

GMTR
GUIDE MAROCAIN POUR
LES TERRASSEMENTS
ROUTIERS

FASCICULE I : PRINCIPES GENERAUX

PRESENTATION

Le Guide Marocain des Terrassements Routiers a pour objectifs de traiter les principaux aspects techniques liés à l'étude des projets et la conduite des travaux de construction des remblais et des couches de forme. Il est composé des sept chapitres qui traitent des aspects suivants :

- Rappel des données géotechniques nécessaires pour les études de projet.
- La classification des sols et des roches.
- Les conditions d'utilisation des matériaux en remblais.
- Les conditions d'utilisation des matériaux en couches de forme.
- Le compactage des remblais et des couches de forme.
- Le contrôle de compactage.
- Les dispositions constructives à adopter pour les remblais particuliers : remblais en zone inondable, remblais contigus aux ouvrages d'Art et remblais de Grande hauteur.
- Le compactage à sec.

CHAPITRE 0

RAPPEL DES DONNEES GEOTECHNIQUES NECESSAIRES A L'ETABLISSEMENT D'UN PROJET DE TERRASSEMENTS

O.1 – DONNEES GEOTECHNIQUES NECESSAIRES A L'ETABLISSEMENT D'UN PROJET DE TERRASSEMENTS (RAPPELS)

*L*e projet de terrassements doit faire l'objet d'un dossier d'étude géotechnique.

Ce dossier d'étude géotechnique doit permettre d'identifier et de classer tous les sols rencontrés lors des sondages exécutés dans les zones à déblayer et dans les assises de remblai.

Ainsi une coupe de chaque sondage et un schéma lithologique de chaque déblai avec d'éventuels profils en travers pour les déblais importants et hétérogènes doivent mettre en évidence les différents types de sols rencontrés, avec description de chaque nature de sols la plus complète possible (intégrant la nature pétrographique dans le cas des roches) , en délimitant les différentes couches.

Les sols sont regroupés en 3 catégories principales : sols meubles, matériaux rocheux évolutifs et matériaux rocheux sains.

1. Sols meubles :

- a) Sur chaque sondage doit figurer l'endroit exact du prélèvement représentatif de la couche considérée et donc du sol identifié.

Les conditions de prélèvement sont décrites notamment dans le cas des sols grossiers où il peut être procédé sur place à un écrêtement des gros éléments dont il faut estimer le pourcentage.

Il est nécessaire aussi de donner des indications sur l'état d'humidité du matériau et mieux prélever un échantillon pour mesure de la teneur en eau en place quand les couches varient rapidement (épaisseur faible). Il faut particulièrement veiller à l'échantillonnage pour connaître exactement sa représentativité.

- b) Il est procédé alors en laboratoire à l'identification des sols (granulométrie, propreté, limites d'atterberg et équivalent de sable). A partir de ces éléments, un classement du sol est effectué.

- c) A partir de ces données un jugement est fait concernant la nécessité de compactage dans le cas d'assise de remblai .La nécessité de compacter cette assise est justifiée s'il y a eu un foisonnement du sol . Un jugement est également fait sur les conditions de réemploi en remblai et couche de forme de

ces sols. Il est à noter que les conditions de déblaiement peuvent amener, surtout dans le cas des zones hétérogènes, à des mélanges produisant des matériaux différents de ceux qui ont été identifiés en laboratoire.

- d) Pour chaque famille de sol identifié, un jugement est donné concernant les aspects suivants :
- Les problèmes d'extraction au vu de l'état d'humidité et des conditions météorologiques.
 - Les problèmes de sensibilité à l'eau (variation d'état plus ou moins rapide, matelassage possible, glissance, érodabilité à la pluie).
 - Les possibilités d'amélioration de la teneur en eau in-situ (arrosage, aération).
 - Les matériels de compactage les plus adéquats pour les épaisseurs les plus recommandables et notant que même en 20 cm d'épaisseur tout sol même admissible en remblai n'est pas toujours compactable suivant les engins utilisés et son état hydrique
 - Les problèmes de contrôle de la mise en oeuvre en soulignant les problèmes des références Proctor dans les sols grossiers et dans les sols très hétérogènes, de même l'utilisation des essais de plaque sur sols sensibles à l'eau, graveleux, etc
 - Les possibilités de mise en oeuvre et de compactage à sec dans les zones arides.

2. Sols rocheux évolutifs :

- a) La méthode de reconnaissance utilisée doit être précisée (puits manuels, à la pioche, au marteau piqueur, éventuels sondages mécaniques), selon cette méthode, on aura une description de la coupe de sol ou d'un échantillon. Le prélèvement peut avoir en conséquence une représentativité très différente (blocs, produit de carottage).

Dans le cas des puits, il est nécessaire de donner les indications les plus complètes possibles sur un éventuel litage, les hétérogénéités en cimentation ...

- b) En laboratoire, les identifications des échantillons pourront être effectuées à partir d'essais granulométriques et de limite d'Atterberg complétés si possible, par des essais de dureté LOS ANGELES et MICRO-DEVAL , ou même des résistances à la compression (pour le cas des sols les plus massifs). Des essais de fragmentabilité (ou Proctor) et d'altérabilité (cycle humidification - séchage) pourront être utilisés.

A partir de ces éléments, une estimation est faite concernant le type de matériau le plus probable qui sera obtenu suivant le type d'extraction ; en essayant de dégager les sols évolutifs à l'extraction et à la mise en oeuvre seulement et ceux dont l'évolution peut se poursuivre au-delà dans le corps des remblais. Il est à noter aussi que le caractère argileux de certains

matériaux évolutifs est lui aussi déterminant, dans ce cas des essais complémentaires d'altérabilité peuvent permettre le choix des matériaux réutilisables.

- b) Ce produit pourra être alors classé selon la classification des sols meubles, ce qui permettra de prévoir le mode de réutilisation possible qui se compose généralement :
- d'une 1^{ère} étape d'extraction
 - d'une 2^{ème} étape de réglage et fractionnement in-situ par des engins de compactage
 - d'une 3^{ème} étape de compactage proprement dit sur le matériau obtenu à la fin de la 2^{ème} étape.

Ces trois (3) étapes peuvent faire l'objet d'une planche expérimentale surtout pour des chantiers importants, planche qu'il faudra proposer.

- d) Les problèmes relatifs au contrôle sont liés au stade d'évolution du matériau atteint en fin de 2^{ème} étape et en se rapportant au contrôle défini pour les sols meubles.

Un contrôle intermédiaire peut donc s'avérer nécessaire, portant sur l'évolution réellement atteinte en fin de 2^{ème} étape.

3. Sols rocheux :

- a) La méthode de reconnaissance (sondage mécanique destructif ou carotté ou simple observation sur talus existants (cas extrême), doit être précisée avec toutes les indications relatives aux pendages et fracturations (voir système de classification exposée dans le guide pour les études géotechniques routières).
- b) A partir des données ci-dessus éventuellement complétées par des vitesses sismiques sur échantillons de roches, une méthode d'extraction (ripage ou explosifs) est élaborée ainsi qu'une évaluation des matériaux produits. Une première classification peut être réalisée suivant les dispositions du présent document concernant les matériaux rocheux.
- c) Les matériaux produits doivent être classés selon la classification des sols meubles.
- d) Des planches expérimentales (ou de convenance) d'extraction et de tir ainsi que de mise en oeuvre seront généralement nécessaires et devront être proposées.

e)Le contrôle s'effectuera suivant la méthode prescrite dans le présent document.

CHAPITRE I

CLASSIFICATION DES SOLS ET DES ROCHES POUR TRAVAUX DE TERRASSEMENTS

I.1 – PRINCIPES DE LA CLASSIFICATION DES SOLS ET DES ROCHES

*L*e C.P.C Marocain des travaux routiers classe les sols suivant la classification L.P.C cette classification peu adéquate pour les travaux de terrassements se base uniquement sur les paramètres de nature à savoir la granularité et l'argilosité.

L'introduction du concept de couches de forme dans la technique routière marocaine a amené à les considérer comme faisant partie intégrante des travaux de terrassements et à compléter les éléments de classification par les paramètres de comportement mécanique à savoir : la résistance à la fragmentation Los Angeles (LA), la résistance à l'usure MICRO-DEVAL (MDS et MDE), ainsi que les essais de fragmentabilité et de dégradabilité. Ces paramètres sont à compléter par les paramètres d'état qui renseignent sur la traficabilité et sur les conditions de mise en oeuvre des sols en remblais.

La particularité des sols marocains a amené aussi à retenir le principe d'une analyse chimique pour la détermination du taux de carbonate CaCO_3 à effectuer pour les sols et roches carbonatées par la méthode de DIETRICH - FRUHLING.

La classification retenue dans ce guide est celle qui a été adoptée au niveau du catalogue marocain des structures de chaussées neuves (édition 1996). La classification utilisée est donc la classification Française G.T.R définissant :

- Les classes A, B,C, D pour les sols meubles
- La classe R pour les matériaux d'origine rocheuse.
- La classe F pour les sols organiques et les sous produits industriels.

Elle est complétée par l'introduction de :

- ◆ La classe des sols tirseux et la classe des sols tuffacés pour les sols meubles.
- ◆ De sous-classes concernant les calcaires tendres en ce qui_ concerne les matériaux rocheux.
- ◆ De sous-classes spécifiques, pour la classe F.

I.2 – PARAMETRES DE CLASSIFICATION DES SOLS ET DES ROCHES

1. Les Paramètres de classification des sols :

Les paramètres retenus pour la classification des sols meubles se rangent en trois catégories :

- a) Les paramètres de nature : qui se rapportent aux caractéristiques intrinsèques des sols. Ces caractéristiques ne varient pas au cours des différentes manipulations que subit le sol. Ces paramètres retenus concernent la granularité et l'argilosité. En ce qui concerne l'argilosité, les paramètres sont : l'indice de plasticité (IP) et la valeur de bleu de méthylène. La V.B.S caractérise mieux les sols les moins argileux, l'indice de plasticité (IP) caractérise mieux les sols moyennement à très argileux.

- b) Les paramètres de comportement mécanique : qui sont la dureté Los Angeles, la résistance à l'usure MICRO-DEVAL en présence d'eau et le coefficient de friabilité des sables. Ces paramètres ne sont pris en compte que pour juger de l'utilisation du matériau en couche de forme.

- c) Les paramètres d'état : qui caractérisent l'état hydrique d'un sol. Les paramètres généralement retenus sont :
 - La valeur de la teneur en eau naturelle par rapport à celle mesurée à l'optimum Proctor

 - L'indice portant Immédiat (IPI), ce dernier est réalisé sans surcharge, ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor Normal et à sa teneur en eau naturelle. Cette caractéristique, déterminée suivant la norme P 94-078, caractérise la traficabilité du sol pendant les travaux de mise en œuvre.

 - L'indice de consistance I_c

$$I_c = \frac{W_l - W_n}{IP}$$

Où :

W l : limite de liquidité

I_p : Indice de plasticité

W_n : Teneur en eau naturelle du sol

- Ces paramètres d'état permettent de définir cinq états hydriques qui sont : l'état très sec(**ts**) , sec(**s**) , moyennement humide(**m**) et humide(**h**) .

2. La sensibilité à l'eau

La sensibilité à l'eau d'un sol définit l'importance de la variation de la portance de ce sol en fonction de la variation de la teneur en eau. Plus la chute de portance est élevée , pour une augmentation de teneur en eau ,et plus la sensibilité à l'eau du sol est importante .

Une faible augmentation de la teneur en eau peut engendrer une chute rapide de la portance d'un sol, c'est le cas en général avec les sols peu plastiques ($I_p < 12$) ; cette portance redevient rapidement meilleure si la teneur en eau diminue par évaporation par exemple. Les sols les plus plastiques, quant à eux, mettent plus de temps pour changer de portance.

La notion de sensibilité à l'eau est appréhendée sous deux aspects le premier lié à l'exécution des terrassements et le second à la tenue à long terme une fois l'ouvrage mis en service.

Les sols les moins plastiques sont les plus sensibles à l'eau pour la réalisation des terrassements. Les sols les plus plastiques sont ceux qui sont susceptibles de présenter des faibles portances, dans certaines conditions, pendant la durée d'exploitation de l'ouvrage. Le comportement pendant les travaux de terrassements sera donc, déterminé en fonction des paramètres d'état et la probabilité d'évolution en fonction des conditions météorologiques.

Pour le comportement à court terme ,qui caractérise la traficabilité des matériaux pour lesquels un surcroît d'humidité amène un arrêt de chantier ,l'essai à réaliser est l'essai de portance immédiat (IPI).

Pour le comportement à long terme, lorsque la caractérisation de la portance est recherchée, le critère retenu est celui du C.B.R après immersion, avec surcharge. L'énergie de compactage retenue est celle du Proctor Modifié étant donné que cet aspect concerne surtout les utilisations en couche de forme.

3. Paramètres de classification des roches

Cette classification est adoptée lors des études des projets. Elle a pour objectif de caractériser un massif rocheux en vue de son emploi en remblai ou en couche de forme.

Le principe de la classification est le suivant ,

- a) Classification des matériaux rocheux d'après la nature pétrographique de la roche.
- b) Classification d'après les caractéristiques mécaniques : Dureté Los Angeles, Usure MICRO-DEVAL Humide.
- c) Pour les matériaux évolutifs : classification suivant la fragmentabilité (FR) et la dégradabilité (DG)

4. Cas particulier des roches évolutives :

Les matériaux rocheux évolutifs peuvent provenir de roches massives type grès ou de roches littées type schiste.

Les unes peuvent être rippables et les autres nécessiter l'usage d'explosif.

Le caractère d'évolution peut provenir,

- D'actions mécaniques externes (extraction, compactage, charge du remblai)
- D'action chimique (altération à l'eau, etc...)

Il faut s'intéresser au matériau produit après évolution :

- Sol plus ou moins fin non argileux (grès, calcarénite)
- Sol grossier non argileux (calcarénite)
- Sol plus ou moins grossier à nature argileuse (schiste. Marno -calcaire, marne, flysch, etc...)

Les critères d'évolution pris en compte concernent la fragmentation sous l'action de sollicitations mécaniques pendant les différentes manipulations de la mise en oeuvre et pendant l'exploitation de la route, ainsi que la dégradabilité sous l'action des agents atmosphériques.

Le caractère évolutif des roches sera apprécié en laboratoire par :

- Le coefficient de fragmentabilité (FR) pour l'évolution granulométrique
- Le coefficient de dégradabilité (DG) pour l'évolution par altérabilité lors de cycles alternés d'humidification séchage.
- Le degré de dissolution pour les roches salines

I.3- CLASSIFICATION DES SOLS MEUBLES – CAS GENERAL

Cette classification ne concerne pas les sols particuliers suivants :

- Les sols tirseux
- Les sols tuffacés

Qui font l'objet de classifications spécifiques.

La classification des sols, dans le cas général, se fait sur la base des trois paramètres ci-dessus mentionnés (1.2.1). Les sols sont classés suivant la classification Française G.T.R. Cette classification présente quatre classes des sols (classes A; B;C et D) qui se présentent comme suit :

La classe A : les sols fins (silts, limons, argiles, etc....)

Elle contient les sols fins qui présentent un D max. < 50 mm et un tamisat à 80 μm > 35 %. Elle contient quatre sous-classes A1, A2, A3 et A4 suivant l'importance de la plasticité :

A1 : sous classe des sols fins peu plastique :

Les sols avec $VBS \leq 2,5$ ou $IP \leq 12$

A2 : sous classe des sols fins moyennement plastiques :

Les sols avec $12 < IP \leq 25$ ou $2,5 < VBS \leq 6$

A3 : sous classe des sols fins plastiques (argiles marnes, limons plastiques) :

Les sols avec $25 < IP \leq 40$ ou $6 < VBS \leq 8$

A4 : sous classe des sols fins très plastiques (argiles et marnes) :

Les sols avec $IP > 40$ ou $VBS > 8$

La classe B : les sols sableux ou graveleux avec fines :

Elle contient les sols sableux et graveleux avec fines avec un D max. ≤ 50 mm et un tamisat à 80 μm inférieur ou égal à 35 %. Elle se subdivise en 6 sous-classes B1, B2 B3, B4, B5, et B6 et ce suivant l'importance et les caractéristiques des fines et l'importance de la fraction sableuse, ces sous classes se subdivisent en d'autres

sous classes et ce en fonction de la dureté ou la friabilité . L'ensemble des sous-classes se présentent comme suit :

B₁ : Sous classe des sables silteux :

- Tamisat à 2 mm > 70 %
- Tamisat à 80 μ m ≤ 12 %
- $0,1 \leq VBS \leq 0,2$

Sous-classe : B 11 si FS ≤ 60

Sous-classe : B 12 si FS > 60

B₂ : Sous classe des sables peu argileux :

- Tamisat à 2 mm > 70 %
- Tamisat à 80 μ m ≤ 12 %
- VBS > 0,2

Sous-classe : B 21 si FS ≤ 60

Sous-classe : B 22 si FS > 60

B₃ : Sous classe des graves silteuses :

- Tamisat à 2 mm ≤ 70 %
- Tamisat à 80 μ m ≤ 12 %
- $0,1 \leq VBS \leq 0,2$

Sous –classe : B 31 si LA ≤ 45 et MDE ≤ 45

Sous –classe : B 32 si LA > 45 ou MDE > 45

B₄ – Sous classe des graves peu argileuses :

- Tamisat à 2 mm ≤ 70 %
- Tamisat à 80 μ m ≤ 12 %
- VBS > 0,2

Sous –classe : B 41 si LA ≤ 45 et MDE ≤ 45

Sous –classe : B 42 si LA > 45 ou MDE > 45

B₅ : Sous classe des sables et graves très silteux :

- Tamisat à 80 μ m compris entre 12 % et 35 %
- VBS ≤ 1,5 (ou IP ≤ 12)

Sous –classe : B 51 si LA ≤ 45 et MDE ≤ 45

Sous –classe : B 52 si $LA > 45$ ou $MDE > 45$

B₆ : Sous classe des sables et graves argileux:

- Tamisat à 80 μm compris entre 12 % et 35 %
- VBS > 1,5 (ou IP > 12)

La classe C

Elle contient les sols comportant des fines et des gros éléments avec :

Un D max > 50 mm et un tamisat à 80 μm > 12 % et dans le cas où le tamisat à 80 μm \leq 12 %, la V.B.S est > 0,1.

