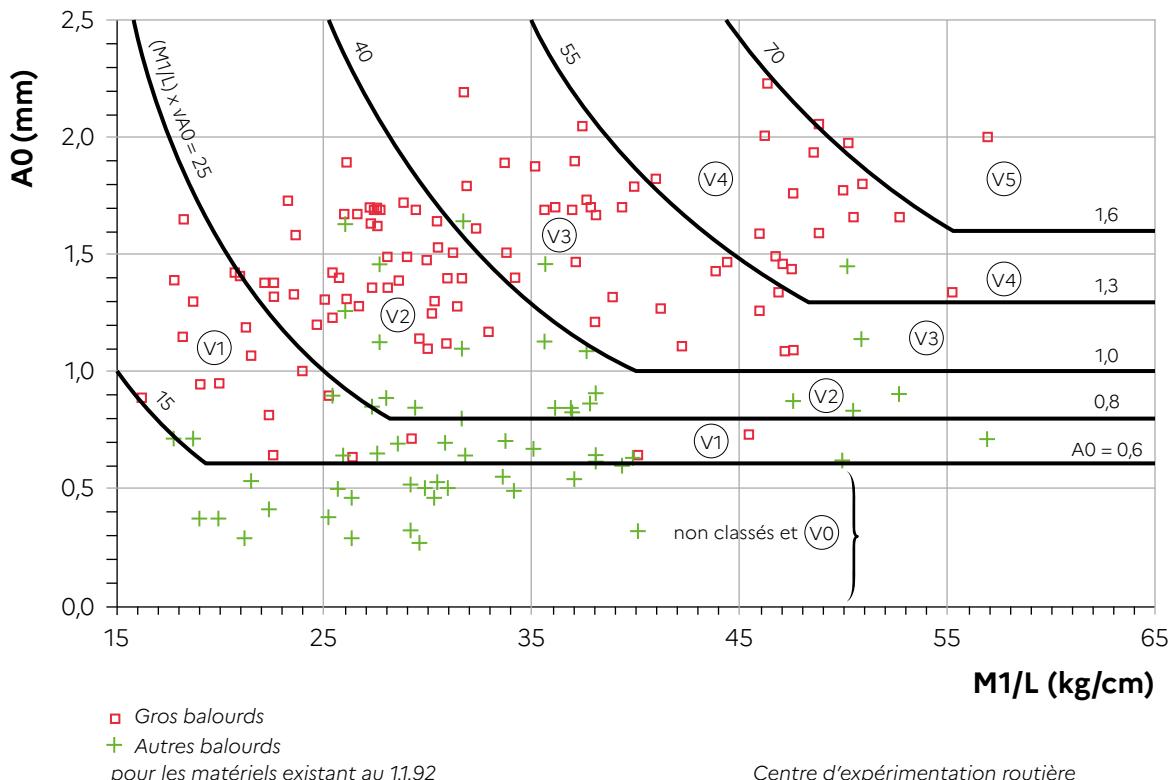
Le classement est effectué à partir du paramètre $(M1/L) \sqrt{A0}$ et d'une valeur minimale pour $A0$.

Tableau 24: Tableau de classement des cylindres

V1: $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 15 et 25	et $A0 \geq 0,6$
	{ supérieur à 25	et $A0$ entre 0,6 et 0,8
V2: $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 25 et 40	et $A0 \geq 0,8$
	{ supérieur à 40	et $A0$ entre 0,8 et 1,0
V3: $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 40 et 55	et $A0 \geq 1,0$
	{ supérieur à 55	et $A0$ entre 1,0 et 1,3
V4: $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 55 et 70	et $A0 \geq 1,3$
	{ supérieur à 70	et $A0$ entre 1,3 et 1,6
V5: $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ supérieur à 70	et $A0 \geq 1,6$

M1: masse totale s'appliquant sur la génératrice d'un cylindre (vibrant ou statique) en kg.
L: longueur de la génératrice du cylindre (vibrant ou statique) en cm.
A0: amplitude théorique à vide calculable par:
 $A0 = 1000 \times (me/M0)$, avec me: moment des excentriques de l'arbre à balourd (mkg) et M0: masse de la partie vibrante sollicitée par l'arbre à balourd (kg).

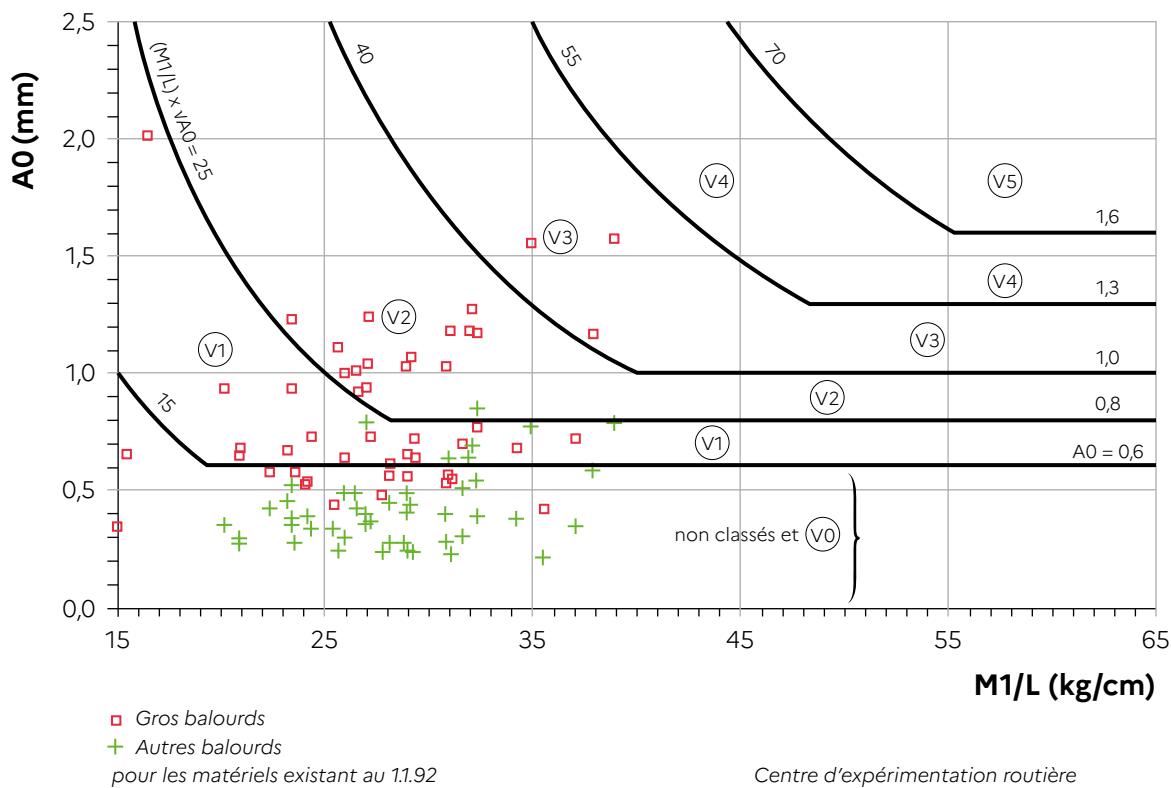
Figure 14: Diagramme de classement des compacteurs vibrants monocylindres



◻ Gros balourds
+ Autres balourds
pour les matériels existant au 11.92

Centre d'expérimentation routière

Figure 15: Diagramme de classement des compacteurs vibrants tandems



A_0 peut être contrôlée par la méthode des coussins selon la norme NF P98-761 « Essai de vérification du moment des excentriques des compacteurs vibrants ».

Photographies 23 et 24: La mesure de l'amplitude à vide A_0 peut être réalisée à l'aide d'un vibrographe en faisant vibrer le compacteur sur des coussins pneumatiques (Source: Cerema)



Les compacteurs vibrants possèdent souvent plusieurs valeurs d'amplitude théorique à vide (variation du moment des excentriques) et/ou plus rarement peuvent être lestés. Un matériel donné peut donc, éventuellement, être placé dans différentes classes selon la valeur de A_0 et/ou de M_1/L .

Les compacteurs vibrants sont considérés comme fonctionnant à la fréquence maximale prescrite par le constructeur pour le balourd considéré.

À l'exception des classes V1 et V2, une fourchette de vitesses de translation est admise, qui influe sur les modalités de compactage (annexe 4 du fascicule 2). Cependant, la faculté d'employer une vitesse élevée, intéressante pour les débits, n'est autorisée que si le compacteur possède un compteur de vitesse au tableau de bord et un dispositif enregistreur pour la contrôler.