Cette classe est subdivisée en deux grandes sous classes C₁ et C₂.

La sous-classe C₁ : contient 1 - les matériaux roulés
et 2 - les matériaux anguleux peu charpentés
(où le 0/50 représente plus de 60 à 80 % du O/D)

La sous classe C₂ : contient les matériaux anguleux très charpentés
(0/50 \leq 60 à 80 % du O/D)

Ces deux sous-classes C₁ et C₂ se subdivisent en d'autres sous-classes C1Ai ou C1Bi ou C2Ai ou C2Bi avec Ai ou Bi la classe de la fraction 0/50 mm du matériau O/D.

La classe D : Sables et graves propres

Elle contient les sols insensibles à l'eau. Ces sols présentent une V.B.S \leq 0,1 et un tamisat à 80 μm \leq 12 %.

Cette classe contient 3 sous classes qui se présentent comme suit :

La sous classe D₁ : contient les sables propres (alluvionnaires et autres...)

- D max \leq 50 mm
- Et passant à 2 mm > 70 %
 - Sous-classe : D11 si FS \leq 60
 - Sous-classe : D12 si FS > 60

La sous-classe D₂ : contient les graves propres (alluvionnaires et autres...)

- D max \leq 50 mm
- et passant à 2 mm \leq 70 %

Sous-classe : D21 si $LA \leq 45$ et $MDE \leq 45$

Sous-classe : D22 si $LA > 45$ ou $MDE > 45$

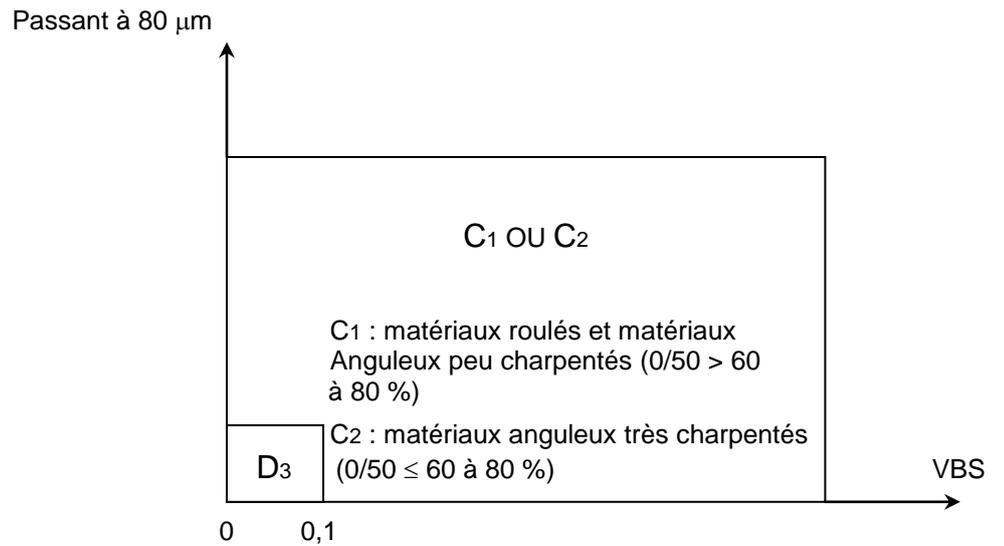
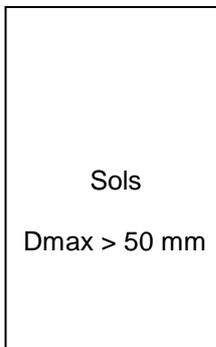
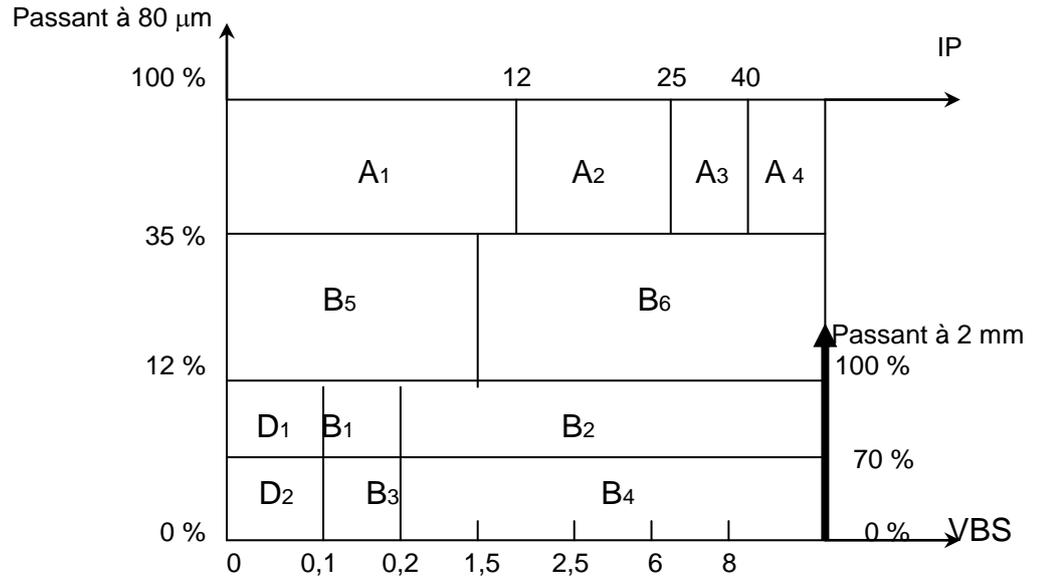
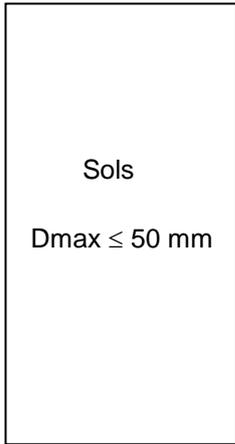
*

La sous classe D₃ : contient les graves propres avec éléments à diamètre supérieur à 50 mm

Sous-classe : D31 si $LA \leq 45$ et $MDE \leq 45$

Sous-classe : D32 si $LA > 45$ ou $MDE > 45$

Le tableau synoptique ci-après représente cette classification générale des sols meubles. La classification détaillée suivant les paramètres d'état, figure dans le fascicule n° II.



(Tableau extrait du GTR Français)

I.4 - CAS DES SOLS TIRSEUX

*L*es sols tirseux sont des sols fins noirs à gris foncés, généralement situés en couverture, qui présentent une forte instabilité volumétrique. Ces sols se caractérisent par une forte fissuration par retrait en saison sèche et par un fort gonflement à l'état humide. Le catalogue des structures des chaussées neuves les caractérise par les paramètres suivants :

- L'indice d'instabilité volumétrique : $WI - Wr > 42$ avec
WI (limite de liquidité) > 53
Wr (limite de retrait) < 13

La plasticité de ces sols permet de définir deux sous-classes :

- T x A3 : pour les sols avec $I_p \leq 40$
- T x A4 : pour les sols avec $I_p > 40$

Les sols tirseux sont très présents en couverture dans la plaine du Gharb et dans la plaine de Berrechid. Les épaisseurs peuvent être importantes au niveau de la plaine du Gharb. Ces épaisseurs sont faibles au niveau de la plaine de Berrechid où ces sols reposent en général sur des tufs et des encroûtements calcaires.

I.5 – CAS DES SOLS TUFFACES

*L*es tufs sont des sols calcaires. Ils peuvent se présenter sous forme de sols fins ou de sols graveleux à squelette plus ou moins indurés. Ces sols sont fréquemment rencontrés dans les plaines de Chaouia, Doukkala et Abda et sont généralement situés sous les sols de couverture avec ou sans encroûtement en partie supérieure.

Leur comportement dans le long terme et dans les conditions hydriques où ces sols sont rencontrés est nettement supérieur à celui que l'on pourrait prévoir par les seules caractéristiques habituelles d'identification.

L'élément prédominant qui caractérise ce comportement est le taux de carbonate de calcium (CaCO₃).

La classification se fera :

- ◇ En faisant apparaître le degré de calcification suivant le mode opératoire agréé par l'Administration .
 - Si CaCO₃ ≤ 70 % : tuf faiblement carbonaté Tf
 - Si CaCO₃ > 70 % : tuf fortement carbonaté Tc

En prenant en compte la classification générale pour les sols meubles :

- Soit : Tf Ai ou Tf Bi
- Soit : Tc Ai ou Tc Bi

Selon que le sol est classé en Ai ou Bi

I.6 – CLASSIFICATION DES ROCHES

*L*a classification des roches, dans le cas général, se fera de la manière suivante :

- Classification d'après la nature pétrographique de la roche
- Classification d'après les caractéristiques mécaniques

La nature pétrographique permet de distinguer deux classes de matériaux rocheux :

- Les roches sédimentaires
- Les roches magmatiques et métamorphiques

La classification d'après les caractéristiques mécaniques renseignent sur la résistance du matériau à la fragmentation ,à l'usure et à l'évolution.

La classification des matériaux rocheux se présente comme suit :

1. Roches Sédimentaires :

a - Roches carbonatées

Classe R1 : la Craie (pour mémoire)

- Classe R2 : - Grès calcaire dunaire (calcarénite) (R23)
- Encroûtements calcaires (R23)
- Calcaire marneux (R24)
- Calcaires durs , calcaires dolomitiques et calschistes (R21)
- Calcaires moyennement durs (R 22)

b – Roches Argileuses

- Classe R3 : - Marnes
- Schistes sédimentaires
- Argilites
- pelites
- et flyschs marneux

c – Roches siliceuses

- Classe R4 : - Grès siliceux
- Grès argileux
- Poudingues
- Brèches

d – Roches Salines

- Classe R5 : - Gypse
- Gypse marneux
- Sel gemme

e – Roches magmatiques et métamorphiques

- Classe R6 : - Granite
- Basalte
- Diorite
- Quartzite
et - autres roches éruptives et métamorphiques dures

Le tableau synoptique ci-après résume les dispositions de cette classification.

CLASSIFICATIONS DES MATERIAUX ROCHEUX

Roches sédimentaires	Roches carbonatées	- CRAIES - Grès calcaires - Calcarénite - Encroûtements calcaires - Calcaire marneux - Calschistes - Calcaires durs - Calcaires dolomitiques	R1 R2
	Roches argileuses	- Marnes - Schistes sédimentaires - Flyschs marneux - Argilites - Pelites	R3
	Roches siliceuses	- Grès argileux - Grès siliceux - Poudingues - Brèches	R4
	Roches salines	- Gypse - Gypses marneux - Sel gemme	R5
Roches Magmatiques et Métamorphiques	- Granite - Basalte - Diorite - Quartzite - Autres roches éruptives et métamorphiques dures	R6	

La classification détaillée figure dans le fascicule II.

I.7 – CLASSIFICATION DES SOLS ORGANIQUES ET DES SOUS-PRODUITS INDUSTRIELS

Cette classification est mentionnée uniquement pour mémoire. Le peu d'expérience cumulée en matière d'utilisation en remblai des matériaux qu'elle contient ne permet pas de définir des règles définitives, concernant les modalités d'utilisation de ces matériaux.

La classe F relative à ces matériaux contient les sous-classes provisoires suivantes :

F1 : sous-classe relative aux matériaux naturels renfermant des matières organiques

F2 : sous-classe relative aux cendres volantes des centrales thermiques.

F3 : sous-classe relative aux déchets de phosphates.

F4 : sous-classe relative aux pouzzolanes.

F5 : sous-classe relative aux matériaux de démolition.

F6 : sous-classe relative aux autres déchets et sous-produits industriels.

CHAPITRE II

LE CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN REMBLAIS

II.1 – PREAMBULE

*L*es matériaux ont fait l'objet d'une classification pour terrassements. L'objectif est donc de fixer les principes pour leur utilisation en remblais.

Les principes retenus pour la définition des conditions d'utilisation des matériaux en remblais sont les suivants :

- ◇ Viser le niveau de qualité technique, juste nécessaire compte tenu des possibilités des matériels et techniques d'exécution dans le contexte marocain.
- ◇ Etablir des solutions conformes au contexte technico-économique national.

L'objectif recherché est de pouvoir proposer pour le maximum possible des sols rencontrés au niveau d'un tracé ou d'un emprunt les conditions d'utilisation en respectant les principes cités ci-dessus.

Il va de soi que les moyens à mettre en oeuvre commencent déjà au niveau des opérations d'extraction au niveau du déblai ou de l'emprunt, ceci est le cas par exemple pour les matériaux évolutifs, les sols sensibles à l'eau, ou les sols hétérogènes pour lesquels il va falloir adapter les modalités d'extraction.

L'état d'humidité joue un rôle important dans la mise en oeuvre et certaines actions sont parfois nécessaires pour jouer sur ce paramètre, tels que la scarification ou au contraire l'humidification pour l'adapter aux conditions climatiques qui règnent pendant la mise en oeuvre. Certaines actions mécaniques peuvent également s'avérer nécessaires tel que la fragmentation pour les sols évolutifs.

Le C.P.C a déjà défini des conditions pour la réutilisation de certains sols et roches. Ces conditions restent cependant à préciser davantage.

Les éléments sur lesquels il faut agir pour utiliser un matériau en remblai sont les suivants :

- le mode d'extraction
- le mode d'élaboration du matériau extrait
- la mise en oeuvre proprement dite

II.2- LES SOLS UTILISABLES EN REMBLAI COURANT

On distingue les remblais courants des autres remblais particuliers. Les remblais particuliers concernent : les remblais en zones inondables, les remblais de grande hauteur (dont la hauteur dépasse 15 m) et les remblais contigus aux ouvrages.

Pour les remblais courants (dont la hauteur ne dépasse pas 15 m), l'article 2 du fascicule 3 du C.P.C fixe les caractéristiques des matériaux extraits des déblais ou des emprunts et qui sont destinés à être réutilisés en remblais. Ces caractéristiques sont les suivantes :

Conditions générales :

- ◇ Sols exempts d'éléments végétaux de toute nature et de toute quantité appréciable d'humus.
- ◇ D max. du sol $\leq 2/3$ de l'épaisseur de la couche élémentaire du remblai afin de faciliter le compactage.
- ◇ D max. du sol ≤ 200 mm au niveau de la couche supérieure du remblai pour assurer un bon nivellement à l'arase des terrassements.

Sols utilisables sans restriction :

- ◇ Les sols rocheux non évolutifs. Le caractère évolutif a été défini au niveau de la classification des roches.
- ◇ Les sols grenus des catégories : B, D, CA, CB, sauf les sols : D1, B1, B2 (avec VBS < 1,5), CA3, CA4, CB1 et CB2 (avec VBS < 1,5).
- ◇ Les sols fins des catégories A1, A2.
- ◇ Tous les sols tuffacés des catégories Tc et Tf, sauf ceux du type B1 et B2 (avec VBS < 1,5).

Sols utilisables avec restrictions :

3.1 – Hauteur de remblai limitée à 8 m

- ◇ Pour les sols des catégories A3 et CA3.

3.2 – Couverture de protection anti-érosive d'épaisseur au moins de 15 cm

- ◇ Pour les sols grenus : B1, B2 (VBS < 1,5), CB1, CB2, D1
- ◇ Pour les sols tuffacés : TC et Tf de type B1 et B2 (VBS < 1,5)

3.3 – Traitement ou protection à définir par une étude spéciale de laboratoire pour :

- ◇ les roches évolutives
- ◇ les sols tirseux

Il est à noter qu'il est difficile de fragmenter des sols de classe de forte plasticité ($I_p > 25$) quand ils sont à l'état sec et que dans le cas où un traitement est retenu il est généralement réalisé avec la chaux .

3.4 – Traitement à la chaux vive des sols trop humides au moment des travaux

- ◇ Si l'indice portant immédiat (IPI) ≤ 5 pour les sols A1, A2, A3 , B2, B6.
- ◇ Si l'IPI ≤ 12 pour B4 , B5 , les composés CA1 ,CA2 ,CA3 , CB2, CB4, CB5 et CB6

Il est à noter que pour ces sols le traitement envisagé est à adapter à la teneur en eau réelle pendant la réalisation des travaux de remblai. L'opération de traitement est envisagée en tant que variante à la solution plus économique qui consiste à profiter des conditions météorologiques favorables pour réduire la teneur en eau du sol. Le recours à cette dernière solution est recommandée.

Sols non utilisables :

- ◇ Les sols tirseux sans traitement adéquat à définir (TA3 et TA4).
- ◇ Les sols de classe A4 ou CA4.

II.3 – LES CONDITIONS D'UTILISATION A IMPOSER

*L*es conditions pouvant être imposées pour utiliser un matériau en remblai concernent les rubriques suivantes :

1. Le mode d'extraction :

L'extraction d'un matériau meuble ou tendre peut se faire :

- par couches généralement de 10 à 30 cm ou
- par extraction frontale.

L'extraction par couches présente les avantages suivants :

- meilleure maîtrise des caractéristiques géotechniques des matériaux.
- une bonne fragmentation des matériaux pour lesquelles cette action est recherchée, comme les matériaux évolutifs par exemple.

L'extraction par couches permet également d'exposer le matériau aux agents atmosphériques, ceci est recherché dans le cas où une action sur la teneur en eau est bénéfique. Dans le cas contraire, cette exposition devient un handicap.

L'extraction frontale permet, quant à elle :

- de choisir la formation géotechnique sur laquelle circule les engins de terrassements,
- de ne pas exposer les matériaux aux agents atmosphériques et donc ne pas agir sur la teneur en eau.

En ce qui concerne les matériaux rocheux compacts, le recours à des planches d'essais de tir s'avère généralement nécessaire pour fixer les conditions d'extraction du matériau.

Le mode d'élaboration du matériau extrait :

Ce mode d'élaboration comporte toutes les actions préalables susceptibles de préparer le matériau avant de le mettre dans le remblai. Ces actions peuvent concerner : la granulométrie du matériau, sa teneur en eau et l'éventuel traitement avec un ou des liants appropriés.

L'action sur la granularité du matériau se rapporte à trois situations :

- *L'élimination des éléments dont le D max. est > à 800 mm.* Cette conditions s'applique au matériaux rocheux et aux sols grossiers. Elle fixe la dimension maximale des éléments pouvant entrer dans la construction d'un remblai sous réserve que les engins de compactage utilisés permettent de compacter une couche de 1 m du matériau considéré.
- *L'élimination des éléments dont le D max. est > à 250 mm.* Cette condition s'applique aux sols sensibles à l'eau se trouvant dans un état hydrique nécessitant un traitement à la chaux ou aux liants hydrauliques pour pouvoir être réutilisés. La valeur de 250 mm constitue la limite de faisabilité du malaxage avec des engins du type charrues qui sont les engins capables de fournir une qualité normale pour le traitement des remblais.

En ce qui concerne la partie supérieure des terrassements, cette élimination concerne également les éléments > 200 mm.

- *La fragmentation complémentaire après extraction.* Cette condition est propre aux matériaux rocheux évolutifs, pour lesquels la qualité de la mise en oeuvre exige l'obtention d'une granulométrie la plus étalée possible et ceci d'autant plus qu'ils sont dégradables. Le résultat à obtenir n'est pas précisé, il dépend de l'importance des risques induits par la dégradabilité du matériau et doit être apprécié selon chaque cas.

L'action sur la teneur en eau se rapporte à trois situations :

- *L'arrosage pour maintien de l'état hydrique* : qui consiste en un simple arrosage durant la mise en oeuvre lorsque les conditions météorologiques sont "évaporantes".
- *L'humidification pour changer l'état hydrique* : qui vise un changement d'état hydrique du matériau. Elle exige de grandes quantités d'eau et un malaxage important. Cette action est peu recommandée pour le contexte marocain et n'est citée que pour mémoire. Le recours à cette méthode revêt donc un caractère exceptionnel.
- *L'essorage par dépôts provisoires* : dans le cas d'une extraction sous l'eau ou en lit de Oued.
- *La réduction de la teneur en eau par aération* dans le cas où les conditions météorologiques sont favorables.

En ce qui concerne les traitements des sols, ils ont deux raisons d'être :

- soit améliorer des sols trop humides, qu'il s'agisse du sol en place pour permettre la progression du chantier ou qu'il s'agisse de sols à réutiliser en remblai, les sols concernés sont définis au chapitre II.2.
- soit réaliser des plates-formes rigides et stables aux intempéries pour la circulation des engins de chantier et pour assurer une bonne portance à long terme pendant la durée de vie de la chaussée.

On distingue trois types de traitement :

- Le traitement à la chaux dans le cas de sols argileux, destinés à une utilisation en remblai.
- Le traitement au ciment dans le cas de sols peu plastiques destinés à être utilisés en remblai .
- Le traitement mixte à la chaux puis au ciment, rarement utilisé en remblai, car il est coûteux.

Dans tous les cas, le traitement d'un sol doit toujours être précédé d'une étude complète au laboratoire pour fixer les modalités de traitement et vérifier l'absence de risque de gonflement qui survient avec certains sols argileux. Cette étude doit se conformer aux objectifs visés dans le chapitre II.2 .

Le mode de mise en oeuvre :

Les actions à mener concernent les aspects suivants :

- le réglage
- le compactage
- la limitation de la hauteur des remblais

Le réglage des couches élémentaires de remblai peut se réaliser :

- soit sans conditions particulières
- soit en couches minces de 20 à 30 cm
- soit en couches moyennes de 30 à 50 cm

Le réglage en couches minces est recommandé pour :

- garantir un maximum de fragmentation pour les matériaux évolutifs dégradables,
- profiter des situations météorologiques favorables (évaporation ou humidification par exemple) pour agir sur la teneur en eau.
- Garantir un compactage intense.

Les conditions fixées pour le réglage peuvent l'être indépendamment de celles liées au compactage.

Dans le cas d'absence de conditions particulières sur le réglage, l'épaisseur de la couche doit être compatible avec les performances du matériel utilisé pour le compactage.

En ce qui concerne le compactage, il présente trois niveaux à savoir :

- compactage intense
- compactage moyen
- compactage faible

Le compactage faible est retenu pour les sols humides pour lesquels le risque de saturation peut engendrer une chute de la portance. Il est à noter qu'un compactage faible ne signifie absolument pas l'absence de compactage ou un compactage insuffisant.

Le compactage intense est retenu pour les matériaux à faible teneur en eau.

La spécificité du climat de certaines régions du MAROC a amené à envisager le compactage à sec qui est par nature un compactage intense. Ce type de compactage est prévu dans le cas de certains sols en zone désertique. Les conditions de réalisation de ce type de compactage, figurent au chapitre 7.

En ce qui concerne la hauteur des remblais, l'élément pris en compte est la stabilité et le tassement propre du corps de remblai. Les aspects liés à la stabilité générale compte tenu du sol de fondation du remblai sont à étudier à part. On distingue :

- les remblais de faible hauteur, limitée à 8 m
- les remblais de hauteur moyenne ,comprise entre 8 et 12 m .
- les remblais de grande hauteur qui dépasse 15 m .

Les dispositions constructives à respecter pour la réalisation de ce dernier type de remblai figurent au niveau de l'annexe réservée aux dispositions constructives pour les travaux particuliers.

Il est à noter que l'absence de recommandation particulière concernant la hauteur à adopter suppose que la hauteur ne dépasse pas 15 m.

Le tableau récapitulatif des conditions pouvant être imposées pour utiliser les différents matériaux en remblai est le suivant :

RUBRIQUE	CODE	CONDITIONS D'UTILISATIONS
E Extraction	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Extraction en couches (0,1 à 0,3 m)
	2	Extraction frontale .
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Elimination des éléments > 800 mm
	2	Elimination des éléments > 250 mm (ou 200 mm) pour traitement (ou utilisation en arase).
W Action sur la teneur en eau	3	Fragmentation complémentaire après extraction
	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Réduction de la teneur en eau par aération (par brassage)
	2	Essorage par mise en dépôt provisoire
T Traitement	3	Arrosage pour maintien de l'état
	4	Humidification pour changer d'état
	0	Pas de condition particulière à recommander
R Régalage	1	Traitement avec un ciment ou un traitement mixte.
	2	Traitement à la chaux seule
	0	Pas de condition particulière à recommander
C Compactage	1	Couches minces (20 à 30 cm)
	2	Couches moyennes (30 à 50 cm)
	3	Compactage intense
H Hauteur des remblais	2	Compactage moyen
	3	Compactage faible
	0	Pas de condition particulière à recommander(mais la hauteur ne dépasse pas 15 m).
	1	Remblai de hauteur faible (≤ 8 m)
	2	Remblai de hauteur moyenne (≤ 12 m)

Les conditions d'utilisation figurent dans des tableaux qui comportent cinq colonnes :

- Dans la première colonne figure la classe du sol et son état hydrique.
- Dans la seconde colonne figure des observations générales sur le comportement du sol et éventuellement les dispositions constructives à respecter en sus des conditions d'utilisation qui figurent dans la quatrième colonne.
- La troisième colonne présente la situation météorologique qui règne pendant les travaux de mise en remblai.
- La quatrième colonne présente les conditions d'utilisation du matériau en remblai.
- La cinquième colonne présente une codification des conditions d'utilisation citées ci-dessus.

En ce qui concerne les situations météorologiques prises en compte, elles sont les suivantes :

- pluie forte avec accroissement non gérable des teneurs en eau
- pluie faible avec accroissement lent des teneurs en eau
- ni pluie, ni évaporation importante donc pas de variation des teneurs en eau
- évaporation importante entraînant une diminution des teneurs en eau.

Les conditions d'utilisation en remblai retenues pour chaque matériau, figurent dans le fascicule II.

Un exemple de tableau de conditions d'utilisation d'un sol A 3m est présenté ci-après :

SOL	OBSERVATIONS GENERALES	SITUATION METEOROLOGIQUE		CONDITIONS D'UTILISATION EN REMBLAI	CODE
					EGWTRCH
A 3m	La plasticité de ces sols entraîne pour les remblais des risques de glissement d'autant plus grands que les remblais sont élevés, même dans les meilleures conditions (w. météo) de mise en œuvre.	++	Pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON
		+	Pluie faible	C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 12 m)	0 0 0 0 2 2
		=	Ni pluie, ni évaporation importante	C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 12 m)	0 0 0 0 2 2
		-	évaporation importante	W : arrosage superficiel pour maintien de l'état R : couches minces C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 12 m)	0 0 3 0 1 2 2

CHAPITRE III

LES CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN COUCHE DE FORME

III.1 – CONCEPTION DE LA COUCHE DE FORME

1. Définition, nature et fonction de la couche de forme :

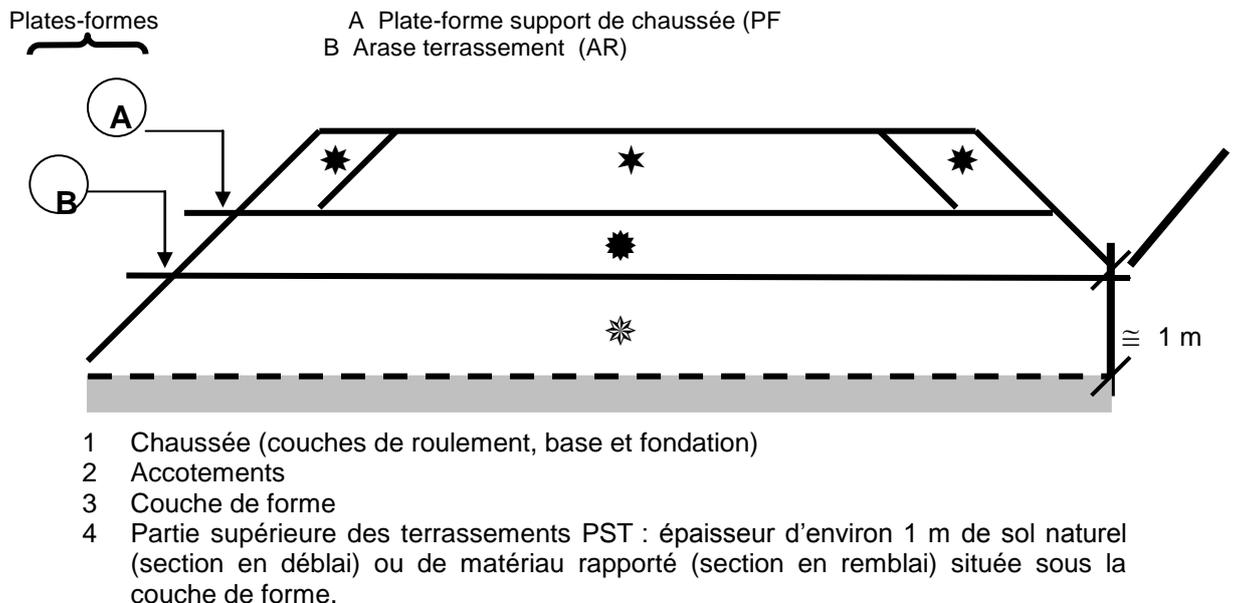
La couche de forme est définie comme la structure d'adaptation réalisant l'interface entre la partie supérieure des terrassements PST (zone correspondant environ au mètre supérieur) et le corps de la chaussée. Sa conception résulte d'une réflexion renouvelée à chaque chantier pour prendre en compte ses spécificités. Les fonctions qu'elle doit remplir sont des fonctions à court terme et des fonctions à long terme.

Les fonctions à court terme ont pour objectif d'assurer la mise en oeuvre des couches de chaussée, selon les exigences de qualité requises, ces exigences sont :

- Le nivellement et la traficabilité quasi tout temps de la plate-forme
- La qualité de compactage de la couche de fondation
- La protection hydrique de la P.S.T

Les fonctions à long terme se rapportent au comportement de la chaussée en service, à savoir :

- L'homogénéisation de la portance
- Le maintien dans le temps d'une portance minimale de la plate-forme.
- Eventuellement le drainage de la chaussée.



Définition des différents termes

2. Critères à satisfaire pour les matériaux en couche de forme :

Les sols pouvant être utilisés en couche de forme doivent satisfaire aux critères suivants :

- Etre insensibles à l'eau ou peu sensibles à l'eau, c'est à dire qu'une fois mis en oeuvre leur portance ne doit plus être influencée ou sera peu influencée par les variations des conditions hydriques.
- Etre résistants à l'attrition et aux efforts tangentiels engendrés par le trafic de chantier, ceci pour éviter la production de fines qui sont des matériaux sensibles à l'eau.
- Avoir une granularité compatible avec les exigences de nivellement imposées au niveau de la plate-forme support de chaussée.
- Jouer éventuellement un rôle de drainage.

Des critères relatifs à la construction de la chaussée sont également à satisfaire. Ils se présentent comme suit :

a – Pour la construction de la couche de forme :

L'orniérage de l'arase des terrassements doit être limité. Les niveaux de portances minimales admissibles sur l'arase à la mise en œuvre de la couche de forme sont au moins:

- 15 MPa de module EV2 à la plaque dans le cas d'une couche de forme non traitée.
- 35 MPa de module EV2 dans le cas d'une couche de forme traitée.

b – Pour la réalisation des couches de chaussée :

- La plate-forme support de chaussée doit être nivelée avec une tolérance de ± 3 cm.
- La déformabilité de la plate-forme, au moment de la mise en oeuvre des couches de chaussées doit être telle que :

* le module EV2 à la plaque ou le module équivalent à la dynaplaque > 50 MPa

* ou la déflexion au Défectographe LACROIX à 13 T à l'essieu arrière ou à la poutre BENKELMAN inférieure à 2 mm (ou $200 \frac{1}{100}^{\text{ème}}$ mm).

3. Techniques d'amélioration des matériaux :

Peu de matériaux respectent les critères cités ci-dessus à l'état naturel. Cependant, beaucoup peuvent le devenir après amélioration. Les différentes actions d'amélioration se rangent en quatre rubriques :

- Actions sur la granularité
- Actions sur l'état hydrique
- Le traitement
- Protection superficielle

a – Actions sur la granularité :

Ces actions peuvent consister en :

- L'élimination de la fraction 0/d (0/10 ou 0/20 selon le cas) afin de rendre le matériau insensible ou peu sensible à l'eau. La fraction à éliminer ne doit pas mettre en péril la stabilité interne du matériau. Cette action est plus aisée pour un matériau frottant que pour un matériau roulé.
- L'élimination de la fraction grossière empêchant un réglage correcte de la plate-forme. Les exigences en matière de nivellement amènent en général à éliminer les éléments supérieurs à 100 mm.

C'est le seuil qui a été retenu par le CPC des travaux routiers. Cependant, dans le cas d'un traitement, le seuil à retenir est 50 mm. En effet les performances des engins usuels de malaxage ne permettent pas de travailler avec des éléments > à 50 mm, tout en assurant l'homogénéité nécessaire pour une couche de forme.