Monocylindres et tandems

Les deux morphologies les plus répandues sont les monocylindres désignés par VMi et les tandems par VTi (Vi = classe d'efficacité définie précédemment).

Sont regroupés sous le type VMi tous les monocylindres vibrants, les tandems transversaux (cylindres disposés selon un seul essieu) ainsi que les tandems longitudinaux à un seul cylindre vibrant. Les tableaux (e, Q/S) leur sont directement applicables. Sont répertoriés VTi les tandems longitudinaux avec vibration sur chaque cylindre.

Dans la plupart des cas, la classe d'efficacité est la même entre cylindre avant et cylindre arrière. Par rapport aux monocylindres, la valeur de Q/S et le nombre d'applications de charge à prendre en compte sont les mêmes. Le nombre de passes, lui, en est divisé par 2 (cf. annexe 4 du fascicule 2).

Dans les cas exceptionnels où les paramètres de masse et de vibration sont différents entre les cylindres AV et AR, deux cas sont possibles :

- Les valeurs de $(M_1/L)xvA_0$ diffèrent de moins de 10 % : la classe d'efficacité unique est déterminée à partir de la valeur moyenne des $(M_1/L)xvA_0$ et on revient au cas précédent.
- Les valeurs de $(M_1/L)xvA_0$ diffèrent de plus de 10 % : un tel compacteur tandem différencié est considéré comme la somme de deux monocylindres placés dans leur classe respective ; les modalités d'utilisation sont précisées en annexe 4 du fascicule 2.

5.3.3 - LES COMPACTEURS MIXTES

Ils sont constitués d'un cylindre vibrant et d'un train de pneus dont le nombre peut être considéré comme suffisant pour contribuer au compactage en recouvrant l'ensemble de la largeur de génératrice du cylindre (intervalle entre surfaces de contact \leq largeur d'un pneu).

On les considère comme la somme d'un compacteur vibrant monocylindre VMi et d'un compacteur à pneus Pj. Les modalités d'utilisation sont précisées en annexe 4 du fascicule 2. Ces compacteurs sont désignés VXi - Pj par la norme NF P98-736.

5.3.4 - LES COMPACTEURS VIBRANTS À PIEDS DAMEURS (VPI)

Photographie 25: Compacteur vibrant à pieds dameurs en premier plan, compacteur vibrant à cylindre lisse au second plan (Source: BOMAG)



Photographie 26: Compacteur vibrant à pieds dameurs (Source: Cerema)

Ce sont généralement des versions dérivées des compacteurs vibrants à cylindres lisses évoqués au § 5.3.2. Leur classement reprend les mêmes critères:

Tableau 25 : Tableau de classement des cylindres

V1: $(M_1/L) \times v_{A0}$	{ entre 15 et 25	et $A_0 \geq 0,6$
	{ supérieur à 25	et A_0 entre 0,6 et 0,8
V2: $(M_1/L) \times v_{A0}$	{ entre 25 et 40	et $A_0 \geq 0,8$
	{ supérieur à 40	et A_0 entre 0,8 et 1,0
V3: $(M_1/L) \times v_{A0}$	{ entre 40 et 55	et $A_0 \geq 1,0$
	{ supérieur à 55	et A_0 entre 1,0 et 1,3
V4: $(M_1/L) \times v_{A0}$	{ entre 55 et 70	et $A_0 \geq 1,3$
	{ supérieur à 70	et A_0 entre 1,3 et 1,6
V5 : $(M_1/L) \times v_{A0}$	{ supérieur à 70	et $A_0 \geq 1,6$

Dans le cas où la version à pieds dameurs est proposée en option, son classement peut différer de celui du compacteur vibrant à cylindre lisse auquel il s'apparente, du fait de différences de masse et d'amplitude.

Les modalités de compactage ne diffèrent de celles des vibrants lisses qu'à partir de la classe VP3. Elles sont établies en recherchant le bénéfice tiré à la fois de la vibration et des pieds dameurs. Par rapport aux vibrants lisses de même classe, ce bénéfice s'obtient à la vitesse la plus élevée et par conséquent pour une épaisseur plus faible; la valeur de Q/S est augmentée. Les compacteurs vibrants à pieds considérés dans les tableaux de compactage sont des monocylindres désignés VPMi dans la norme NF P98-736.

5.3.5 - LES COMPACTEURS STATIQUES À PIEDS DAMEURS (SPI)

Le classement est fait selon la charge statique moyenne par unité de largeur du ou des cylindres à pieds (M_1/L):

- SP1 : M_1/L entre 30 et 60 kg/cm;
- SP2 : M_1/L supérieur à 60 kg/cm et inférieur à 90 kg/cm.

Pour les compacteurs avec lestage possible, le classement est celui correspondant à la situation rencontrée sur chantier.

Il convient d'utiliser la vitesse maximale possible: en particulier, la fin du compactage doit pouvoir être effectuée à une vitesse de 10 à 12 km/h. Les premières passes ont généralement une vitesse nettement plus réduite, sans devenir inférieure à 2 à 3 km/h.

Pour les compacteurs équipés d'une lame, la part de temps consacrée au poussage et au réglage des sols n'est pas prise en compte dans le compactage.

Au cas où la vitesse moyenne observée sur chantier (qui ne devrait pas être en dessous de 6 km/h) est inférieure à la vitesse moyenne lue dans les tableaux de compactage, il convient d'en tenir compte pour réévaluer le débit.

Les compacteurs tandems (cas fréquents) ont le même Q/S et le même nombre d'applications de charge que les monocylindres (valeurs des tableaux). Le nombre de passes est à diviser par deux.

5.3.6 - LES PLAQUES VIBRANTES (PQI)

Photographies 27 et 28: Plaques vibrantes

(À gauche, source: Cerema, à droite, source: BOMAG)



L'ensemble des plaques est classé PQ1 à PQ4 dans la Note technique « Compactage des remblais de tranchées » (SETRA-LCPC).

Elles sont classées à partir de la pression statique sous la semelle Mg/S exprimée en kPa (Mg représente le poids de la plaque). Les plus petites plaques (PQ1 - PQ2) ne sont pas prises en compte. Celles considérées ici sont:

- PQ3: mg/S entre 10 et 15 kPa;
- PQ4: Mg/S supérieur à 15 kPa.

S est la surface de contact plaque/sol et non la surface hors tout. Pour les modèles équipés d'élargisseurs, S varie et il convient d'en tenir compte pour la classification qui peut alors changer.

5.4 - RÈGLES DE COMPACTAGE

Les règles de compactage qui figurent dans les tableaux du fascicule 2 ont été complètement revues pour prendre en compte la classification des matériaux proposée par le guide des terrassements des remblais et des couches de forme, édition 2023 couramment appelé GTR 2023 . Cela conduit à certaines modifications par rapport au GTR92.

5.4.1 - LES TABLEAUX DE COMPACTAGE

Les tableaux de compactage (cf. annexe 4 du fascicule 2) sont établis pour un matériau « moyen » à l'intérieur de la classe et la sous-classe correspondantes. Par contre, ils correspondent à l'emploi d'un compacteur situé à la frontière basse de la classe d'efficacité considérée.

Une case non renseignée dans les tableaux signifie que le compacteur considéré ne permet pas d'atteindre les objectifs définis au § 5.1 pour une couche de plus de 0,20 m.

Une valeur « plancher » de 0,30 m, plus réaliste, est adoptée pour l'optimisation des débits dans le cas des vibrants (annexe 4 du fascicule 2).

Dans le cas particulier des compacteurs à pieds dameurs, l'absence totale d'indications, quelle que soit la classe d'efficacité, correspond à l'inaptitude de ce type de matériel pour le sol considéré (faible cohésion).

Les réserves concernant la traficabilité n'ont qu'un caractère indicatif. En effet, les limites de traficabilité sont dépendantes, à l'intérieur d'une même classe d'efficacité, de la conception des matériels (ex.: cylindre vibrant, moteur ou non).

La fermeture de la partie supérieure des couches (pieds dameurs, vibrants lourds) peut faire appel à un complément de compactage ou à une opération spécifique indiquée en note.

Dans les tableaux, les valeurs Q/S et e (associées à l'utilisation d'une vitesse de translation donnée) se prêtent à la définition des clauses contractuelles. Les tableaux comportent, à titre indicatif, les valeurs d'autres paramètres utiles à la définition de l'atelier de compactage, au calcul des rendements...

La définition de ces paramètres auxiliaires est la suivante:

- N : nombre d'applications de charge¹³;
- Q/L : débit horaire par unité de largeur du compacteur (donné en annexe 4 du fascicule 2, avec des exemples d'application).