- L'élimination de fraction sensible à l'eau 0/10 ou 0/20 (généralement par criblage) et l'élimination des gros éléments qui empêchent un bon nivellement de la plate-forme.
- La fragmentation de la fraction grossière pour l'obtention des éléments fins. Ce procédé est recommandé pour les matériaux évolutifs.
- L'amendement avec un correcteur granulométrique.

b – actions sur l'état hydrique :

Les matériaux de couche de forme doivent être compactés à une teneur en eau proche de l'optimum Proctor Modifié. Les actions de teneur en eau à mener auront donc pour objectif de s'approcher de cette teneur en eau . ces actions peuvent consister en :

- l'arrosage pour le maintien de l'état hydrique pour les matériaux moyennement humides et dans des conditions climatiques évaporantes.
- Ou l'humidification pour changer carrément l'état hydrique. Cette action nécessite des quantités importantes d'eau. Cette action est quasiment impossible à réaliser sur chantier.

c – Le traitement :

Les améliorations possibles sont :

- le traitement avec un liant hydraulique, en général un ciment CPJ ou un liant spécial routier LSR.
- Le traitement mixte chaux + ciment, généralement préconisé pour les sols qui présentent une sensibilité à l'eau ($VBS > 0,5$).
- Le traitement à la chaux seule, préconisé pour les sols argileux fins ou graveleux. Les performances mécaniques sont jugées sur le court et le long terme.

Les actions de traitement peuvent être associées à une correction de granulométrie.

d – Protection superficielle :

Elle peut consister en :

- *Une protection par un enduit de cure dans le cas d'un traitement avec un liant.* Cette protection est nécessaire pour empêcher les variations trop rapides de la teneur en eau.
- *Une protection par un enduit de cure et gravillonnage.* L'objectif recherché est la protection de la couche de forme traitée pendant les travaux et l'amélioration du collage au niveau de l'interface couche de forme / couche de fondation dans le cas où cette dernière, est de type traitée aux liants hydrauliques ou aux liants hydrocarbonés.
- *La mise en place d'une couche de fin réglage.* Elle a pour objectif de rattraper les aspérités d'une arase rocheuse ou la fermeture de la surface d'une couche de forme réalisée avec un matériau d/D.

Les techniques d'amélioration présentées ci-dessus, sont résumées dans le tableau suivant :

RUBRIQUE	CODE	TECHNIQUE DE PREPARATION DES MATERIAUX
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Elimination de la fraction 0/d sensible à l'eau
	2	Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol
	3	Elimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme
	4	Elimination de la fraction 0/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme
	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 pour maintien de l'état hydrique
	2	Humidification pour changer d'état hydrique (très rare)
T Traitement	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Traitement avec un liant hydraulique
	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

Les conditions d'utilisation des matériaux pour couche de forme sont données dans les tableaux qui figurent en annexe.

III.2 – MATERIAUX UTILISABLES EN COUCHE DE FORME

*L*es sols pour couche de forme ne devront pas avoir d'éléments dont la plus grande dimension excède 100 mm. Sous ces conditions sont utilisables ou réutilisables en couche de forme, les sols suivants :

a – Sans traitement :

- **Pour les autoroutes et les routes nationales à trafics très élevés (TMJA \geq 4500 ou agressivité de classe T0) :**
 - * les sols de type graveleux des catégories suivantes sont utilisables : B31, D21, D31, CB31.
 - * les sols B41 , CB41 et CB51 dont la VBS est inférieure ou égale à 0,25.

- **Pour les routes dont l'agressivité du trafic est de type T2 ou T1 (2000 \leq TMJA < 4500) :**
 - * les sols de type graveleux suivants sont utilisables :
 - . B31, D21, D31, CB11 ,CB31 et les sols rocheux sains bien gradués.
 - * les sols B41, CB41, CB21, CB51, et TCB, ayant un indice de plasticité inférieur ou égale à 10 ou une VBS inférieure ou égale à 0,5.

- **Pour les autres trafics inférieurs ou égaux à T3, sont utilisables en couche de forme :**
 - tous les sols précédemment décrits
 - les sols : B32 ,D22 ,D32 , B11, B12, TCB1 ,CB12 ,CB32 .
 - les sols : TCA, Tf B2 , TfB4, B21, B22 , B42 , CB22 ,CB42 ,CB52 et qui présentent un indice de plasticité inférieur ou égale à 10 ou une VBS inférieure ou égale à 0,5.
 - les sols dont la valeur CBR évaluée à 95 % de l'OPM après 4 jours d'imbibition est supérieur à 20.

b – Avec traitement à la chaux : (pour trafic d'agressivité inférieure ou égale à T1 uniquement)

Les sols fins A2, A3 ou les CA correspondants.

c – Avec traitement aux liants hydrauliques :(pour toutes les classes de trafic)

Les sols des catégories suivantes : A1, B1, B3 ,B5, D2, D3, TCB, TCA et les matériaux graveleux tendres non gypseux qui présentent une $VBS \leq 0,5$.

d – Avec traitement mixte chaux + ciment :(pour toutes les classes de trafic)

Les sols de catégories suivantes : A1, A2, A3 ,B2 ,B4 , B5 , B6 et les TCA et TCB correspondants.

III.3- DIMENSIONNEMENT DE LA COUCHE DE FORME

1. Démarche retenue pour le dimensionnement :

L'épaisseur préconisée pour la couche de forme est déterminée au terme de la démarche suivante : la classification géotechnique des sols et les conditions hydriques qui règnent au niveau de la PST (le mètre supérieur des terrassements), permettent de distinguer sept cas de PST, à chaque PST est associé une, deux, ou trois classes de portance de l'arase de terrassements notées AR_i. Pour chacune de ces situations et pour les différents matériaux de couche de forme, il est préconisé une épaisseur de couche de forme. Cette épaisseur est fixée de sorte qu'elle :

- satisfasse aux divers critères de résistance permettant une mise en oeuvre correcte des couches de chaussées ;
- assure la pérennité d'une valeur minimale de portance à long terme de la plate-forme.

Au total, il existe cinq niveaux AR_i (AR0 à AR4) qui se caractérisent par 5 niveaux de portance (S0 à S4) et qui correspondent au niveau de portance St_i, définis par le catalogue de structures de chaussée de 1996, le niveau de portance Si et l'épaisseur de la couche de forme ainsi que sa nature définissent le niveau de portance de la plate-forme PF_i. Au total il existe quatre niveaux de portance PF1 à PF4. Les PF_i ont la même signification que les Pi définies dans le catalogue de structures de chaussées cité ci-dessus.

2. Définition des classes de PST et des arases AR :

Le type de matériau de la P.S.T et l'environnement hydrique permettent de distinguer les 7 niveaux de PST. Les classes de portance de l'arase introduites pour chaque cas de P.S.T sont associées aux caractéristiques des sols de P.S.T à long terme. La définition des classes de PST et des niveaux d'arase figurent sur le tableau ci-après :

PARTIE SUPERIEURE DES TERRASSEMENTS	DESCRIPTION DES MATERIAUX	CLASSE DE PORTANCE A LONG TERME	
		<i>Classe ARi</i>	<i>Classe Sk</i>
PST0 (passages au niveau du terrain naturel)	Matériaux sensible à l'eau dont la portance risque d'être quasi nulle au moment de la mise en oeuvre et au cours de la vie de l'ouvrage. (zone inondable ou marécageuse) Sols :A dans état hydrique h , Tirs.	AR0	S0
PST1 (passages ou niveau du terrain naturel ou en deblais)	Matériaux sensibles à l'eau de mauvaise portance pendant la mise en oeuvre et aussi au cours de la vie de l'ouvrage Sols :A, B2 ,B4 ,B5 ,B6 ,R12 ,R13 ,R34 dans un état hydrique h	AR1	S1
PST2 (passages au niveau du terrain ou en deblais)	PST en matériaux sensibles à l'eau de bonne portance au moment de la mise en oeuvre de couche de forme. Cette portance peut chuter à long terme au cours de la vie de l'ouvrage. Sols :A ,B2 ,B4 ,B5 ,B6 ,R12, R13, R34 dans un état hydrique m sols C1 et C2 correspondants	AR1	S1
PST3 (passages au niveau du terrain naturel ou en remblais)	Matériaux sensibles à l'eau de bonne portance au moment de la mise en oeuvre de la couche de forme Sols :mêmes sols que pour PST2	AR1	S1
		AR2 si drainage efficace	S2
PST4 (deblais ,terrain naturel ou remblais)	Matériaux sensibles à l'eau traités à la chaux ou aux liants hydrauliques	AR2 si traitement à la chaux EV2 ≥ 50 MPa	S2
		AR3 si traitement aux liants hydrauliques	S3
PST5 (remblais)	Matériaux sableux fins insensibles à l'eau ou peu sensibles à l'eau, hors nappe posant des problèmes de traficabilité Sols :B1 ,D1 ,CB,B2,B4,B5,B6 et C correspondants.	AR2 si Ev2 ≥ 50 MPa	S2
		AR3 si Ev2 ≥ 120 MPa	S3
PST6 (deblais, terrain naturel ou remblais)	Matériaux graveleux ou rocheux insensibles à l'eau mais posant des problèmes de réglage et/ou de traficabilité Sols :B3,D2,D3,CB3	AR2 si Ev2 ≥ 50 Mpa	S2
		AR3 si Ev2 ≥ 120 Mpa	S3
		AR4 si Ev2 ≥ 200 MPa	S4

Une arase de classe AR0 (ou S0), ne peut recevoir un corps de chaussée. Une couche de forme ou un matériau de substitution sont nécessaires.

3. Classification des arases en fonction du CBR :

La classification donnée au paragraphe 2 concerne le cas général des sols rencontrés. Dans le cas où le géotechnicien estime que la classe de sol Si proposée ne reflète pas le comportement réel à long terme de l'arase, le classement de la portance de cette dernière se fera par le moyen de l'essai CBR réalisé après immersion.

Ce procédé sera systématiquement retenu pour les différents matériaux tuffacés et carbonatés (calcarénite, calcaire marneux, marno-calcaires et travertins). Le classement suivant le CBR se fera comme suit :

ARi	Sk	COURT TERME CBR %	LONG TERME CBR %
AR0	S0	---	≤ 4
AR1	S1	≥ 8	≥ 6
AR2	S2	≥ 15	≥ 10
AR3	S3	≥ 25	≥ 20
AR4	S4	≥ 40	≥ 40

La valeur d'indice CBR à prendre en compte pour le long terme correspond à :

- une compacité de 95 % de l'OPM sur un moulage réalisé à la teneur en eau optimale Proctor et ayant subi une imbibition de 4 jours ;
- une compacité de 95 % de l'OPM avec poinçonnement à la teneur en eau de moulage optimale Proctor dans les zones désertiques en dehors des zones inondables.
- Pour les arases qui présentent des CBR compris entre 4 et 6 , le géotechnicien jugera le maintien ou non de cette arase dans la catégorie AR0. Ce jugement devra tenir compte des conditions réelles d'imbibition et de drainage de la plate-forme à long terme.

COMMENTAIRES :

- ◇ L'essai CBR ne peut être effectué, ou est peu représentatif sur les sols qui présentent plus de 30 % d'éléments supérieurs à 20 mm et les sols classés en C et D et les sables. La portance à long terme est par conséquent estimée à partir des essais de déformabilité. Ces essais sont effectués sur des matériaux mis en place et compactés. Leur représentativité du comportement à long terme dépend selon la nature du sol de la connaissance des variations des conditions d'humidité dans cette couche lors de la durée de vie de l'ouvrage.
- ◇ Pour les matériaux autres que tuffacés les règles de classement des sols qui figurent ci-après, peuvent être utilisés à titre indicatif.

- ◇ Dans le cas de déblais dans le rocher non évolutif, il est nécessaire d'adopter une couche de réglage visant à respecter les tolérances de nivellement et à homogénéiser la portance. On adoptera la classe S3 du matériau de réglage.
- ◇ Pour les matériaux rocheux tendres, la classe du sol à adopter dépend du pourcentage de fines et de leur possibilité d'évolution sous trafic de chantier. Ces matériaux seront donc classés en S1, S2 ou S3. Dans le cas d'une couche de réglage la classe Si à adopter, est celle de la couche de réglage.

Règles de classement des sols (cas général)

CLASSIFICATION GEOTECHNIQUE	CLASSEMENT PROBABLE DU SOL SK
A1 – A2 – A3 – A4	Sols très sensibles à moyennement sensibles à l'eau. Les classes probables sont S0 , S1 et S2 suivant la teneur en eau caractéristique en place
B2 – B4 – B5 – B6 – C1Ai – C1B2 – C1B4 – C1B5 – C1B6	Sols moyennement sensibles à l'eau. Classes probables S1,S2 ou S3 suivant la teneur en eau caractéristique en place.
Sols fins traités à la chaux et sols tirseux traités à la chaux	Classe S2 si $EV2 \geq 50$ MPa sinon S1
B1 – D1 – C1B1	Classes probables S2 ou S3
B3 – D2 – D3 – C1B3	<p>S4 si le module $EV2$ caractéristique est supérieur à 200 MPa.</p> <p>S3 si le module $EV2$ caractéristique est supérieur à 120 MPa.</p> <p>S2 dans les autres cas.</p> <p>Pour D3 on n'adoptera S3 ou S4 que si la couche de réglage n'est pas susceptible de faire chuter la portance du sol.</p> <p>Les sols D2 et D3 sont en principe insensibles à l'eau : leur portance dépend de leur courbe granulométrique, de l'angularité, etc...</p> <p>On pourra prévoir le comportement de ces sols soit à l'aide de mesures effectuées sur le sol en place ou sur une planche d'essai suffisamment épaisse.</p>
Sols C2 et matériaux rocheux	Suivant leurs pourcentages de fines et leur possibilité d'évolution sous trafic de chantier, ces matériaux seront classés S1, S2 ou S3. Dans le cas d'une couche de réglage visant à respecter les tolérances de nivellement notamment, on adoptera la classe Sk du matériau de réglage.

4. Critères de réception des classes d'arases :

Les arases font l'objet de critères de réception en chantier et de caractérisation de portance pour le long terme pour dimensionner les chaussées, ces critères se présentent comme suit :

CLASSES D'ARASE		CHANTIER (CRITERES DE RECEPTION VERIFIES POUR 95 % DES POINTS)		LONG TERME MODULE ÉQUIVALENT
<i>AR_i</i>	<i>Sk</i>	<i>Ev2 (MPa)</i>	<i>d (1/100 mm)</i>	<i>E (MPa)</i>
AR1	S1	≥ 30	≤ 300	≥ 20
AR2	S2	≥ 80	≤ 150	≥ 50
AR3	S3	≥ 120	≤ 100	≥ 120
AR4	S4	≥ 200	≤ 60	≥ 200

COMMENTAIRE :

Pour que la couche de forme puisse être exécutée de manière satisfaisante, il est nécessaire de limiter l'orniérage et la déformabilité de l'arase. La valeur du module EV2 nécessaire est :

- 30 MPa pour une couche de forme traitée
- 20 MPa pour une couche de forme granulaire

Ces seuils peuvent donc être adoptés pour une arase AR1.

5. Classes de plate-forme :

Quatre classes de plates-formes sont définies PF1, PF2, PF3 et PF4 caractérisées par les valeurs des tableaux suivants (considérations à court terme et long terme).

Deux cas doivent être distingués suivant que la couche de forme est traitée ou non.

Couches de forme non traitées :

CLASSES	CHANTIER (CRITERES DE RECEPTION VERIFIES POUR 95 % DES POINTS)		LONG TERME MODULE EQUIVALENT
	Ev2 (MPa)	d (1/100 mm)	E (MPa)
PF1	≥ 30	≤ 300	≥ 20
PF2	≥ 80	≤ 150	≥ 50
PF3	≥ 120	≤ 100	≥ 120
PF4	≥ 200	≤ 60	≥ 200

Couches de forme traitées :

CLASSES	CHANTIER (CRITERES DE RECEPTION VERIFIES POUR 95 % DES POINTS)		LONG TERME MODULE EQUIVALENT
	d (1/100 mm)		E (MPa)
PF2	≤ 80		≥ 50
PF3	≤ 50		≥ 120
PF4	≤ 20		≥ 200

Pour les couches de forme traitées, on entend par critères de réception les seuils impératifs pour lesquels la circulation et la mise en oeuvre de la couche supérieure peuvent être autorisées.

6. Epaisseur de couche de forme :

En l'absence de couche de forme, la classe de la plate-forme est la classe de l'arase correspondante. L'adoption d'une couche de forme permet d'escompter une plate-forme de type PF2 au minimum.

Dans le cas où une couche de forme est adoptée, des règles de passage des classes d'arases ARi aux classes de plate-forme PFj ont été établies en tenant compte du type de matériau de couche de forme et de l'épaisseur de cette couche de forme.

Cas de couches de forme non traitées :

CLASSE D'ARASE	NATURE DE LA COUCHE DE FORME	CLASSE DE PLATE-FORME
AR1 (C.B.R \geq 4) (S1)	Matériaux S2 non traités	PF2 à partir de 50 cm
	Matériaux S3 ou S4 non traités	PF2 à partir de 40 cm PF3 à partir de 70 cm
AR1 (C.B.R \geq 6) (S1)	Matériaux S2 non traités	PF2 à partir de 40 cm
	Matériaux S3 ou S4 non traités	PF3 à partir de 60 cm
AR2 (S2)	Absence de couche de forme ou couche de forme en matériaux S2	PF2
	Matériaux S3 ou S4 non traités	PF3 à partir de 35 cm
AR3 (S3)	Absence de couche de forme ou couche de réglage en matériaux S3	PF3
AR4 (S4)	Absence de couche de forme ou couche de réglage en matériaux S4	PF4

L'utilisation d'un géotextile adapté entre l'arase AR1 et la couche de forme est admise. Elle permet de réduire de 10 à 15 cm l'épaisseur de la couche de forme.

Cas de couches de forme traitées :

Quel que soit le niveau de plate-forme envisagé, il est nécessaire de caractériser une couche de forme traitée par son classement mécanique.

Celui-ci est fondé sur le module élastique E (module mesuré au 1/3 de la charge de rupture lors de l'essai de traction simple sur éprouvettes) et la résistance en traction directe R_t à 90 jours (les caractéristiques à prendre en compte sont celles correspondantes à la compacité du fond de couche sur chantier).

Dans le cas où l'on réalise un essai de traction par fendage (Brésilien) sur des carottes prélevées sur planche expérimentale, on prend $R_t = 0,9 R_{tb}$ (Brésilien).

D'autre part, la caractérisation en zone (1, 2, 3, 4 ou 5) donnée dans le graphique ci-contre, est à pondérer suivant le type de traitement (en centrale ou en place). Ceci a pour but de tenir compte de l'homogénéité des épaisseurs et du traitement selon la technique employée. En fonction des performances généralement constatées, on aboutit en final au classement suivant :

Types de classes de matériaux traités

CLASSE	TRAITEMENT EN CENTRALE	TRAITEMENT EN PLACE
1	Zone 1	
2	Zone 2	Zone 1
3	Zone 3	Zone 2
4	Zone 4	Zone 3
5	Zone 5	Zone 4

Épaisseurs de couche de forme traitée

ARASE	COUCHE DE FORME CLASSE DU MATERIAU TRAITE	ÉPAISSEUR POUR CLASSEMENT DES PLATES-FORMES (cm)		
		<i>PF2</i>	<i>PF3</i>	<i>PF4</i>
AR1 (EV2 ≥ 30 Module chantier)	3		35	40
	4	35	40	50*
	5	40	50*	
	Traitée à la chaux	50*		
AR1 (EV2 ≥ 50 module chantier)	3		30	35
	4	30	35	40
	5	35	40*	
	Traitée à la chaux	40		
AR2 (S2)	3	Couche de réglage		30
	4	Couche de réglage	30	35
	5	Couche de réglage	35	

(*) : en 2 couches

CHAPITRE IV

COMPACTAGE DES REMBLAIS ET DES COUCHES DE FORME

IV.1 – OBJECTIF DU COMPACTAGE

Compacter un matériau en remblai ou en couche de forme c'est réduire le volume des interstices (ou des vides entre grains) de matériaux. Il a donc comme objectifs :

- La minimisation ou la suppression des tassements
- La suppression des tassements différentiels
- L'amélioration des caractéristiques mécaniques

Ces objectifs sont en général atteints lorsque la densité sèche moyenne de la couche est supérieure ou égale à :

- 95 % OPN pour un remblai
- 95 % OPM (ou 98,5 % OPN) pour une couche de forme

Sur chantier, l'expérience montre que :

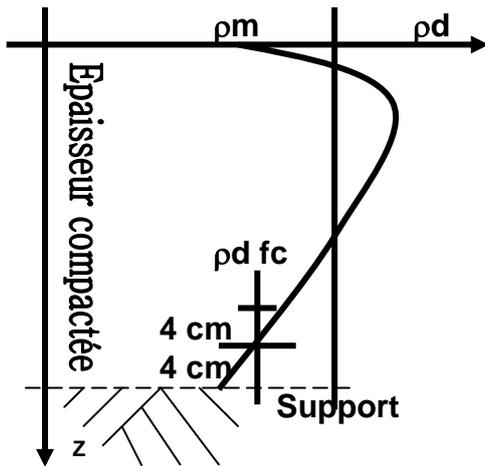
- Le profil de la masse volumique ρ_d varie au sein de la couche compactée suivant la loi du gradient décrit par la figure ci-après :

$$\rho_d = f(Z)$$

- La masse volumique varie aussi en fonction du nombre de passes d'un compacteur suivant la loi du Logarithme :

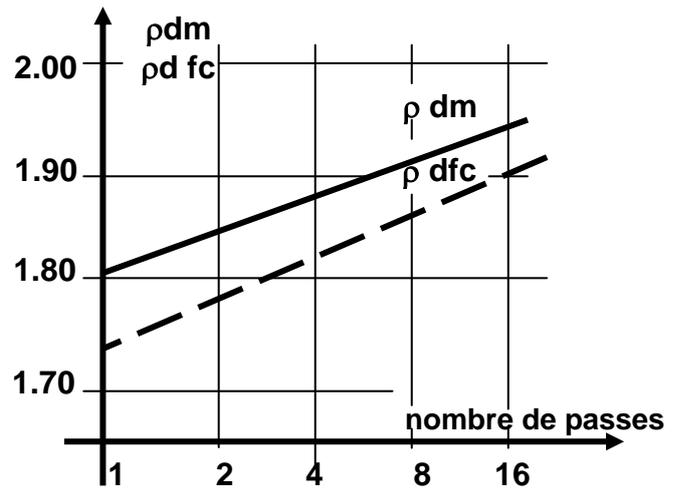
$$\rho_d = A \log n + B$$

décrit par la figure ci-après :



Evolution de la masse volumique en fonction du nombre de passes de compacteur

Variation de la masse volumique avec la profondeur



Ces constatations permettent de qualifier la qualité de compactage des remblais et des couches de forme à partir des deux critères suivants :

- La masse volumique moyenne ρ_{dm} sur l'épaisseur compactée
- La masse volumique en fond de couche $\rho_{d fc}$, c'est à dire sur les 8 cm inférieurs de la couche.

Deux objectifs de compactage ont été déduits de l'expérience, qui sont :

- Pour les remblais :

$$\rho_{dm} \geq 95 \% \text{ OPN}$$

$$\rho_{d fc} \geq 92 \% \text{ OPN}$$

- Pour les couches de forme :

$$\rho_{dm} \geq 98,5 \% \text{ OPN}$$

$$\rho_{d fc} \geq 96 \% \text{ OPN}$$

IV.2 - ENGINES DE COMPACTAGE

*L*a classification retenue pour les engins de compactage est conforme à la norme française NF 98.736. Elle couvre l'ensemble des compacteurs dont la largeur de compactage est supérieure ou égale à 1,30 m.

Les différentes classes d'engins de compactage sont :

- Les rouleaux à pneus : Pi
- Les rouleaux vibrants à cylindres lisses : Vi
- Les rouleaux vibrants à pieds dameurs : VPi
- Les rouleaux statiques à pieds dameurs : SPi
- Les plaques vibrantes : PQi

L'indice *i* désigne la classe du compacteur.

1. Les rouleaux à pneus :

Leur classement est fait en fonction de la charge par roue *C* en tonnes (T) :

- P1 : $2,5 \leq C < 4$ T
- P2 : $4 \leq C < 6$ T
- P3 : $6 \leq C$

2. Rouleaux vibrants à cylindres lisses :

La masse volumique ρ_d obtenue à une cote *Z* après un nombre d'applications de charge donné, est bien corrélée avec la force totale appliquée par unité de largeur. Cette dernière est liée à $(M_1/L) \sqrt{AO}$, où M_1/L désigne la charge statique totale par centimètre de génératrice et *AO* est l'amplitude théorique à vide, en mm.

Le classement est donc effectué à partir du paramètre $(M_1/L) \sqrt{AO}$ et d'une valeur minimale pour *AO*.

M_1/L exprimé en Kg/cm et *AO* en mm conduisent aux cinq classes suivantes :

$$V1 : (M1/L) \times \sqrt{AO} \begin{cases} \text{entre 15 et 25} & \text{et } AO \geq 0,6 \\ \text{supérieur à 25} & \text{et } AO \text{ entre } 0,6 \text{ et } 0,8 \end{cases}$$

$$V2 : (M1/L) \times \sqrt{AO} \begin{cases} \text{entre 25 et 40} & \text{et } AO \geq 0,8 \\ \text{supérieur à 40} & \text{et } AO \text{ entre } 0,8 \text{ et } 1,0 \end{cases}$$

$$V3 : (M1/L) \times \sqrt{AO} \begin{cases} \text{entre 40 et 55} & \text{et } AO \geq 1,0 \\ \text{supérieur à 55} & \text{et } AO \text{ entre } 1,0 \text{ et } 1,3 \end{cases}$$

$$V4 : (M1/L) \times \sqrt{AO} \begin{cases} \text{entre 55 et 70} & \text{et } AO \geq 1,3 \\ \text{supérieur à 70} & \text{et } AO \text{ entre } 1,3 \text{ et } 1,6 \end{cases}$$

$$V5 : (M1/L) \times \sqrt{AO} \rightarrow \text{supérieur à 70 et } AO \geq 1,6$$

1. 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

2. AO : est l'amplitude théorique à vide calculable par :

$AO = 1000 \times (me/MO)$, avec me: moment des excentriques de l'arbre à balourd (mkg) et MO : masse de la partie vibrante sollicitée par l'arbre à balourd (kg).

Les rouleaux vibrants lisses peuvent être des monocylindres (VMi) ou des rouleaux tandems longitudinaux (VTi). Dans ce dernier cas les deux cylindres travaillent en vibration.

Les rouleaux tandems transversaux ainsi que les tandems longitudinaux à un seul cylindre vibrant sont classés comme étant des vibrants monocylindres.

3. Les rouleaux vibrants à pieds Dameurs :

Le classement des rouleaux vibrants à pieds Dameurs (VPi) se fera de la même manière que pour les rouleaux vibrants à cylindres lisses (Vi).

4. Les rouleaux statiques à pieds Dameurs :

Les critères à prendre en compte pour le classement des rouleaux statiques à pieds Dameurs (SPi) est la charge statique moyenne par unité de largeur de tambours à pieds Dameurs (M1/L), deux classes sont considérées :

- SP1 : $30 \leq M1/L \leq 60$ kg/cm
- SP2 : $60 < M1/L < 90$ kg/cm

5. Les plaques vibrantes :

Elles sont classées à partir de la pression statique sur la semelle Mg/S exprimée en Kilopascal (KPa). Deux classes sont prises en compte :

$$PQ3 : 10 \leq \frac{Mg}{S} < 15 \text{ KPa}$$

$$PQ4 : 15 \leq \frac{Mg}{S} \text{ (en KPa)}$$

S est la surface de contact entre la plaque et le sol
et Mg est le poids de la plaque

6. Rouleaux mixtes :

Ils sont considérés comme la combinaison de deux rouleaux : un cylindre vibrant (VMi) et un rouleau à pneus (Pi). Ils sont désignés par le symboles (Vmi – Pj).

IV.3 - MODALITES PRATIQUES DE COMPACTAGE

1. Paramètres retenus :

*L*es modalités pratiques de compactage ont été déterminées en tenant compte de l'expérience cumulée au niveau des chantiers nationaux et de l'expérience internationale, notamment française, en matière de compactage et ce moyennant les adaptations nécessaires au contexte marocain.

Ces modalités pratiques sont traduites dans des tableaux de compactage pour les différents couples matériau/matériel, par les paramètres **Q/S** et **e** où :

Q/S : est le rapport entre le volume **Q** du sol compacté pendant un temps donné et la surface **S** balayée par le compacteur pendant le même temps.

e : est l'épaisseur maximale de la couche pouvant être tolérée avec le compacteur envisagé.

Pour un matériau donné, le choix de l'engin de compactage permet de déterminer les paramètres **e** et **Q/S** qui devront être respectés sur chantier.

L'application stricte des modalités pratiques qui figurent dans les tableaux de compactage correspondant à chacun des cas donnés, conduit implicitement à un objectif de compactage définis dans le paragraphe IV.1.

2. Evaluation des paramètres retenus :

L'évaluation des paramètres retenus qui sont **e** et **Q/S** se fera de la manière suivante :

L'épaisseur e :

Les valeurs qui figurent dans les tableaux correspondent à une épaisseur maximale des couches à mettre en oeuvre.

L'intensité du compactage Q/S :

L'évaluation de Q peut être réalisée par relevé topographique au remblai ou par comptage des engins de transport, après avoir étalonné le contenu de ces derniers pour chaque nature de sol et chaque mode d'extraction rencontré sur chantier.

L'évaluation de S est obtenue par le produit de la largeur de compactage par la longueur parcourue pendant l'échelon de temps retenu (généralement la journée).

3. Influence de la vitesse de translation :

La vitesse de translation du compacteur a une influence sur le compactage par compacteur vibrant. En effet, l'augmentation de la vitesse d'un compacteur vibrant a pour effet :

- d'accentuer le gradient de densité,
- de diminuer la masse volumique moyenne à nombre de passes donné,
- de réduire l'incidence du nombre de passes sur l'évolution des masses volumiques moyenne et en fond de couche.

Ceci a pour conséquence :

- L'existence d'une valeur de vitesse conduisant à un débit maximal du compacteur vibrant. Cette valeur est d'autant plus élevée que l'épaisseur compactée est faible.
- Le débit par unité de largeur de compactage Q/L passe par un optimum en fonction de la vitesse V du compacteur vibrant.

Ainsi, dans certains cas, il peut s'avérer intéressant de choisir, notamment pour les rouleaux vibrants de classe V3, V4 et V5, une épaisseur de couche relativement faible en utilisant une vitesse de translation adaptée et relativement élevée, de façon à augmenter le débit du compacteur.

4. Présentation des tableaux de compactage :

a) Compactage en remblai :

Pour un matériau donné utilisable en remblai, les tableaux présentent deux entrées :

- le type de compacteur
- les modalités de compactage.

Les modalités de compactage varient en fonction du niveau de compactage (faible, moyen ou intense) préconisé par les conditions d'utilisation du matériau.

Pour chaque niveau de compactage, les modalités de compactage sont fixées par les paramètres principaux : **Q/S**, **e** et **V** et par les paramètres auxiliaires **N** et **Q/L** où :

- N** : le nombre d'application de la charge
- Q/L** : le débit par unité de largeur de compactage ($\text{m}^3/\text{h.m}$)
- Q/S** : l'épaisseur unitaire de compactage (m^3/m^2)
- e** : l'épaisseur maximale compactée (en m)
- V** : la vitesse de translation (en Km/h)

Cette vitesse constitue une moyenne pour un compacteur à pneus et un compacteur statique à pieds d'ours.

Pour les compacteurs vibrants V3, V4 et V5 les tableaux donnent deux vitesses permettant d'optimiser le débit de l'atelier en fonction des conditions réelles du chantier.

Le tableau ci-après donne un exemple pour le compactage en remblai des sols A3 et C1A3.

A3 – C1A3 – TcA3 – TfA3

COMPACTEUR MATERIAU		P1	P2	P3	V1	V2	V3		V4		V5		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	SP1	SP2	PQ3	PQ4
		Q/S	0,020	0,040	0,060		0,040	0,055		0,070		0,085			0,040	0,070	0,085	0,110	0,040	0,070	
Energie de compactage faible Code 3	e	0,20	0,25	0,35		0,20		0,25	0,30	0,35	0,30	0,45		0,20	0,25	0,30	0,30	0,25	0,35		
	v	5,0	5,0	5,0		2,0		2,0	2,5	2,0	3,0	2,0	0	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	(2)	0	0
	N	10	7	6		5		5	5	5	4	6		5	4	4	4	7	5		
	Q/L	100	200	300		80		110	175	140	255	170		80	140	215	330	320	560		
Energie de compactage moyenne Code 2	Q/S		0,030	0,050			0,035		0,045		0,055				0,045	0,055	0,070	0,025	0,045		
	e		0,20	0,30				0,20		0,25		0,30			0,20	0,25	0,30	0,20	0,25		
	v	0	5,0	5,0	0	0		2,0		2,0		2,0	0	0	2,0	2,0	2,0	8,0	8,0	0	0
	N		7	6				6		6		6			5	5	5	8	6		
Q/L		150	250				70		90		110			90	110	140	200	360			
Energie de compactage intense Code 1	Q/S			0,030					0,030		0,035					0,035	0,045		0,025		
	e			0,20						0,20		0,25				0,20	0,25		0,20		
	v	0	0	5,0	0	0	0	0		2,0		2,0	0	0	0	2,0	2,0		8,0		0
	N			7						7		8				6	6		8		
Q/L			150						60		70				70	90		200			

β) Compactage en couche de forme :

Pour un matériau donné, utilisable en couche de forme, les modalités pratiques de compactage sont données par les paramètres : Q/S, e, V, N et Q/L. Ces paramètres ont la même signification que pour le compactage en remblai.

Le tableau ci-après donne un exemple pour des sols B5 et C1B5.