5.4.2 - LES PARAMÈTRES DÉFINISSANT LES MODALITÉS DE COMPACTAGE

Le paramètre Q/S

Le nombre indiqué dans la partie supérieure de chaque case des tableaux représente une valeur du rapport Q/S, exprimé en m^3/m^2 , dans lequel Q est le volume de sol compacté pendant un temps donné (par exemple un jour, ou une heure), et S la surface balayée par le compacteur pendant le même temps.

■ Q représente le rythme de production de l'atelier de terrassement.

Sur le chantier, il peut être soit déterminé par des métrés après compactage, soit évalué à partir du nombre, de la charge moyenne, des coefficients de foisonnement et contrefoisonnement, et de la durée du cycle constatée pour les engins de transport.

Au stade de l'étude, Q est estimé en tenant compte des données du projet et des contraintes d'exécution.

■ S représente le rythme d'utilisation d'un compacteur.

S est le produit, pendant le temps choisi pour l'évaluation de Q, de la distance D parcourue « en compactage », par la largeur de compactage L. Il est pondéré par le facteur morphologique du compacteur (cf. annexe 4 du fascicule 2) et l'efficacité du travail réalisé (coefficient d'efficacité).

La distance D peut être déterminée sur chantier au moyen d'un compteur kilométrique monté sur le compacteur.

Les longueurs élémentaires parcourues par le compacteur avec des paramètres de fonctionnement non conformes (par ex.: vibration arrêtée pour un Vi, vitesse de translation trop élevée, etc.) ne sont pas à prendre en compte dans l'évaluation de D.

Interprétation

D'un point de vue pratique, la valeur du paramètre Q/S représente l'épaisseur d'un matériau donné que peut compacter un compacteur en une application de charge pour obtenir la compacité recherchée; à ce titre, elle pourrait être dénommée: « épaisseur unitaire de compactage ».

En d'autres termes, il est immédiatement possible, en examinant dans les tableaux de l'annexe 4 les valeurs de Q/S correspondant à une classe de matériau et à une intensité de compactage données, de comparer l'efficience des différentes classes de compacteurs et donc de comparer plusieurs engins dès lors que leur classement est connu.

13. Le nombre d'applications de charge N correspond au nombre de passes dans le cas des rouleaux à pneus et des rouleaux monobilles, et au double du nombre de passes dans le cas des rouleaux tandem.

Enfin, il découle de cette présentation de la valeur du paramètre Q/S que le nombre de passes théorique moyen qui doit être appliquée sur une couche de matériau d'épaisseur donnée, s'obtient directement par le rapport entre l'épaisseur de la couche et la valeur du Q/S correspondant à la classe du compacteur et à celle du matériau considéré.

Dans les tableaux de compactage de l'annexe 4 du fascicule 2, on observe que les valeurs de Q/S diminuent lorsque l'intensité de compactage exigée est plus grande. Cela est cohérent avec l'interprétation précédemment donnée du paramètre Q/S.

Lorsque les valeurs de Q/S sont utilisées en tant que spécifications, elles doivent être interprétées de la manière suivante :

- dans le cas d'énergies de compactage intense (code 1) et moyenne (code 2), la valeur de Q/S indiquée est une valeur maximale : le Q/S réel doit être inférieur ou égal au Q/S indiqué dans le tableau. Surtout dans le cas de compactage intense, il n'y a pas d'inconvénient à ce qu'il soit très inférieur. Les cas d'insuffisances de compactage se rencontrent en effet plus fréquemment là où la difficulté de compactage requiert une énergie intense (sols secs en particulier);
- dans le cas d'énergie de compactage faible (code 3), le Q/S réel doit être proche du Q/S indiqué dans les tableaux ; la valeur moyenne doit évidemment être centrée sur la valeur indiquée. Elle ne doit être ni beaucoup plus élevée, ni beaucoup plus faible ; l'intervalle normalement acceptable à l'échelle de l'heure de travail est d'environ $\pm 20\%$ par rapport à la valeur indiquée. Sur les sols humides pour lesquels le compactage s'accompagne d'un phénomène de matelassage, il n'est pas bénéfique d'employer une énergie de compactage plus forte que celle prévue ; elle conduirait à diminuer encore davantage la portance ;
- la même valeur de Q/S du cas considéré est à prendre en compte, quelle que soit la valeur réelle de l'épaisseur qui doit rester dans la limite de la valeur maximale indiquée.

L'épaisseur compactée

Les épaisseurs indiquées dans les tableaux sont des épaisseurs après compactage.

La valeur d'épaisseur compactée indiquée est une valeur maximale : l'épaisseur réelle doit lui être inférieure ou égale. Les valeurs d'épaisseurs maximales de couches ne sont fixées que par rapport à la seule opération de compactage ; elles ne tiennent pas compte en particulier des contraintes pouvant être imposées le cas échéant sur le régâlage (couches minces pour parfaire la fragmentation ou l'aération du matériau...).

Il convient d'être vigilant dans le choix du matériel de compactage susceptible de compacter les épaisseurs (notamment de couche de forme) pour obtenir la performance attendue, principalement pour les matériaux traités qui doivent systématiquement être réalisés avec une surépaisseur à éliminer.

La vitesse de translation

Les prescriptions relatives à la vitesse de translation sont à examiner différemment selon la famille de compacteur :

- pour les compacteurs vibrants V3 à V5, les tableaux donnent deux cas de vitesse de translation permettant d'optimiser le débit de l'atelier de compactage, en fonction des conditions réelles du chantier. La prise en compte de l'influence de la vitesse des compacteurs vibrants sur leur efficacité en profondeur a conduit à cette présentation ;
- la ou les valeurs de vitesse indiquées sont des valeurs maximales ($\pm 10\%$) ;
- pour les compacteurs à pneus et les compacteurs statiques à pieds dameurs, la valeur indiquée correspond à la vitesse moyenne estimée durant l'ensemble des passes effectuées sur la zone de compactage. En effet, pour ces matériaux et compte tenu de l'aspect « traficabilité », les vitesses en début de compactage sont généralement plus faibles qu'en fin de compactage ;
- pour les plaques vibrantes, il s'agit d'une vitesse moyenne généralement constatée.

Cas particuliers sur le choix du compacteur

Dans certaines situations, il convient d'imposer des choix de compacteurs permettant de respecter les ouvrages avoisinants ou pour des contraintes de vibrations environnementales. Dans ces situations, le choix du compacteur peut être défini dans le cahier des charges (cf. note du Sétra de 2009).

Contrôle qualité

On se référera pour ce point aux:

- méthodes décrites dans le Guide technique *Conception et réalisation des terrassements - Fascicule 2 : organisation des contrôles* (Sétra, 2007);
- norme européenne CEN 16907-5.

5.4.3 - EXEMPLE DE TABLEAU DES MODALITÉS DE COMPACTAGE

Le tableau 26 ci-après, extrait de l'annexe 4 du fascicule 2, reproduit les modalités de compactage à appliquer pour l'utilisation des sols F1 - VC2F1 en remblai. On remarque en particulier que pour les compacteurs V3, V4, V5, il existe deux vitesses de translation possibles auxquelles correspondent des modalités de compactage différentes.

Tableau 26: Exemple de tableau de compactage - Cas des matériaux F1, VC2F1(*)

Compacteur Modalités		P1	P2	P3	V1	V2	V3		V4		V5		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	SP1	SP2	PQ3	PQ4		
Énergie de compactage faible	Q/S	0.080	0.120	0.180	0.055	0.085	0.125		0.165		0.205		0.055	0.085	0.165	0.205	0.265	0.070	0.100	0.065			
	e	0.30	0.45 (1)	0.60 (1)	0.25	0.35	0.30	0.50	0.35 (1)	0.65 (1)	0.40 (1)	0.80 (1)	0.25 (2)	0.30 (2)	0.30 (2)	0.35 (2)	0.40 (2)	0.25 (2)	0.40 (2)	0	0.20 (1)		
	V	5.0	5.0	5.0	2.0	2.5	4.0	2.5	5.0	2.5	5.0	2.5	2.0	3.0	4.0	5.0	5.0	8.0	8.0	1.0			
	N	4	4	4	5	5	3	4	3	4	2	4	5	4	2	2	2	4	4	3			
Énergie de compactage moyenne	Q/L	400	600	900	110	215	500	315	825	415	1025	515	110	255	660	1025	1325	560	800	65			
	Q/S	0.045	0.065	0.095			0.040	0.065		0.085		0.100				0.040	0.085	0.100	0.130	0.040	0.070		
	e	0.25	0.35	0.45			0.25	0.30	0.40	0.30	0.50	0.30	0.60			0.25 (2)	0.30 (2)	0.30 (2)	0.30 (2)	0.20 (2)	0.30 (2)		
	V	5.0	5.0	5.0			2.0	2.5	2.0	3.5	2.0	4.0	2.0			2.0	2.5	3.5	4.0	8.0	8.0		
Code 2	N	6	6	5			7	5	7	4	6	3	6			7	4	3	3	5	5		
	Q/L	225	325	475			80	165	130	300	170	400	200			80	215	350	520	320	560		
Énergie de compactage intense	Q/S			0.035	0.050			0.025	0.040		0.050		0.065				0.025	0.050	0.065	0.085	0.035		
	e			0	0.20	0.30			0.20			0.30	0.40	0.30	0.45			0.20	0.30	0.30	0.30	0.25	
	V			0	5.0	5.0			2.0			2.5	2.0	3.0	2.0			2.0	2.5	3.0	8.0	0	
	N			6	6			8			8	6	8	5	7			8	6	5	4	8	
Code 1	Q/L			175	250			50			80	125	100	195	130			50	100	165	255	280	

5.4.4 - CONDITION À SATISFAIRE POUR UN BON COMPACTAGE

Outre le respect des valeurs de Q/S et des épaisseurs maximales des couches, il importe de s'assurer:

- d'une bonne organisation du chantier notamment pour garantir l'homogénéité du matériau approvisionné, la répartition de l'effort de compactage (plan de balayage et cadence d'approvisionnement) et le délai de compactage dans le cas de sol traité au ciment, par exemple.

L'attention est attirée sur la nécessité de donner aux conducteurs d'engins des consignes précises et adaptées aux objectifs de qualité. Dans certains cas (zones exiguës, par exemple), ces consignes peuvent conduire à diminuer le Q/S donné par les tableaux;

- du fonctionnement correct des compacteurs. Les paramètres essentiels sont:
 - pour les compacteurs vibrants Vitesse (V), moment des excentriques (me), fréquence de vibration (f),
 - pour les compacteurs à pneus: Vitesse, lest (ou charge effective par roue), pression de gonflage des pneumatiques.

Il appartient au contrôle qualité de bien vérifier la concordance entre les conditions de fonctionnement et la détermination de la classe du compacteur. Les fiches techniques peuvent être très utiles à cet égard.

En général, il n'y a pas lieu de faire varier trop souvent les valeurs de ces paramètres pour un cas de chantier donné (pour les compacteurs à pneus et à pieds dameurs, la vitesse qui peut être faible aux premières passes, doit augmenter ensuite). On évitera également l'emploi d'ateliers hétérogènes qui pénalisent les matériels les plus performants ou compliquent l'organisation du chantier.

Pour le compactage dans les sites d'accès difficile, les conditions de compactage peuvent être choisies à partir du guide LCPC-SETRA de 1994 sur la réalisation des remblais de tranchées et réfection de chaussées, en complément du présent document.

5.5 - L'ÉVOLUTION DES MATERIELS DE COMPACTAGE: NOUVELLES CARACTÉRISTIQUES ET NOUVEAUX MOYENS D'AUSCULTATION

5.5.1 - PRÉSENTATION DES NOUVELLES TECHNOLOGIES DE VIBRATION

Les compacteurs vibrants utilisés aujourd'hui font appel à trois technologies de vibration différentes (cf. figure 16 ci-après):

La vibration circulaire utilisée sur les compacteurs depuis les années soixante

Elle est obtenue grâce à la rotation d'un arbre comportant un balourd placé au centre du cylindre du compacteur. Le mouvement vibratoire du cylindre qui en résulte est représenté dans la figure ci-dessous par une rotation excentrée du cylindre dans toutes les directions. Cela se traduit par des forces de contact entre le sol et le cylindre dont la résultante principale est inclinée d'environ 60° par rapport au sol. La technique la plus souvent utilisée permet, par inversion du sens de rotation de l'arbre à balourd d'appliquer une amplitude d'une valeur différente dans l'autre direction (grande amplitude = flèches rouges / petites amplitude = flèches bleues).

La vibration oscillante apparue sur les compacteurs dans les années quatre-vingt-dix

Elle est obtenue grâce à la présence de deux arbres tournant dans le même sens avec un décalage angulaire de 180°. Le mouvement vibratoire du cylindre qui en résulte est représenté dans la figure ci-dessous par un mouvement de rotation alternatif autour de l'axe du cylindre. Cela se traduit par des forces de contact entre le sol et le cylindre, distribuées selon des angles proches de l'horizontale. Cette technologie offre une amplitude qui s'applique d'avant en arrière de façon alternée (flèches rouges).

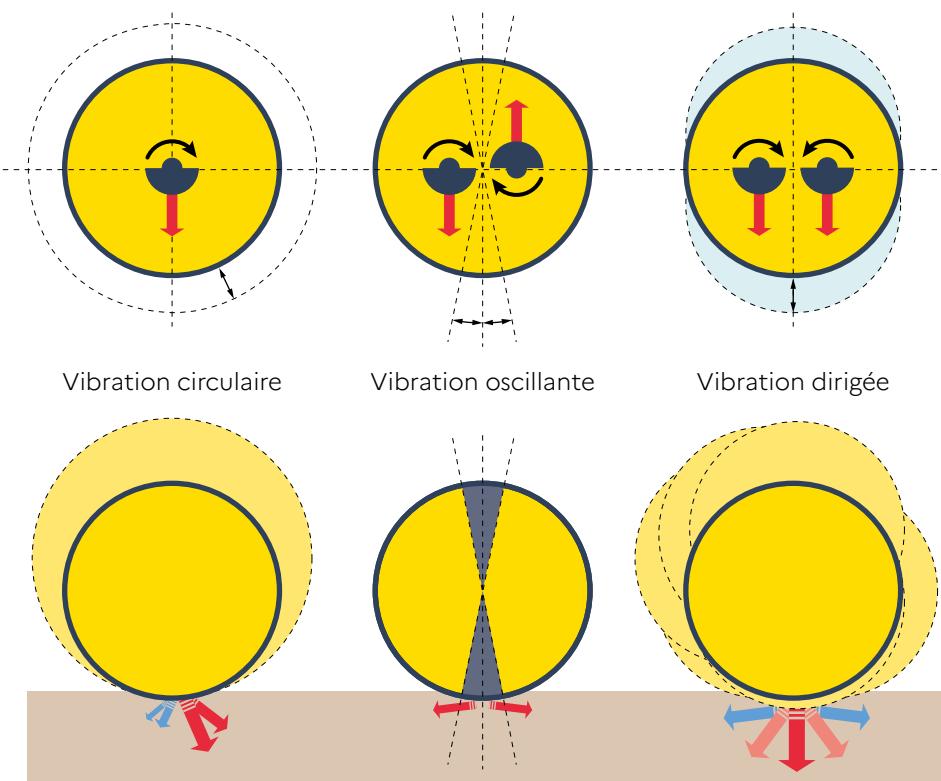
La vibration dirigée apparue sur les compacteurs dans les années quatre-vingt-dix

Elle est obtenue grâce à la présence de deux arbres tournant en sens opposé avec un calage angulaire à 0°. Le mouvement vibratoire du cylindre qui en résulte est représenté dans la figure ci-dessous par un mouvement linéaire alternatif dont la direction peut varier. Cela se traduit par des forces de contact entre le sol et le cylindre distribuées soit verticalement (flèche rouge), soit avec un angle plus ou moins prononcé dont le sens d'application est automatiquement adapté au sens de déplacement du compacteur (flèches roses ou flèches bleues). Cette technologie offre une amplitude de vibration appliquée selon des angles allant de la verticale jusqu'à l'horizontale.

5.5.2 - CLASSEMENT ET UTILISATION

- a) Tous les textes rédigés jusqu'à aujourd'hui se réfèrent aux compacteurs à vibration circulaire (cf. § 5.3.2).
- b) La vibration oscillante représente un cas particulier dans le domaine du compactage des remblais et des couches de forme concernés par ce guide. De par son principe, son efficacité se limite aux matériaux faciles à compacter et aux couches de faible épaisseur. L'amplitude d'oscillation ne peut en aucun cas être utilisée dans le calcul de la classe de performance selon la norme NF P98-736. Cette technologie conduit à un mode de compactage qui transmet peu de vibrations à l'environnement.
- c) La vibration dirigée, en raison de son interaction avec le sol qui diffère en fonction de la valeur de l'angle appliqué, offre une multitude de possibilités en fonction des matériaux et des épaisseurs de couche à compacter. Lorsque l'on souhaite définir les classes de performance des différents réglages disponibles, il convient de considérer la résultante verticale de l'amplitude selon son angle d'application en mode bloqué. Selon différentes études et expériences réalisées depuis son introduction, une approche simplement basée sur sa classification selon la norme NF P98-736 serait réductrice. En effet, en changeant l'angle d'application des forces de contact avec le sol, on modifie le mode de mise en mouvement des grains du matériau ainsi que l'importance du rôle de la couche sous-jacente en tant que support. Enfin, lorsque la vibration est dirigée à l'horizontale, l'effet produit par le cylindre sur le matériau peut être considéré comme semblable à la vibration oscillante.