Compacteur Matériau		P1	P2	P3	V1	V2	V3		V4		V5		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	SP1	SP2	PQ3	PQ4
		Q/S	0,025	0,035		0,020	0,030		0,040		0,050										
B5 C1B5	e	0	0,20	0,30	0	0,20		0,30	0,35	0,40	0,30	0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	V		5,0	5,0		2,0		2,0	2,5	2,0	3,5	2,0									
	N		8	9		10		10	9	10	6	10									
	Q/L		125	175		40		50	100	80	175	100									

IV.4 - EXECUTION DU COMPACTAGE

1. Observations générales :

α) Cas d'un atelier hétérogène :

L'examen des tableaux relatifs aux modalités de compactage montre que les ateliers de compacteurs hétérogènes sont généralement pénalisant pour la réalisation du compactage.

En effet, l'épaisseur e de la couche compactée doit être inférieure à l'épaisseur maximale préconisée pour le compacteur le moins performant de l'atelier. Il y a donc toujours intérêt à avoir des ateliers les plus homogènes possibles de point de vue performances des compacteurs.

Les modalités pratiques à appliquer pour la composition de l'atelier sont les suivantes :

- débit réalisé < débit max compacteur 1 + débit max compacteur 2 +
soit $Q < (Q/S \text{ tab 1}) \times S1 + (Q/S \text{ tab 2}) S2 + \dots$

d'où :

$$\frac{(Q/S \text{ tab 1})}{Q/S1} + \frac{(Q/S \text{ tab 2})}{Q/S2} + \dots \geq 1$$

où :

Q : le volume global du matériau compacté

Si : surface balayée par la compacteur n° i

(Q/S tab i) : Q/S donné par les tableaux, relatif au compacteur i

L'application de la condition citée ci-dessus au cas d'un atelier homogène donne :

$$(Q/S \text{ tableau}) \times \left(\frac{1}{Q/S1} + \frac{1}{Q/S2} + \dots \right) \geq 1$$

Avec :

Q/S tableau : donnée relative au compacteur considéré qui compose l'atelier

Si : surface balayée par le compacteur n° i

β) Choix de la vitesse des compacteurs :

Pour les compacteurs à pneus et les dameurs statiques, la vitesse est variable suivant l'avancement du compactage. Elle est faible en début de compactage et devient plus élevée en fin de compactage.

Les modalités pratiques à respecter concernent alors la vitesse moyennes qui doit rester inférieure à la vitesse qui figure dans les tableaux.

Pour un compacteur vibrant, il est nécessaire de chercher une vitesse optimale adaptée à l'épaisseur de compactage retenue. Les données qui figurent dans les tableaux de compactage permettent d'arriver à cet optimum. Il est à noter qu'une vitesse de 5 km/h n'est pas toujours réalisable avec un compacteur vibrant.

γ) L'influence des caractéristiques des matériaux :

Les caractéristiques essentielles des matériaux qui déterminent les conditions de mise en oeuvre des remblais sont appréhendées au niveau de la classification adoptée. Cependant, certaines caractéristiques supplémentaires sont à prendre en compte lors du choix de la composition de l'atelier de compactage, à savoir :

- les problèmes de traficabilité des engins
- la présence de gros éléments dans le matériau de remblai

Le problème de traficabilité peut se poser pour certains engins avec les matériaux humides, les matériaux roulés et les matériaux homométriques. Deux solutions possibles se présentent alors, choisir des compacteurs plus légers et dans ce cas accepter une diminution dans l'épaisseur des couches, ou procéder à un passage de cylindre lisse sans vibration avant de procéder au compactage proprement dit.

La présence de gros éléments amène à faire un des choix possibles : l'élimination des gros éléments par tri ou par criblage ou le choix d'un compacteur plus performant qui permet de compacter des épaisseurs e telles que $D_{max} < 2/3 e$.

2. Cas des couches de forme :

α) Cas général :

Une couche de forme doit présenter des caractéristiques acceptables de portance et de nivellement.

Un bon réglage de la couche de forme nécessite un compactage en deux temps en respectant le schéma d'exécution suivant :

- Le réglage et le préréglage : cette opération peut se faire à la niveleuse.
- Un premier compactage, partiel, avec à peu près 70 % de l'énergie préconisée par les modalités pratiques.
- Le réglage final à la niveleuse ou à l'autograde : cette opération amène en général à éliminer 2 à 4 cm d'épaisseur du matériau compacté.
- Le compactage final.

La ségrégation peut également engendrer des défauts de portance et de nivellement. Elle est très néfaste pour les couches de forme traitées. Les remèdes contre la ségrégation consistent à :

- Diminuer le D max. et adopter les granulométries les plus continues possibles.
- Travailler avec des machines de répandage au lieu de la niveleuse.

β) Cas particulier des couches de forme traitées :

- ❖ Les opérations de réglage et de compactage doivent se faire dans les délais de maniabilité.
- ❖ Dans le cas où les épaisseurs seraient importantes, il est nécessaire de travailler en deux couches. Cependant ceci engendre le risque de présence d'un interface glissant, qu'il faut éliminer par l'adoption des dispositions suivantes :
 - la scarification de surface et l'humidification de la première couche ;
 - le compactage de la deuxième couche dans le délai de maniabilité. La nécessité d'avoir un bon réglage pour cette deuxième couche, amène souvent à adopter aussi les dispositions présentées pour le cas général.

IV.5 - LES PLANCHES EXPERIMENTALES

*L*e recours à des planches expérimentales s'avère nécessaire dans les cas suivants :

- Le compacteur présente des performances inconnues.
- Le matériau utilisé en remblai ne peut être classé dans la classification retenue, ou les conditions d'utilisation ne sont pas prises en compte par le présent guide sur les terrassements.

Elles peuvent alors servir à :

- comparer l'action de compacteurs différents sur un même matériau ;
- déterminer les modalités d'utilisation d'un compacteur avec un matériau donné (épaisseur, vitesse, fréquence) ;
- déterminer les modalités d'utilisation d'un matériau donné (teneur en eau, épaisseur) ;

La longueur minimale d'une planche est égale à 30 m avec une largeur de 4 à 5 m.

1. Choix du site :

L'importance de ce choix intervient au niveau de la rigidité du support sur lequel est réalisée la planche. Il est nécessaire d'avoir une rigidité du site qui présente une qualité voisine de celle du lieu des travaux.

2. Réalisation de la planche expérimentale :

Quel que soit l'objectif de cette planche, les paramètres suivants doivent être notés :

- les types des engins de compactage (marque, classe, ...) ;
- le type de matériau (sa classe et autres renseignements) ;
- l'épaisseur de la couche après compactage ;

- les caractéristiques réelles des engins de compactage (fréquence, lestage, pression de gonflage) ;
- plan de balayage adopté pour chaque engin ;
- scénario des mouvements des engins qui composent l'atelier de compactage.
- Le nombre de passes.

3. Mesure à effectuer sur les planches :

Les mesures à effectuer concernent :

- Le matériau compacté : granulométrie après compactage, teneur en eau et paramètres d'argilosité.
- L'épaisseur finale après compactage
- Les mesures de densités sur les matériaux "proctorisables" et la réalisation de prélèvements pour essais Proctor. Il est à noter que le jugement de la compacité se fera sur un minimum de 20 mesures par planche.
- Les mesures de rigidité (essais de plaque ou dynaplaque).
- Les mesures de tassement par nivellement lorsque ce procédé est retenu pour le jugement de la qualité du compactage. Cette procédure est généralement retenue pour les remblais en matériaux rocheux.

CHAPITRE V

LE CONTROLE DE COMPACTAGE

V.1 – PROCEDURES ENVISAGEABLES POUR LE CONTROLE DE COMPACTAGE

*L*e contrôle de compactage des matériaux en remblai et en couche de forme peut se faire suivant trois procédures :

- Par contrôle de densités par mesure de la masse volumique
- Par contrôle en continu des modalités de compactage qui consiste à vérifier l'épaisseur de la couche compactée et le rapport Q/S
- Par « mesure de tassement par nivellement » qui consiste à faire passer sur un remblai (ou une partie de remblai) un engin d'un poids donné et à mesurer par nivellement avant et après passage de l'engin le tassement obtenu, qui doit être comparé à un tassement de référence, fixé par le cahier de charge. Ce contrôle est très rarement appliqué car il est peu fiable.

La première méthode par contrôle de densités est la plus classique, elle consiste à mesurer la densité sèche après compactage et la comparer à une densité de référence. Cette méthode présente de nombreux inconvénients :

- la nécessité d'avoir une masse volumique de référence (généralement la densité maximale Proctor normal ou modifié). Cette référence est impossible à obtenir pour les matériaux ayant plus de 25 % d'éléments supérieurs à 20 mm ;
- la difficulté de mesurer in-situ la densité atteinte notamment à cause de sa distribution non homogène au sein de la couche compactée ;
- le caractère discret de ces mesures et leur interprétation statistique.

Par contre, le contrôle en continu des modalités de compactage a le mérite de porter directement sur les règles à respecter et qui garantissent par expérience, la qualité d'usage de l'ouvrage.

Le tableau ci-après, présente les éléments intervenant dans le choix de la procédure de contrôle du compactage des remblais et des couches de forme.

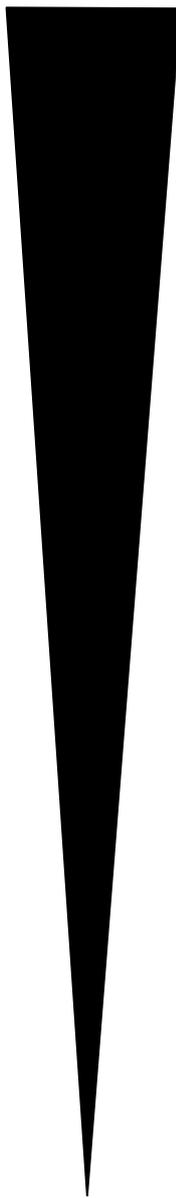
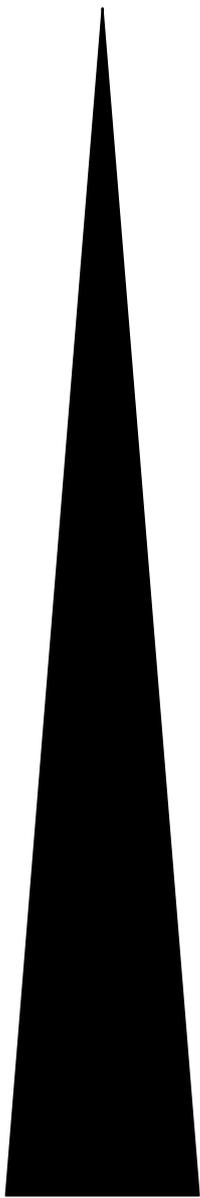
<i>DONNEES TECHNIQUES</i>		<i>DONNEES OPERATIONNELLES</i>		<i>TYPE DE SPECIFICATIONS (S) ET DE CONTROLE (C) APPROPRIE</i>		<i>CAS N°</i>	
On se trouve dans un des cas traités dans les tableaux du guide des terrassements	Le contrôle par mesure de densités en place est possible	Le contrôle courant par mesure des densités est possible	Préférence pour le contrôle "par densité"	(S) valeur de densité en place à obtenir (C) vérification des densités en place obtenues	} Procédure de contrôle "par densité"	1	
			Préférence pour le contrôle "en continu"	(S) modalités d'emploi des compacteurs (C) vérification des modalités d'emploi des compacteurs			} Procédure de contrôle "en continu"
	Le contrôle par mesure des densités en place est impossible	Le contrôle courant par mesures de densité est impossible		Procédure de contrôle "en continu" (idem cas n° 2)		3	
				Procédure de contrôle "en continu" (idem cas n° 2)		4	
On ne se trouve pas dans un des cas traités dans les tableaux du guide des terrassements	Le contrôle par mesure des densités en place est possible	Le contrôle courant par mesure des densités est possible	Préférence pour le contrôle "par densité"	Procédure de contrôle par densité (idem cas n° 1)		5	
			Préférence pour le contrôle "en continu"	(S) modalités d'emploi des compacteurs déterminées sur des planches d'essai à partir de mesure de densité (C) vérification des modalités d'emploi des compacteurs	} Procédure de contrôle "en continu"	6	
		Le contrôle courant par mesures de densité est exclu mais des planches d'essai s'appuyant sur les mesures de densité sont possibles		Procédure de contrôle « en continu » (idem cas n° 6)		7	
		Le contrôle courant ainsi que les planches d'essai s'appuyant sur des mesures de densité sont exclus		Choisir parmi les procédures définies dans les cas n° 9, 10, 12		8	
	Le contrôle par mesure des densités en place est impossible. (Le contrôle des tassements par nivellement est toujours possible mais sa fiabilité est assez mal connue)	Le contrôle courant par mesures des tassements par nivellement est possible	Le contrôle courant par mesures des tassements par nivellement est possible	Préférence pour le contrôle « par mesures de tassement par nivellement »	(S) Tassements maximaux admissibles sous une sollicitation donnée (sous un compacteur par exemple) © Vérification des tassements constatés	} Procédure de contrôle "par tassement"	9
				Préférence pour le contrôle « en continu »	(S) Modalités d'emploi des compacteurs déterminées sur des planches d'essai et sur la base des mesures de tassements © Vérification du respect des modalités d'emploi des compacteurs		
		Le contrôle courant par mesures de tassements est exclu mais des planches d'essai s'appuyant sur des mesures tassement par nivellement sont possibles		Procédure de contrôle « en continu » (idem, cas n° 10)		11	
		Le contrôle courant ainsi que les planches d'essai s'appuyant sur des mesures de tassement par nivellement sont exclus		(S) Modalités d'emploi des compacteurs déduites par analogie avec un cas proche traité dans les tableaux du guide des terrassements © Vérification des modalités d'emploi des compacteurs		} Procédure de contrôle "en continu"	12

V.2 – DIFFERENTS STADES DE CONTROLE

*L*e contrôle de compactage peut être envisagé à différents stades dans le processus de réalisation des terrassements. Ces stades sont les suivants :

- a. Ouvrage terminé
- b. Après réalisation d'une couche élémentaire
- c. En continu

Les conditions requises pour chaque stade de contrôle et les principales actions à mener sont résumées au niveau du tableau ci-après. Il va de soi que le contrôle après ouvrage terminé donne plus de liberté à l'entreprise dans la conduite de chantier, mais présente un risque important d'aboutir à des impasses quand les résultats du contrôle ne respectent pas les qualités requises au niveau du cahier de charges. Ce type de contrôle une fois l'ouvrage terminé, n'est préconisé que dans le cas d'expertises.

<i>STADE D'INTERVENTION CONSIDERE</i>	<i>PRINCIPALES CONDITIONS REQUISES</i>	<i>PRINCIPALES ACTIONS A MENER</i>	<i>SENS D'EVOLUTION POUR :</i>	
			- La liberté de l'entreprise dans la conduite du chantier. - Le risque d'aboutir à des impasses	- La contribution du maître d'œuvre au contrôle pendant les travaux. - La possibilité d'interpréter les résultats des mesures du contrôle
Ouvrage terminé	<ul style="list-style-type: none"> - Conséquences de résultats défavorables éventuels prévues au marché. - Matériaux ne devant pas comporter plus de 25 % d'éléments tels que D > 20 mm (essai proctor). - Disponibilité du matériel de diagraphie - Hauteur du remblai limite aux possibilités d'investigation du matériel de diagraphie utilisé. 	<ul style="list-style-type: none"> -Diagraphie de densité sèche sur toute la hauteur de l'ouvrage. -Prélèvement d'échantillons pour : <ul style="list-style-type: none"> • la détermination de la densité de référence, • la teneur en eau. 	MAXIMUM	MINIMUM
Couches élémentaires	<ul style="list-style-type: none"> - Matériaux ne comportant pas plus de 25 % d'éléments tels que D > 20 mm (essai proctor). - Epaisseur de couche compatible avec le matériel de mesure de densité utilisé (en général ≤ 50 cm). - Présence sur chantier de moyens de contrôle suffisants pour effectuer les essais à la fréquence souhaitée par le maître d'œuvre. 	<ul style="list-style-type: none"> - Mesure de densité sèche sur toute l'épaisseur de la (ou des) couches considérées. -Prélèvements d'échantillons pour : <ul style="list-style-type: none"> • la détermination de la densité de référence, • la teneur en eau. 		
En continu	<ul style="list-style-type: none"> - Définition précise des conditions d'utilisation des sols. - Connaissance permanente de la nature et de l'état des sols mis en œuvre. - Suivi en continu des règles d'exécution. 	<ul style="list-style-type: none"> - Identification des matériaux à partir des essais classiques et de l'appréciation visuelle. -Vérification du respect des conditions d'utilisation des sols et des modalités de fonctionnement des compacteurs. 		