Figure 16: Distribution des forces de contact entre le sol et le cylindre des différentes technologies de vibration



5.5.3 - COMPACTEURS À ÉNERGIE VARIABLE

Un compacteur offrant plus d'un réglage de vibration peut être considéré comme permettant une variation de l'énergie de compactage.

Parmi les trois technologies décrites précédemment, seules deux d'entre elles, la vibration circulaire et la vibration dirigée, sont déclinées sur les compacteurs proposant une gestion automatique de l'énergie de compactage. Cette gestion est rendue possible par la présence de capteurs et de boîtiers programmables qui prennent en compte différents critères tels que la rigidité du matériau et, de fait, l'entrée en résonance du cylindre.

Toutefois, il convient de noter qu'une telle optimisation du compactage nécessite soit un retour d'expérience, soit le recours à une planche d'essai. Le mode de compactage, générant une orientation automatique de la bille ou une variation de l'amplitude de la vibration circulaire doit être utilisé avec prudence, surtout avec des sols fins, car l'état hydrique influence fortement la portance, qui elle-même ne reflète pas le niveau de compactage réel.

5.5.4 - SYSTÈMES EMBARQUÉS ADDITIONNELS ET AUTRES MÉTHODES DE CONTRÔLE

Certains compacteurs disposent de systèmes embarqués permettant d'obtenir des informations complémentaires à celles fournies par la méthode Q/S décrite dans le présent document.

La géolocalisation du compacteur, par GPS, permet notamment:

- le pilotage du balayage du compacteur. Elle permet au chauffeur d'engin de s'assurer qu'il a réalisé le bon nombre de passes en tous points;
- le contrôle de la vitesse de compactage;
- la mesure de la surface balayée par le compacteur;
- la mesure relative de la rigidité du matériau réalisée en continu. Cette mesure se fait lorsque le système vibratoire est en fonctionnement, grâce à des accéléromètres positionnés sur la bille du compacteur. Ces mesures sont à prendre avec prudence car elles varient en fonction de la nature et de l'état hydrique du matériau compacté. Le module de rigidité est impacté par le niveau de l'amplitude de vibration, par sa vitesse, par la nature du matériau, par son état hydrique, par son niveau de compactage, par son épaisseur et bien entendu par le comportement du sol sous-jacent.

Il existe d'autres méthodes de contrôle du compactage que le Q/S comme, par exemple, le contrôle continu du compactage (« CCC ») décrit par la CEN/TS17006. C'est une méthode de contrôle de la qualité des travaux de terrassement au moyen de systèmes de mesure dynamique et de documentation intégrés au compacteur. Les valeurs de mesure de CCC peuvent être exploitées pour évaluer la rigidité, le processus de compactage du sol et la qualité du compactage. Les paramètres les plus importants sont le poids, l'amplitude, la fréquence et la vitesse de fonctionnement du compacteur, la direction de progression, la profondeur de mesure et l'épaisseur de la couche, le type de matériau, sa teneur en eau et la régularité de la surface du sol.

Quatre approches différentes de l'utilisation du CCC sont possibles pour le contrôle et l'assurance qualité:

- contrôle de masse volumique et de rigidité de la couche de matériau. Ceci exige préalablement un essai d'étalonnage lors d'une planche d'essai pour chaque type de matériau. Cette méthode convient seulement pour les sols granulaires et les sols composites dont la proportion de fines ($\leq 0,063 \text{ mm}$) est $< 15\%$;
- analyse des zones de relativement faible valeur de compactage et documentation pour le contrôle qualité: cette méthode est utilisée pour identifier les zones dont les valeurs mesurées par CCC sont les plus faibles. Sur ces zones, d'autres mesures d'acceptation doivent être réalisées. Une attention particulière doit être portée à la teneur en eau. Aucun étalonnage n'est exigé;
- documentation relative au compactage maximal pouvant être obtenu vis-à-vis de la rigidité de la couche mise en œuvre, avec le compacteur utilisé, pour un type de sol, une teneur en eau et une épaisseur de couche donnés. Cette méthode est appropriée aux sols granulaires et composites, et aux matériaux de remblai rocheux. L'adéquation de l'équipement de compactage doit avoir été prouvée au préalable;

- documentation de la méthode de compactage: cette approche peut être employée pour documenter les spécifications de compactage à des fins d'assurance qualité. Pour cette application, le compacteur doit être équipé d'un système de positionnement global. Les consignes de compactage sont celles du GTR ou celles qui découlent d'une planche d'essai.

Il faut préciser que la liste des innovations présentée dans ce guide n'est pas exhaustive. Leur validation doit se faire par la réalisation d'une planche d'essais.

5.5.5 - PLANCHES D'ESSAIS DE COMPACTAGE

Objectifs

Le GTR (versions 1992 et 2000) a permis de généraliser l'emploi des compacteurs normalisés en terrassement en établissant des recommandations de compactage par classe de sol. Ces tableaux permettent de s'affranchir de planches d'essais longues et fastidieuses, contrôlées souvent avec des moyens d'essais en nombre insuffisant sur chantier.

Les règles de compactage et les objectifs Q/S sont établis dans ce guide pour les compacteurs à vibration circulaire: la planche d'essais n'est alors pas nécessaire et ne sera réalisée que pour répondre à une demande particulière. On applique ainsi les recommandations décrites dans ce guide.

Le choix des types de compacteurs étant généralement laissé à l'initiative des entreprises, celles-ci peuvent proposer des compacteurs autres que ceux à vibration circulaire. Dans ce cas, il est nécessaire de réaliser des planches d'essais afin de définir des modalités de compactage spécifiques dans le cas d'utilisation de compacteurs équipés de systèmes différents de la vibration circulaire.

Ces planches d'essais permettront d'évaluer leurs capacités à compacter un matériau sur une épaisseur donnée.

■ Cas 1

Les résultats obtenus sont identiques à ceux indiqués dans le GTR sur les critères suivants: nombre de passes, vitesse et épaisseur. Le nouveau compacteur est considéré comme équivalent à une des classes V1 à V5 et peut, de fait, être utilisé selon les modalités définies dans le tableau de compactage du GTR.

■ Cas 2

Les résultats obtenus permettent d'optimiser les modalités de compactage du GTR, par exemple en réduisant le nombre de passes, ou en augmentant l'épaisseur de couche compactée. Le maître d'œuvre, sur la base des résultats d'essais obtenus, peut autoriser ces nouvelles prescriptions pour le matériau testé.

La planche d'essais permet ainsi de définir les performances réelles du compacteur sur des matériaux identifiés. Elle sera réalisée sur des matériaux dont les références Proctor sont connues et représentatives afin de pouvoir réaliser des contrôles du taux de compactage obtenu.

Rappelons que tout compacteur sur chantier doit être doté d'une fiche technique permettant d'identifier l'appareil et ses performances. L'application du GTR suppose que les compacteurs ont fait l'objet d'une vérification portant sur les amplitudes, les fréquences de vibration, leur masse et le bon fonctionnement de leur chronotachygraphe (guide *Conception et réalisation des terrassements: méthodes d'essais*, fascicule 3, 2007).

Le contrôle de compactage doit s'envisager dans le cadre d'une démarche qualité globale incluant également le contrôle des matériaux.

Exemple de méthodologie

Il est présenté ci-dessous un exemple de la marche à suivre pour évaluer un compacteur:

Recherche d'une analogie avec un compacteur existant dans ce guide

Le compacteur est testé sur un matériau F2 m avec la vitesse la plus lente, soit moins de 2 km/h, afin d'appliquer un maximum de contrainte sur le matériau. Le matériau est mis en œuvre, foisonné sur une épaisseur permettant de vérifier que le nouveau compacteur est proche d'un V4, soit entre 40 et 50 cm.

Après 7 passes, l'épaisseur maximale de matériaux compactée conforme à la qualité q4 est en moyenne de 0,41 m, pour un objectif de 0,40 m: la classe du compacteur testé peut être considérée comme équivalente à un V4 et toutes les consignes de compactage du GTR pour un V4 pourront être appliquées à ce nouveau compacteur.

D'autres cas auraient pu être testés sur d'autres planches d'essais, pour une qualité q4 soit:

- 6 passes pour un V3 ($e = 0,30 \text{ m}$);
- 7 passes pour un V4 ($e = 0,40 \text{ m}$);
- 6 passes pour un V5 ($e = 0,45 \text{ m}$).

D'autres cas de figure peuvent être testés: optimisation de l'énergie de compactage, réduction du nombre de passes ou augmentation de l'épaisseur. La planche d'essais doit être réalisée sur un matériau homogène (nature et d'état hydrique).

Les conclusions de la planche d'essais ne vaudront que pour le type de compacteur utilisé et le matériau compacté.

La planche d'essai est validée sous réserve d'obtenir une population significative de mesures sur les deux paramètres à contrôler:

• la densité moyenne

La mesure est en général simple à réaliser sous réserve que l'appareil utilisé puisse mesurer la masse volumique sur toute l'épaisseur de la couche compactée;

• la densité en fond de couche

Cette mesure est plus complexe à obtenir. On pourra procéder par:

- décaissement avec mesures au gamma-densimètre ou au densitomètre à membrane, à différentes profondeurs,
- carottage avec prélèvements d'échantillons intacts lorsque cela sera possible et mesure par pesée hydrostatique ou au banc gamma,
- pénétromètres après étalonnage,
- double sonde gamma.

Les valeurs obtenues sont comparées à la masse volumique Proctor normal de référence.

La note d'information n° 114, « *Éléments techniques pour la conception et la réalisation de planches d'essais de compactage dans les chantiers de terrassements* » (Sétra) est citée ici en référence comme apportant des compléments techniques et de bonnes pratiques.

Abréviations

ABRÉVIATIONS

AEP: alimentation en eau potable.

AM: classe des matériaux des sous-produits industriels.

AN: classe des matériaux naturels particuliers.

AR: arase terrassement.

ARI: classe i (i de 0 à 4) de portance de l'AR.

CBR: indice Californian Bearing Ratio.

CCC: contrôle continu du compactage.

CCTP: cahier des clauses techniques particulières.

CR: charge par roue.

CVCT: cendres volantes de centrale thermique.

I_{DGa}: coefficient de dégradabilité.

États hydriques:

- **th:** état hydrique très humide ;
- **h:** état hydrique humide ;
- **m:** état hydrique moyen ;
- **s:** état hydrique sec ;
- **ts:** état hydrique très sec.

I_{FR}: coefficient de fragmentabilité.

FS: coefficient de friabilité des sables.

GNT: gravaux non traitées.

GTS: guide de traitement des sols.

HAP: hydrocarbures aromatiques polycycliques.

Ic: indice de consistance.

Ip: indice de plasticité.

IPI: indice portant immédiat.

LA: coefficient Los Angeles.

LHR: liant hydraulique routier.

MDE: coefficient micro-Deval en présence d'eau.

MIDND: mâchefer d'incinération de déchets non dangereux

MO: matières organiques.

OPN: optimum proctor normal.

PF: plateforme support de chaussée.

P_i: classe i (i de 1 à 4) de portance de la PF.

P_i: compacteur à pneus de classe i (i de 1 à 3).

PQ_i: plaque vibrante de classe i (avec i = 3 ou 4).

PST: partie supérieure des terrassements; elle est constituée par le(s) matériau(x) situé(s) à environ 1 m en dessous de la couche de forme (c'est le dernier mètre terrassé en remblai ou en déblai permettant d'obtenir une surface (arase terrassement), surface qui servira de support à la mise en œuvre de la couche de forme (quand une couche de forme est requise)).

PST_i: cas n° i (i de 0 à 7) de PST (définie par la nature et l'état hydrique des matériaux la constituant).

Q/S: rapport du volume compacté sur la surface compactée pendant un temps donné.

RAT: repérage avant travaux (référence aux matériaux contenant de l'amiante).

RTR: guide de recommandations pour les terrassements routiers (précurseur du GTR).

S_iP_i: compacteur statique à pieds dameurs de classe i (avec i = 1 ou 2).

SRC: schémas régionaux des carrières.

V_{BS}: valeur au bleu de méthylène du sol.

V_i: compacteur vibrant de classe i (i de 1 à 5).

V_{Pi}: compacteur vibrant à pieds dameurs de classe i (i de 1 à 5).

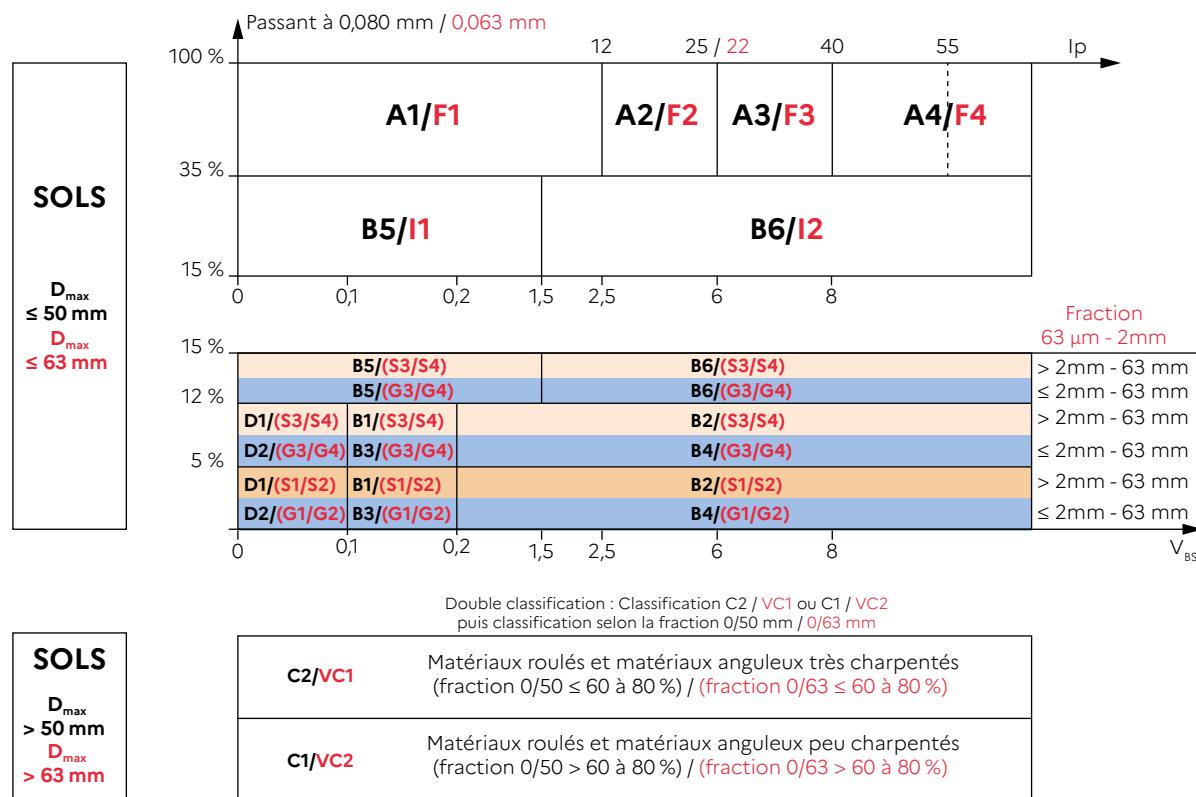
Annexes

ANNEXES

Annexe 1 : Liste des symboles utilisés

Symbole utilisé dans l'ancien GTR	Symbole issu des normes d'essai	Symbole issu de EN16907-1
LA	LA	C_{LA}
MDE	M_{DE}	C_{MDE}
FS	F_s	I_{FS}
IPI	IPI	I_{IPI}
CBR	CBR (EN13286-47) I_{CBR} immédiat (NFP94-078)	I_{CBR}
I_{CBR} après 4 j d'immersion (GTS)	I_{CBR} immergé (NFP94-078)	I_{CBRi}
Ip	I_p	I_p
lc	I_c	I_c
VBS	V_{BS} (NF EN 17542-3)	V_{BS}
FR	I_{FR} (NF EN 17542-2)	I_{FR}
DG	DG (NFP94-067) I_{DGa} (prEN17542-1)	I_{DG}
MO	MO (NFP94-055) C_{MOC} (NFP94-047) W_{LOI} (EN15935) C_{OM} (NF EN 17685-1)	C_{OM}

Annexe 2: Lien entre classification GTR 2000 et norme européenne (classification des sols)