V.3 – CONTROLE EN CONTINU DES MODALITES DE COMPACTAGE

1. Modalités à contrôler :

Ces modalités sont les suivantes :

- La nature et l'état des matériaux utilisés pour chaque séquence de compactage.
- L'épaisseur maximale, e , des couches (après compactage), qui doit être compatible avec l'efficacité du compacteur utilisé.
- L'intensité de compactage devant être appliquée, elle est exprimée par le rapport Q/S dans lequel Q est le volume du sol remblayé (mesuré après compactage) et S la surface balayée par le compacteur pour compacter ce volume.
- Les classes et les conditions de fonctionnement des compacteurs : vitesse maximale pour les compacteurs vibrants, vitesse minimale pour les compacteurs à pieds dameurs, lestage, fréquence de vibration, moment des excentriques, pression de gonflage.
- L'équipement des compacteurs avec des appareils de mesure et d'enregistrement de la distance parcourue par le compacteur, de sa vitesse et, pour les rouleaux vibrants, de la fréquence de vibration et du moment d'excentrique.

Pour faciliter ce contrôle, l'entrepreneur doit :

- Fournir un programme d'utilisation des engins de transport, réglage, compactage, journalier ou de manière moins systématique, chaque fois qu'il modifie les effectifs ou la nature des engins dans les échelons de production.
- Communiquer le volume et la nature et l'état des matériaux mis en remblai durant la séquence retenue pour effectuer le contrôle de l'intensité de compactage Q/S (la journée ou la demi-journée en général).

Les valeurs de e et Q/S à prescrire sont extraites des tableaux du présent guide des terrassements qui donnent ces valeurs pour les différentes classes de matériaux utilisables et les différents matériels de compactage(à défaut ces valeurs sont à fixer par des planches expérimentales réalisées en début de chantier).

Les spécifications à respecter pour le compactage sont les suivantes :

- Dans le cas d'énergies de compactage intense et moyen, 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.
- Dans le cas d'énergie de compactage faible, le Q/S réel doit être proche du Q/S indiqué dans les tableaux ; la valeur moyenne doit être centrée sur la valeur indiquée. Elle ne doit être ni beaucoup plus élevée, ni beaucoup plus faible ; l'intervalle normalement acceptable est $\pm 20 \%$ par rapport à la valeur indiquée.
- 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.

En ce qui concerne les épaisseurs, elles doivent respecter les spécifications suivantes :

- Dans le cas d'un compactage intense ou moyen :
 e mesurée in-situ $\leq e$ prescrite par les tableaux
- Dans le cas d'un compactage faible :
 e prescrite $- 15 \% \leq e$ mesurée in-situ $\leq e$ prescrite $+ 15 \%$

Le tableau ci-après résume ces spécifications :

NIVEAU DE COMPACTAGE EXIGE	SPECIFICATIONS	
	e	Q/S
Faible	e mesurée = e prescrite + 15 % - 15 %	Q/S mesuré = Q/S prescrit + 20 % - 20 %
Intense et moyen	e mesurée $\leq e$ prescrite	Q/S mesuré \leq Q/S prescrit

2. Consistance des opérations de contrôle :

La procédure de contrôle du compactage « en continu » requiert la connaissance des données suivantes :

- les matériaux (identification en terme de nature et d'état) ;
- les compacteurs utilisés (leur classification) ;

- l'épaisseur des couches compactées ;

- les volumes de matériaux compactés (par séquence durant lesquelles les conditions de sols et de compactage sont considérées comme constantes) ;

- les surfaces balayées par les compacteurs ;

- les paramètres de fonctionnement des compacteurs (vitesse de translation, fréquence, moment des excentriques) ;

- le plan de balayage (la répartition uniforme du compactage dans le profil en travers notamment) et dans le cas de sols traités au ciment, le délai de maniabilité.

Le chapitre IV donne des indications pour la mesure de l'épaisseur des couches et la mesure du volume Q des matériaux compactés.

La mesure de la surface balayée par les compacteurs est obtenue en effectuant le produit de la largeur de compactage, par la distance parcourue par les engins. Cette dernière peut être déterminée de façon commode et avec une bonne précision, à l'aide de tachographes enregistreurs, du type de ceux utilisés classiquement sur les véhicules routiers (une adaptation et un étalonnage sont cependant nécessaires pour en effectuer le montage sur les engins de compactage, mais pratiquement tous les engins modernes peuvent être équipés).

Il est nécessaire de vérifier la présence de l'appareil sur chaque engin de compactage et veiller avec un soin particulier à son bon fonctionnement et à son étalonnage.

La périodicité des mesures de Q et de S doit, en toute rigueur, dépendre de la variabilité des conditions de chantier. Dans les cas, les plus courants, où ces conditions ne varient pas au cours d'une même journée, une fréquence journalière des relevés peut être considérée comme satisfaisante. Des fréquences plus grandes, la demi-journée ou même l'heure peuvent être envisagées pour des travaux spéciaux (remblai derrière culée, contrôle ponctuel de l'intensité de compactage, etc....) ou au vu de modifications importantes et subites des conditions de chantier.

Pour ce qui concerne le contrôle des caractéristiques de fonctionnement des compacteurs : lestage, vitesse de déplacement, amplitude et fréquence de vibration et valeurs de (M1/L, A0) il est nécessaire de procéder à un agrément des compacteurs avant usage sur le terrain. on peut également procéder à des mesures inopinées de ces paramètres (lestage , amplitude et fréquence de vibration plus particulièrement) pendant le déroulement des travaux. Cependant une véritable garantie du respect des valeurs spécifiées ne peut être obtenue que par les enregistrements fournis par les compteurs tachographes déjà mentionnés.

L'examen de ces documents permet en effet de détecter d'éventuels défauts dans l'exécution des travaux : vitesse de travail des compacteurs vibrants trop élevés, arrêt de la vibration, non-concordance entre les heures d'approvisionnement des matériaux et celle du compactage, etc., défauts qui par ailleurs ne pourraient que très difficilement être décelés par tout autre contrôle.

V.4 – CONTROLE DE LA RIGIDITE

1. Types de mesures :

*L*e contrôle de la rigidité a pour objectif de vérifier le niveau de portance de l'arase des terrassements (Ari) et celui de la plate-forme support de chaussée (PFj).

Ce contrôle est effectué de deux façons différentes :

- a. la mesure du module de déformation à l'essai de plaque ou à la dynaplaque (module EV2 ou module Edyn).
- b. La mesure de la déflexion au déflectographe LACROIX ou à la poutre Benkelmann sous un essieu à 13 tonnes.

Les cadences généralement retenues sont :

- Pour l'essai de plaque (ou la dynaplaque) un point tous les 40 m, généralement les mesures sont effectuées en quinconce quand il s'agit d'une plate-forme de largeur de 7 à 10 m.
- Les mesures de déflexion, quand elles sont réalisées à la poutre Benkelman, respectent en général la cadence d'une mesure tous les 20 m sur une même voie.

2. Spécifications retenues pour le chantier :

α) Critères de réception des classes d'arases :

Les arases font l'objet de critères de réception en chantier et de caractérisation de portance pour le long terme pour dimensionner les chaussées, ces critères se présentent comme suit :

CLASSES D'ARASE		CHANTIER (CRITERES DE RECEPTION VERIFIES POUR 95 % DES POINTS)	
		EV2 (MPa)	D (1/100 mm)
AR _i	S _k		
AR1	S1	≥ 30	≤ 300
AR2	S2	≥ 80	≤ 150
AR3	S3	≥ 120	≤ 100
AR4	S4	≥ 200	≤ 60

COMMENTAIRE :

Pour que la couche de forme puisse être exécutée de manière satisfaisante, il est nécessaire de limiter l'orniérage et la déformabilité de l'arase. La valeur du module EV2 nécessaire est :

- 30 MPa pour une couche de forme traitée
- 20 MPa pour une couche de forme granulaire

β) Critères de réception des plates-formes :

Les critères de réception en chantier sont les suivants :

• **Cas de couches de forme non traitées**

CLASSES	CHANTIER (CRITERES DE RECEPTION VERIFIES POUR 95 % DES POINTS)	
	EV2 (MPa)	D (1/100 mm)
PF1	≥ 30	≤ 300
PF2	≥ 80	≤ 150
PF3	≥ 120	≤ 100
PF4	≥ 200	≤ 60

- **Cas de couches de forme traitées**

CLASSES	CHANTIER (CRITERES DE RECEPTION VERIFIES POUR 95 % DES POINTS)
	D (1/100 mm)
PF2	≤ 80
PF3	≤ 50
PF4	≤ 20

Pour une couche de forme traitée à la chaux la déflexion d mesurée à 28 j doit rester inférieure à 1,5 mm (ou $150/100^{\text{ème}}$ de mm).

3. Caractérisation à long terme :

Pour la vérification des classes d'arase et de plate-forme pour le long terme, il est nécessaire que les mesures de modules EV2 (effectués à l'essai de plaque) soient réalisées en tenant compte des conditions hydriques prévues pour le long terme.

Pour les matériaux insensibles ou très peu sensibles à l'eau, les résultats obtenus après achèvement des travaux reflètent la portance réelle à long terme.

Pour les matériaux sensibles à l'eau les essais de plaques sont à effectués dans les conditions hydriques prévues par le projet. Ceci peut amener à procéder à une imbibition artificielle de l'arase ou de la couche de forme pour atteindre les degrés de saturation les plus probables.

CHAPITRE VI

REMBLAIS PARTICULIERS



Les remblais particuliers traités dans ce chapitre, sont les suivants :

- ***les remblais en zone inondable***
- ***les remblais contigus aux ouvrages d'art***
- ***les remblais de grande hauteur***

VI.1 – LES REMBLAIS EN ZONE INONDABLE

1. Risques à éviter et conditions à satisfaire par un remblai immergé :

Un remblai immergé est exposé aux risques suivants de désordres :

α - départs des fines du matériaux constituant le remblai

β - les mouvements de retrait gonflement des matériaux de remblai

γ - l'évolution des caractéristiques mécaniques des sols immergés qui peut entraîner l'instabilité du remblai à la rupture .

σ - les effondrements du remblai

- ♣ Les départs des fines sont constatés lorsque le remblai est traversé par un gradient hydraulique et aussi pendant les mouvements de baisse du niveau d'eau. En effet, l'eau peut entraîner les éléments les plus fins lorsque le sol est peu cohérent et aussi lorsque la fraction fine est peu abondante dans le sol. Le matériau de remblai doit donc être :
 - insensible à l'eau
 - présentant une courbe granulométrique continue et squelettique avec des éléments fins moyennement à peu plastiques.
- ♣ Les mouvements de retrait-gonflement sont constatés avec des remblais en argiles plastiques à très plastiques qui font l'objet d'une forte variation volumétrique sous l'action séchage-imbibition. Ces mouvements engendrent l'apparition en période sèche de fissures importantes dans le remblai. Le matériau de remblai s'il est fin, ne doit pas présenter un indice de plasticité supérieur à 25.
- ♣ Les phénomènes d'instabilité à la rupture surviennent avec les sols fins fortement argileux, dont les caractéristiques mécaniques chutent après saturation (sols A3 et A4).
- ♣ Les effondrements de remblai peuvent survenir avec les sols qui ont été mis en œuvre à l'état sec , Il est à noter que ceci n'est pas spécifique des remblais inondables mais de tous les remblais susceptibles d'être humidifiés. Ce risque est d'autant plus élevé que le matériau est argileux et le remblai de hauteur importante.

2. Dispositions constructives :

En zone inondable, il faut distinguer les deux cas suivants :

1^{er} cas : la hauteur d'eau est faible, voire négligeable (hauteur d'eau de référence inférieure à 1m avec absence de gradient hydraulique).

2^{ème} cas : la hauteur d'eau est importante, ou cette hauteur est faible avec existence de gradient hydraulique.

A – HAUTEUR D'EAU FAIBLE

Le relief est en général plat et l'eau est difficile à évacuer. Il n'y a pas de problème de stabilité globale du remblai. Il est cependant nécessaire d'assurer une portance suffisante d'une part, à court terme, pendant l'exécution des travaux et d'autre part, à long terme, pendant l'exploitation de l'ouvrage. Les dispositions constructives à adopter sont donc les suivantes :

Pendant la réalisation du chantier :

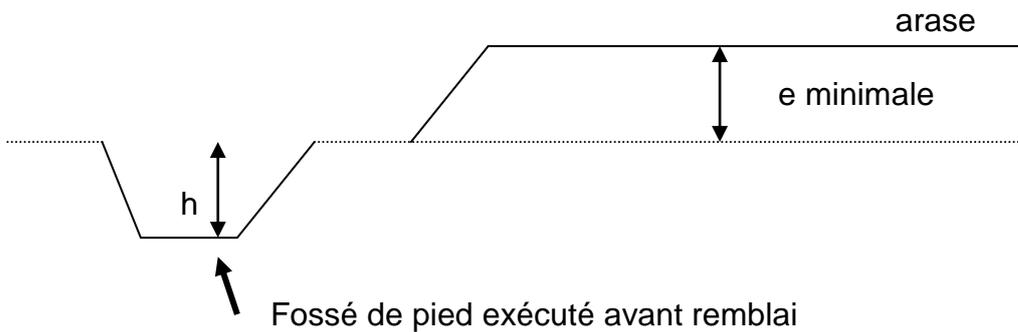
1. La réalisation d'un fossé de pieds de remblai, exécuté avant la réalisation du remblai. La profondeur du fossé doit dépasser 1 m.
2. Afin d'assurer une portance acceptable au niveau de l'arase, adopter pour le remblai une hauteur :

$e_{\min} \geq 1,20$ m avec les sols argileux acceptables

$e_{\min} \geq 0,80$ m avec les matériaux rocheux insensibles à l'eau.

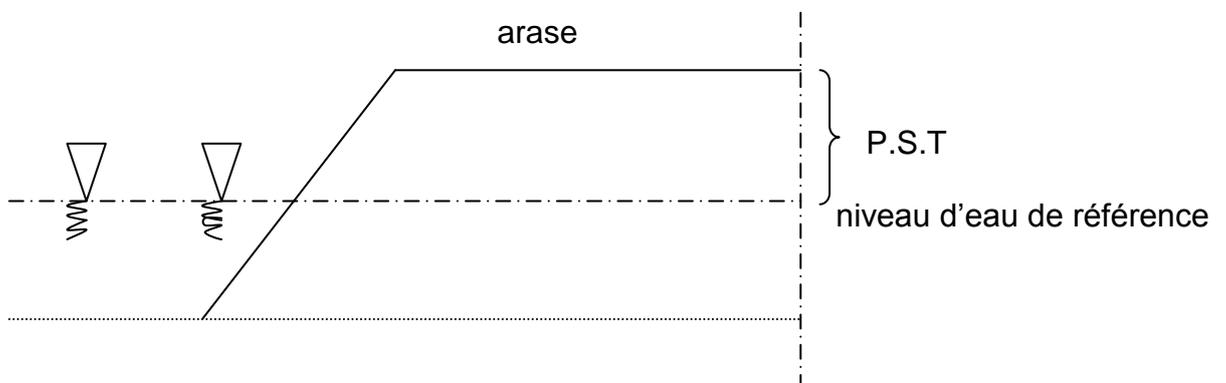
Ces épaisseurs sont à adopter si le niveau de l'eau ne peut monter au-dessus du terrain naturel . Dans le cas contraire ces épaisseurs sont à adopter au dessus du PHE.

Dans le cas d'un risque de contamination du matériau de remblai par le terrain naturel en place et de remontée capillaire, un géotextile anti-contaminant et drainant peut être prévu pour éviter ce risque. Ce géotextile est à placer entre le terrain naturel et la première couche du remblai.



En exploitation de l'ouvrage :

1. La portance au niveau de l'arase doit être évaluée compte tenu des conditions de teneurs en eau les plus défavorables. Cette portance est évaluée par l'essai CBR.
2. Le niveau d'eau de référence ne doit pas atteindre la P.S.T :



Les sols utilisables au niveau de la partie inondable

Sont utilisables sans restriction :

- les sols rocheux non évolutifs
- les sols grenus des catégories : D2, D3, B3, B4, B6, CB3, CB4, CB6 et CA2
- les sols fins de catégorie A2
- les sols tuffacés TC : TCA1, TCA2 et TCBi
- les sols tuffacés Tf : TfA2, TfB3, TfB4, TfB5, TfB6

Sont utilisables après traitement ou protection à définir par une étude spéciale de laboratoire :

- les sols rocheux évolutifs
- les sols fins de catégories : A1, A3 et les CAi correspondants
- les sols grenus des catégories : D1, B1, B2, B5 et CBi correspondants
- les sols tuffacés TfA1, TfA3, TfB1, TfB2 et TcA3

B – HAUTEUR D’EAU IMPORTANTE

Le remblai peut être réalisé de deux manières différentes, à savoir :

1. remblai en matériau insensible à l’eau
2. remblai conçu en digue

B.1/ Remblai en matériau insensible à l’eau :

Cette solution est la plus classique. Les matériaux utilisables en remblai au niveau de la partie inondable sont :

- les sols graveleux des catégories : D2, D3, B3, B4, CB3, et CB4
- les sols tuffacés TCA1, TCA2, TCB3 et TCB4
- les matériaux rocheux non évolutifs
- après traitement à la chaux des sols suivants A2, A3, B5, B6, les CA et CB correspondants, les TfA et TfB correspondants, TCB5 et TCB6,
- après protection contre l’érosion par un géotextile ou un filtre, des sols suivants : D1, B1, B2, TCA1, TCB1, TCB2, CB1, CB2, TfB1 et TfB2.