MATÉRIAUX ROCHEUX	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R1	Ch
		Calcaires		R2	Li
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...	R3	Cl
		Roches siliceuses	Grès	R4	Sa
			Brèches, poudingues, conglomérats		Co
	Roches salines	Sel gemme, gypse		R5	Sr
	Roches magmatiques	Granites, basaltes, trachytes, andésites		R6	Vo
	Roches métamorphiques	Gneiss, schistes métamorphiques, schistes ardoisiers...			Me

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

LES NORMES

- CEN/TS 17438 « Matières premières secondaires prises en compte dans l'élaboration des normes granulats du CEN/TC 154 »
- NF EN 17542-1 « Terrassements - Essais géotechniques en laboratoire - Partie 1: Essai de dégradabilité »
- NF EN 17542-2 « Terrassements - Essais géotechniques en laboratoire - Partie 2: Essai de fragmentabilité »
- NF EN 17542-3 « Terrassements - Essais géotechniques en laboratoire - Partie 3: Valeur de bleu de méthylène V_{BS} d'un sol ou d'une roche »
- FD P11-302 « Exécution des terrassements - Réalisation des ouvrages d'étanchéité en sol compacté »
- FD P11-304 « Terrassements - Présentation des normes européennes »
- NF EN 197-1 « Ciments - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants »
- NF EN 1097-1 « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance à l'usure (micro-Deval) »
- NF EN 1097-2 « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 2 : méthodes pour la détermination de la résistance à la fragmentation »
- NF EN 1097-6 « Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau »
- NF EN 1367-1 « Essais de détermination des propriétés thermiques et de l'altérabilité des granulats - Partie 1 : détermination de la résistance au gel-dégel »
- NF EN 13242+A1 « Granulats pour matériaux traités aux liants hydrauliques et matériaux non traités utilisés pour les travaux de génie civil et pour la construction des chaussées »
- NF EN 13282-1 / P15-108-1 « Liants hydrauliques routiers à durcissement rapide - Composition, spécifications et critères de conformité »
- NF EN 13282-2 / P15-108-2 « Liants hydrauliques routiers à durcissement normal - Composition, spécifications et critères de conformité »
- NF EN 13282-3 / P15 108-3 « Liants hydrauliques routiers - Partie 3 : évaluation de la conformité »
- NF EN 13285 « Graves non traitées - Spécifications »
- NF EN 13286-2 « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 2 : méthodes d'essai de détermination en laboratoire de la masse volumique de référence et de la teneur en eau - Compactage Proctor »
- NF EN 13286-41 « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 41: méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la compression des graves traitées aux liants hydrauliques »
- NF EN 13286-42 « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 42: méthode d'essai pour la détermination de la résistance à traction indirecte des mélanges traités aux liants hydrauliques »
- NF EN 13286-43 « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 43: méthode d'essai pour la détermination du module d'élasticité des mélanges traités aux liants hydrauliques »

- NF EN 13286-47 « Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques - Partie 47: méthodes d'essai pour la détermination de l'indice portant californien (CBR), de l'indice de portance immédiate (IPI) et du gonflement linéaire »
- NF EN 14475 « Exécution de travaux géotechniques spéciaux - Remblais renforcés »
- NF EN 16907-1 « Terrassement - Partie 1 : principes et règles générales »
- NF EN 16907-2 « Terrassement - Partie 2 : classification des matériaux »
- NF EN 16907-3 « Terrassement - Partie 3 : procédés de construction »
- NF EN 16907-4 « Terrassement - Partie 4 : traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques »
- NF EN 16907-5 « Terrassement - Partie 5 : contrôle de la qualité et surveillance »
- NF EN 16907-6 « Terrassement - Partie 6 : terre-plein en remblai hydraulique dragué »
- NF EN 16907-7 « Terrassement - Partie 7 : placement hydraulique de déchets miniers »
- NF EN 1744-5 « Essais pour déterminer les propriétés chimiques des granulats - Partie 5 : détermination des sels chlorures solubles dans l'acide »
- NF EN 1997-1 « Eurocode 7 : calcul géotechnique - Partie 1 : règles générales »
- NF EN 1997-1/A1 « Eurocode 7: calcul géotechnique - Partie 1 : règles générales - Amendement 1 »
- NF EN 1997-1/NA « Eurocode 7 - Calcul géotechnique - Partie 1 : règles générales - Annexe nationale à la NF EN 1997-1:2005 »
- NF EN 1997-2 « Eurocode 7: calcul géotechnique - Partie 2 : reconnaissance des terrains et essais »
- NF EN ISO 14688-2 « Reconnaissance et essais géotechniques - Identification et classification des sols - Partie 2: principes pour une classification »
- NF EN ISO 17892-1 « Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 1: détermination de la teneur en eau »
- NF EN ISO 17892-12 « Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 12: détermination des limites de liquidité et de plasticité »
- NF EN ISO 17892-4 « Reconnaissance et essais géotechniques - Essais de laboratoire sur les sols - Partie 4: Détermination de la distribution granulométrique des particules »
- NF G38-061 « Utilisation des géotextiles et produits apparentés - Systèmes de drainage et de filtration - Dimensionnement et éléments de conception »
- NF ISO 11048 « Qualité du sol - Dosage du sulfate soluble dans l'eau et dans l'acide »
- NF P11-300 « Exécution des terrassements - Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières »
- NF P18-545 « Granulats - Éléments de définition, conformité et codification »
- NF P18-576 « Granulats - Détermination du coefficient de friabilité du sable »
- NF P94-055 « Sols: reconnaissance et essais - Détermination de la teneur pondérale en matières organiques d'un sol - Méthode chimique »
- NF P94-064 « Sols: reconnaissance et essais - Masse volumique sèche d'un élément de roche - Méthode par pesée hydrostatique »

- NF P94-078 « Sols: reconnaissance et essais - Indice CBR après immersion. Indice CBR immédiat. Indice Portant Immédiat - Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR »
- NF P94-093 « Sols: reconnaissance et essais - Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié »
- NF P94-100 « Sols: reconnaissance et essais - Matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Essais d'évaluation de l'aptitude d'un sol au traitement »
- NF P94-102-1 « Sols: reconnaissance et essais - Sol traité au liant hydraulique, éventuellement associé à la chaux, pour utilisation en couche de forme -Partie 1: définition - composition - classification »
- NF P94-102-2 « Sols: reconnaissance et essais - Sol traité au liant hydraulique, éventuellement associé à la chaux, pour utilisation en couche de forme - Partie 2: méthodologie des études de formulation en laboratoire »
- NF P94-117-1 « Sols: reconnaissance et essais - Portance des plateformes - Partie 1: module sous chargement statique à la plaque (EV2) »
- NF P94-117-2 « Sols : reconnaissance et essais - Portance des plateformes - Partie 2: module sous chargement dynamique »
- NF P94-500 « Missions d'ingénierie géotechnique - Classification et spécifications »
- NF P98-086 « Dimensionnement structurel des chaussées routières - Application aux chaussées neuves »
- NF P98-115 « Assises de chaussées - Exécution des corps de chaussées -Constituants - Composition des mélanges et formulation -Exécution et contrôle »
- NF P98-200-2 « Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 2: détermination de la déflexion et du rayon de courbure avec le deflectomètre Benkelman modifié »
- NF P98-200-3 « Essais relatifs aux chaussées - Mesure de la déflexion engendrée par une charge roulante - Partie 3: détermination de la déflexion avec le deflectographe 02 »
- NF P98-234-2 « Essais relatifs aux chaussées - Comportement au gel - Partie 2: essai de gonflement au gel des sols et matériaux granulaires traités ou non de D inférieur ou égal à 20 mm »
- NF P98-736 « Matériel de construction et d'entretien des routes - Compacteurs - Classification »
- NF P98-761 « Matériels de construction et d'entretien des routes - Compacteurs - Évaluation du moment d'excentrique »
- NF P94-001 « Repérage amiante environnemental - Étude géologique des sols et des roches en place - Mission et méthodologie »
- PR NF P94-290 « Dimensionnement des ouvrages en terre »
- PR XP CEN/TS 17006 « Terrassements - Contrôle du Compactage en Continu (CCC) »
- NF EN 17685-1 « Terrassements - Essais chimiques - Partie 1 : détermination de la perte au feu »

NORMES CITÉES DANS LE FASCICULE 2

- NF EN 933-11 « Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 11 : essai de classification des constituants de gravillons recyclés »
- NF EN 1744-1+A1 « Essais visant à déterminer les propriétés chimiques des granulats - Partie 1 : analyse chimique »

AUTRES NORMES

- NF ISO 14388-2 « Qualité du sol - Méthode de comptage acide-base pour les sols sulfatés acides - Partie 2 : méthode de sulfato-réduction au chrome »
- NF P11-301 « Exécution des terrassements - Terminologie »
- NF P98-705 « Matériels de construction et d'entretien des routes - Compacteurs - Terminologie et spécifications commerciales »
- NF P98-737 « Matériels de construction et d'entretien des routes - Compacteurs - Évaluation des performances de compactage »
- NF P98-760 « Matériel de construction et d'entretien des routes - Compacteurs à pneumatiques - Évaluation de la pression de contact au sol »

LES GUIDES ET NOTES TECHNIQUES

- Guide d'application - *Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière - Les laitiers sidérurgiques* (Sétra, 2012)
- Guide d'application - *Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière - Les mâchefers d'incinération de déchets non dangereux* ((MIDND), Sétra, 2012)
- Guide d'application - *Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière - Les matériaux de déconstruction issus du BTP* (Cerema, 2016)
- Guide d'application - *Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière - Les cendres de centrale thermique au charbon pulvérisé* (Cerema, 2019)
- Guide d'application - *Acceptabilité environnementale de matériaux alternatifs en technique routière - Les sables de fonderie* (Cerema, 2019)
- Guide méthodologique - *Acceptabilité de matériaux alternatifs en technique routière - Évaluation environnementale* (Sétra, 2011)
- Guide technique - *Conception et réalisation des terrassements - Fascicule 1 : études et exécution des travaux* (Sétra, 2007)
- Guide technique - *Conception et réalisation des terrassements - Fascicule 2 : organisation des contrôles* (Sétra, 2007)
- Guide technique - *Conception et réalisation des terrassements - Fascicule 3 : méthodes d'essais* (Sétra, 2007)
- Guide technique - *Drainage routier* (Sétra, 2006)
- Guide technique - *Remblayage des tranchées et réfection des chaussées* (LCPC-SETRA, 1994)
- Guide technique - *Retrait et gonflement des argiles - Caractériser un site pour la construction, guide n° 1* (IFSTTAR, 2017)
- Guide technique - *Traitements des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques - Application à la réalisation des remblais et des couches de forme* (LCPC-SETRA, 2000)
- Note d'information - *Chaussées - Dépendances n° 114 - Éléments techniques pour la conception et la réalisation de planches d'essais de compactage dans les chantiers de terrassements* (Sétra, 2005)
- Note d'information - *Chaussées - Plateformes - Assainissement n° 1 - Méthodologie de mesure de la portance des plates-formes* (Cerema, 2018)

- Note d'information - *Ouvrages d'art n°34 - Construire des remblais contigus aux ouvrages d'art - Murs de soutènement et culées de pont* (Sétra, 2012)
- Recommandation - *Météorologie et terrassements* (LCPC-SETRA, 1986)
- Recommandations pour l'emploi des géosynthétiques dans la lutte contre l'érosion (CFG, 2003)
- Recommandations pour l'emploi des géosynthétiques dans les systèmes de drainage et de filtration, CFG

AUTRES GUIDES ET NOTES D'INFORMATION

- Caractérisation, mise en œuvre et contrôle du compactage des mâchefers d'incinération d'ordures ménagères (MIOM) dans le domaine des terrassements (BLPC n° 275 avril/mai/juin 2009, QUIBEL-EVAIN).
- Guide technique *Organisation de l'assurance qualité dans les travaux de terrassement* (LCPC-SETRA, 2000)

AUTRES DOCUMENTS

- Arrêté du 18 novembre 2011 relatif au recyclage en technique routière des mâchefers d'incinération de déchets non dangereux (JORF n° 0277 du 30 novembre 2011)

TRADUCTION

Guide to earthworks, embankments and capping layers - Part 1 - General Principles

The earthworks described in this guide consist of creating an earthwork platform for transport infrastructure or buildings, using natural ground or external materials.

First published in 1992, revised in 2000 and commonly referred to as the GTR or Guide for Road Earthworks, this document has been updated in a 2023 edition that incorporates the European Classification and defines the conditions of use, implementation and compaction of materials for embankments and capping layers.

It offers information that can be applied to earthworks projects on infrastructure other than roads, such as railways, and to the development of other platforms, such as buildings or logistics platforms, provided that the specific rules for each are taken into account.

Guía de movimientos de tierras de rellenos y subrasantes - Entrega 1 - Principios generales

Las operaciones de movimientos de tierras que se describen en esta guía consisten en crear a partir del terreno natural existente o de materiales externos, un terraplén que forme la plataforma de apoyo de infraestructuras de transporte o edificios.

Publicada por primera vez en 1992, revisada en el año 2000 y conocida comúnmente como la guía GTR de movimientos de tierras en carreteras, esta guía se actualizó en 2023 con una nueva edición que incorpora la clasificación europea y define las condiciones de uso, aplicación y compactación de los materiales en rellenos y subrasantes.

Aporta conocimientos que pueden aplicarse a proyectos de movimientos de tierras en infraestructuras distintas a las de carreteras, como pueden ser las vías férreas, así como al desarrollo de otras plataformas, como las de edificaciones o plataformas logísticas, siempre que se tengan en cuenta las normas específicas aplicables en cada caso.

LE CEREMA, L'EXPERTISE PUBLIQUE POUR LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET LA COHÉSION DES TERRITOIRES

Le Cerema, Centre d'Études et d'Expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement, est un établissement public qui apporte son concours à l'État et aux collectivités territoriales pour l'élaboration, la mise en œuvre et l'évaluation des politiques publiques au service de la transition écologique, de l'adaptation au changement climatique et de la cohésion des territoires. Il porte des missions de recherche & innovation et appuie le transfert d'innovations dans les territoires et auprès des acteurs privés.

Le Cerema agit dans 6 domaines d'activité: Expertise & Ingénierie territoriale, Bâtiment, Mobilités, Infrastructures de transport, Environnement & Risques, Mer & Littoral. Présent partout en métropole et dans les Outre-mer par ses 27 implantations, il développe une expertise de référence au contact de ses partenaires européens et contribue à diffuser le savoir-faire français à l'international.

Le Cerema capitalise les connaissances et savoir-faire dans ses domaines d'activité. Éditeur, il mène sa mission de centre de ressources en ingénierie par la mise à disposition de près de 3000 références à retrouver sur www.cerema.fr rubrique nos publications.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (article L.122-4 du Code de la propriété intellectuelle). Cette reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles L.335-2 et L.335-3 du CPI.

Cet ouvrage a été imprimé sur du papier issu de forêts gérées durablement (norme PEFC) et fabriqué proprement (norme ECF). L'imprimerie Dupliprint est une installation classée pour la protection de l'environnement et respecte les directives européennes en vigueur relatives à l'utilisation d'encre végétales, le recyclage des rognures de papier, le traitement des déchets dangereux par des filières agréées et la réduction des émissions de COV.

Coordination : Direction de la Stratégie et de la Communication / Pôle éditions

Conception de la maquette graphique : Farénis

Mise en page : Gaëlle Bouché

Impression : Dupliprint, 733 rue Saint-Léonard 53100 Mayenne

Achevé d'imprimer : Août 2024

Dépôt légal : Août 2024

ISBN : 978-2-37180-678-8 (pdf) - 978-2-37180-609-2 (papier) - ISSN : 2276-0164

Éditions du Cerema

Cité des mobilités

25, avenue François Mitterrand CS 92803 - 69674 Bron Cedex - France

www.cerema.fr

GUIDE DES TERRASSEMENTS DES REMBLAIS ET DES COUCHES DE FORME

FASCICULE N°1 Principes généraux

Les opérations de terrassements décrites dans le présent guide consistent à réaliser, à partir du terrain naturel en place ou de matériaux d'apport extérieur, un ouvrage en terre constituant la plateforme support des infrastructures de transport ou des bâtiments.

Édité pour la première fois en 1992, revu en 2000 et communément appelé guide GTR pour guide des terrassements routiers, ce guide est ici mis à jour en une édition 2023 qui reprend la classification européenne puis définit les conditions d'emploi, de mise en œuvre et de compactage des matériaux en remblais et en couches de forme.

Il apporte des enseignements qui peuvent s'appliquer à des projets de terrassement d'autres infrastructures que les routes, comme les voies ferrées ainsi qu'aux aménagements d'autres plateformes comme les plateformes de bâtiments ou logistiques, à condition de tenir compte des règles spécifiques à chacune d'entre elles.



EXPERTISE & INGÉNIERIE TERRITORIALE | BÂTIMENT | MOBILITÉS
| INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT | ENVIRONNEMENT &
RISQUES | MER & LITTORAL