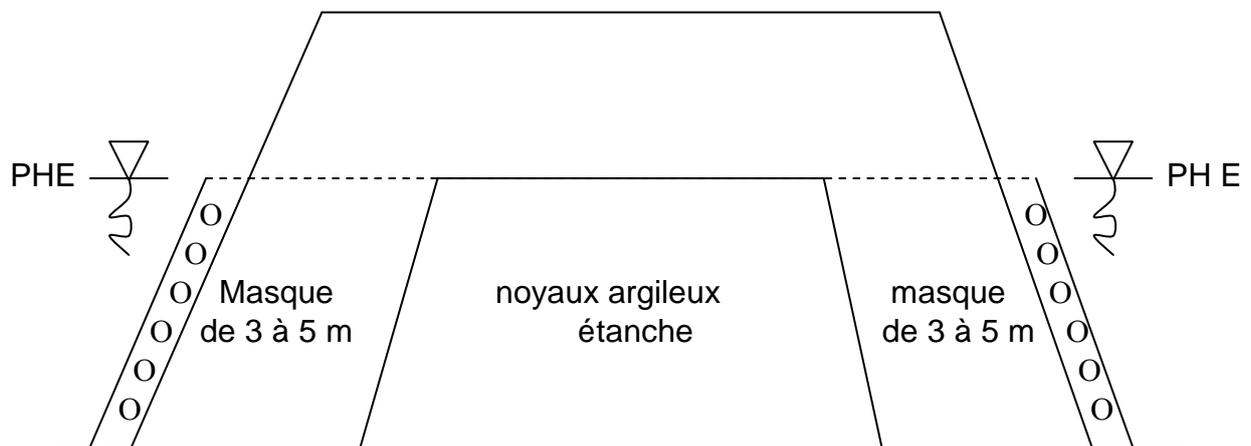
B.2/ Remblai conçu en digue :

Le corps de la digue est conçu en tenant compte de la stabilité du remblai :

- en régime statique, pour le cas des plus hautes eaux connues
- en régime dynamique, pour le cas d’une vidange rapide

La structure habituelle de la digue est constituée :

- d'un noyau argileux étanche ;
- d'un masque en matériaux perméables et frottants de 3 à 5 m de large pour protéger les flancs du noyau étanche. Ce masque doit respecter les conditions de filtre ou présenter un géotextile filtrant et anti-contaminant vis à vis du noyau argileux ;
- éventuellement d'une protection en enrochements contre l'érosion par les courants.



VI.2 – LES REMBLAIS CONTIGUS AUX OUVRAGES D'ART

Les risques potentiels que présente un remblai contigu à un ouvrage d'art sont les suivants :

- Le tassement différentiel qui peut être important.
- La fissuration au niveau de la jonction du remblai et de l'ouvrage d'art.

Afin d'éviter ces risques il est nécessaire de respecter certaines dispositions constructives concernant :

- la conception du remblai,
- le choix des matériaux,
- la mise en œuvre

1. La conception du remblai :

Il est nécessaire :

- De prévoir une dalle de transition entre le remblai contigu et l'ouvrage d'art pour éviter la fissuration au niveau de la jonction.
- D'assurer un bon assainissement au niveau de la jonction du remblai et de l'ouvrage pour éviter la chute de portance et l'érosion du remblai, et sous la dalle de transition. Cet assainissement peut être effectué en matériaux granulaires qui respectent la règle des filtres vis à vis du matériau de remblai ou en matériaux géotextiles drainants et filtrants.

2. Le choix des matériaux et du matériel :

Les remblais contigus doivent être soigneusement compactés. Il est donc nécessaire d'assurer un bon compactage du remblai sans endommager l'ouvrage d'art. Ceci impose :

- d'éviter l'utilisation des compacteurs lourds .
- l'utilisation de matériaux qui se compactent facilement, qui soient peu ou pas plastiques pour éviter les tassements par fluage et qui ne soient pas facilement érodables.

Les compacteurs à éviter sont :

- le compacteur à pneu : P3
- les compacteurs vibrants : V4 et V5
- les vibrants à pieds dameurs : VP3 à VP5
- les statiques à pieds dameurs : SP1 et SP2

Les matériaux à utiliser en remblai sont les sols des classes suivantes :

- D2, B3, B2 avec VBS < 1,5 ; B4 avec VBS < 1,5
- Les tufs TCBi correspondants aux classes citées ci-dessus.

3. La mise en œuvre :

Le compactage des matériaux de remblais doit se faire :

- en couches minces
- à des teneurs en eau proches de l'optimum Proctor

VI.3 – LES REMBLAIS DE GRANDE HAUTEUR (H>15 M)

Les remblais de grande hauteur sont **les remblais dont la hauteur dépasse 15 m**. Ces remblais sont considérés comme des ouvrages d'art et doivent faire l'objet pour chaque cas d'une étude spéciale. Les objectifs essentiels à satisfaire par ces remblais sont :

- La limitation, voire, l'absence des tassements dans le corps de remblai
- La stabilité d'ensemble du remblai et du remblai et son assiette

L'importance de ces remblais nécessite de les traiter comme des ouvrages d'art.

La satisfaction des objectifs cités ci-dessus impose le respect de certaines règles concernant :

- La conception du remblai
- la choix des matériaux de remblai
- les conditions de mise en œuvre

A – LA CONCEPTION DU REMBLAI :

Pour un remblai de grande hauteur, la cause essentielle des désordres est liée aux écoulements des eaux. En effet, ces eaux provoquent :

- de l'érosion au niveau des talus
- des effondrements dans le corps de remblai et l'instabilité d'ensemble quand ces eaux pénètrent dans le corps de remblai.

Les eaux proviennent :

- des écoulements de surfaces qui s'infiltrent à travers la chaussée et ses annexes, ainsi qu'à travers les talus du remblai ;
- des remontées par succion dans les zones humides ou inondables.

En matière de conception, les dispositions constructives suivantes sont donc à respecter :

1. *Evaluation de la stabilité du remblai au glissement en mesurant C' et φ' sur les sols remaniés prévisibles en remblai à l'état saturé et dans leur niveau de compactage prévu*

2. *Au niveau de la chaussée et de ses annexes :*

- prévoir un drainage transversale de la chaussée ;
- prévoir une arase peu perméable ou insensible à l'eau sur une épaisseur de au moins 50 cm ;
- adopter des pentes transversales de 4 à 6 % au niveau de la couche de forme et des drains transversaux et récupérer les eaux par cunettes bétonnées longitudinales pour éviter les infiltrations dans les talus.

3. *Au niveau du corps de remblai :*

- Les discontinuités et les hétérogénéités dans le corps de remblai entraînent des concentrations des écoulements. Il est donc nécessaire de bien maîtriser ces aspects pour maîtriser les mouvements d'eau possibles.
- Eviter, le plus possible, d'utiliser les matériaux hétérogènes en remblai.
- Moduler le compactage avec la hauteur du remblai, en adoptant dans tous les cas, une énergie proche du Proctor Modifié de 0 à 15 m. Cette énergie est à adopter éventuellement jusqu'à la cote -15 m par rapport à la crête supérieure du remblai si le remblai est de très grande hauteur ($h \geq 30$ m).
- Réaliser éventuellement au laboratoire, pour les remblais de très grande hauteur, sur les matériaux de remblais des essais de sensibilité oedométriques. Ces essais auront pour objectif de fixer la densité de référence à atteindre en tenant compte de la position du matériaux dans le remblai de très grande hauteur. Le compactage se fera dans tous les cas à une teneur en eau proche de l'OPM. Il est en effet très important de ne pas compacter les matériaux à l'état sec.
- Au niveau des transitions déblai/remblai, évacuer l'eau rapidement et transversalement pour éviter les arrivées d'eau au niveau des remblais.

4. *Au niveau des talus :*

Afin d'éviter l'érosion sous l'action de ruissellement des eaux et l'infiltration des eaux dans le corps de remblai, il est nécessaire de :

- éviter, autant que possible, le recours aux risbermes ,et dans le cas contraire adopter de très bonnes pentes pour assainir ces risbermes(>6%).
- réduire les pentes de talus pour diminuer les effets de l'érosion .

- éventuellement stabiliser les talus par traitement à la chaux.

5. *Au niveau de la base du remblai s'il présente des risques de remontées par succion :*

- réaliser une couche drainante en matériaux granulaires non évolutifs ou en géotextile drainant, ou
- mettre en place un matériau traité à la base du remblai sur une hauteur égale à celle des plus hautes eaux ou celle de la remontée capillaire prévue.

B – LE CHOIX DES MATERIAUX DE REMBLAI

Dans le cas de remblais de grande hauteur, il faut éviter le compactage des sols à l'état sec. En effet, ceci augmente le risque d'effondrement après imbibition dans le corps de remblai. Les matériaux à utiliser en remblai doivent être à l'état m en matière de teneur en eau. Les sols utilisables et les conditions d'utilisation sont les suivantes :

Sont utilisables à l'état naturel :

- Les sols rocheux non évolutifs. Le caractère évolutif a été défini au niveau de la classification des roches.
- Les sols grenus des catégories : D2, D3, B3, B4, B6 (avec IP < 25), les C1B et C2B correspondants.
- Les sols fins des catégories : A2 (avec IP < 15) , les C1A2 et C2A2 correspondants .
- Les sols tuffacés des catégories suivantes : TCAi, TCBi, TfAi et TfBi des catégories citées ci-dessus.

Sont utilisables après traitement ou protection à définir par une étude spéciale de laboratoire :

- Les sols fins et les sols grenus dont l'indice de plasticité est supérieur à 25.
- Les roches évolutives.

Sont utilisables, moyennant une protection spéciale au niveau des talus ou un traitement avec liant au niveau des talus, les sols des catégories suivantes :

- A1, B1, B2 (avec VBS < 1,5), B5 et D1
- Les sols tuffacés : TC et Tf relatifs aux catégories citées ci-dessus.

C – CAS PARTICULIER DES ROCHES EVOLUTIVES :

Ceci est le cas des matériaux argilo-schisteux qui sont :

- Les Marnes
- Les Schistes .

Et des roches tendres qui sont :

- Les Calcaires tendres
- Les grès dunaires
- Les calcaires marneux.

Les modalités d'utilisation en remblai classique de ces matériaux figurent dans les annexes du fascicule II. Le principe de base pour une telle utilisation est la fragmentation maximale des matériaux et leur protection contre l'évolution.

Pour les remblais particuliers de grande hauteur, les mêmes principes sont retenus. En général, deux options possibles se présentent :

OPTION 1 : mettre les matériaux les plus sensibles à l'évolution au niveau du noyau du remblai.

OPTION 2 : mettre les matériaux les moins sensibles sous la chaussée.

Le principe directeur de l'**option 1** est la limitation des dégradations par évolution. Le noyau sensible est en effet enveloppé sur les bords et au niveau de sa partie supérieure d'une couche de 3 à 5 m de matériau moins évolutif et peu perméable. Cette disposition, accompagnée des autres dispositions constructives, notamment la limitation des arrivées d'eau et l'adoucissement des pentes de talus, permettent d'atteindre les objectifs fixés pour cette option.

Le principe directeur pour l'**option 2** est de préserver la chaussée en cas de dégradation au niveau du remblai de grande hauteur. Le matériau de remblai est traité pour le rendre non évolutif. Les autres dispositions retenues pour le cas général des remblais de grande hauteur, notamment la protection du talus et l'adoucissement des pentes, doivent être respectées.

Dans le cas particulier de remblais en marnes ou en schistes, les dispositions constructives énoncées ci-dessus sont à compléter par les dispositions suivantes :

- Moduler le compactage avec la hauteur du remblai en recherchant une énergie proche de l'OPM au niveau des 15 m inférieures et procéder aussi par méthode excédentaire de compactage.

- Eviter le compactage des marnes et des schistes évolutifs à l'état sec, travailler surtout à l'état m sols moyennement humides et contrôler la fracturation des blocs pour éviter l'évolution granulométrique.
- Protéger les talus avec un géotextile, un sol insensible à l'eau ou par un traitement à la chaux et choisir une pente de talus de 1/2 proche de l'angle de frottement du sol saturé.
- Abandonner les solutions avec risbermes.

CHAPITRE VII

LE COMPACTAGE A SEC



VII.1 – ASPECTS SPECIFIQUES DU COMPACTAGE A SEC

Le compactage à sec, ou à faible teneur en eau, présente un intérêt évident au niveau des zones arides et en milieu désertique. Ce type de compactage est possible pour certains sols et avec certains engins, notamment les compacteurs vibrants. Il a été expérimenté au niveau des chantiers de construction de routes au SAHARA.

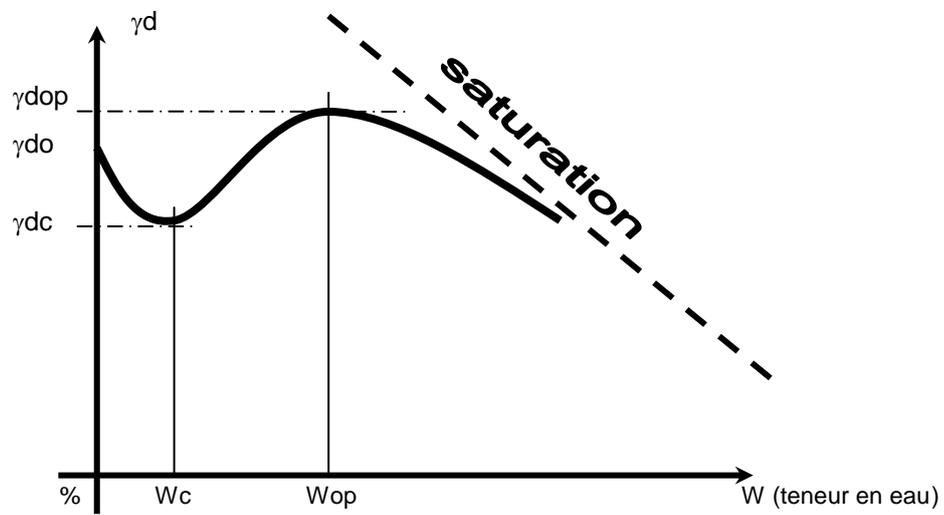
Ce type de compactage présente des aspects spécifiques concernant :

- La variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau
- La variation de la densité en fonction de la profondeur de couche

a. Variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau :

Les études réalisées au laboratoire montrent que lors de la réalisation de la détermination, pour une énergie de compactage donnée, de la courbe représentative $\gamma_d = f(W)$ depuis une teneur en eau quasi nulle jusqu'à la saturation, la courbe obtenue fait apparaître souvent deux teneurs en eau caractéristiques :

- W_{opt} , classique conduisant à la densité sèche maximale γ_{dopt} de l'essai Proctor.
- W_c , dite teneur en eau critique, pour laquelle la densité sèche passe par un minimum γ_{dc} . C'est la teneur en eau à partir de laquelle γ_d croît nettement avec W . Entre une teneur en eau nulle et W_c , la densité décroît en général.



Courbe complète Proctor – Variation de la densité sèche en fonction de la teneur en eau.

b. Variation de la densité en fonction de la profondeur :

La courbe de variation de la densité en fonction de la profondeur présente une allure semblable à celle obtenue par compactage classique. Cependant les deux courbes présentent les différences suivantes :

- La densité obtenue au niveau de la partie supérieure de la couche est beaucoup plus faible pour un compactage à sec. La zone de surface est donc toujours mal compactée.
- Les densités en fond de couche sont à peu près comparables.

Le compactage de la zone de surface doit se réaliser à travers la couche suivante sus-jacente.

c. La nature des sols :

Les sols qui donnent les meilleurs résultats au compactage à faible teneur en eau sont donnés ci-après, en milieu désertique ces sols sont aussi utilisables en couche de forme.

- *Les sols fins peu plastiques A1 et A2* : les sols A1 peuvent poser des problèmes de traficabilité pour les engins de compactage. Ces sols nécessitent aussi de procéder à une trituration préalable (surtout pour A2).
- *Les graves et sables propres* : D1, D2, D3, B1, et B3
- *Les graves et sables peu argileuses* : B2 et B4
- *Les graves et sables très silteux* : B5
- *Les graves et sables argileux* : B6 (avec IP < 25)
- *Les tufs Tc et Tf correspondants aux classes citées ci-dessus*
- *Les sols C1 correspondant aux classes citées ci-dessus.*

VII.2 – MODALITES DE COMPACTAGE A FAIBLE TENEUR EN EAU

Les modalités de compactage à faible teneur en eau concernent :

- Les types de compacteurs utilisables et les conditions de leur utilisation.
- Les conditions d'utilisation des sols (épaisseur max. dispositions particulières éventuelles).

a. Les types de compacteurs utilisables :

Les compacteurs utilisables sont :

- Les rouleaux vibrants
- Les compacteurs à pneus

Les autres types de compacteurs ne sont pas utilisables.

Les classifications retenues pour rouleaux vibrants et les compacteurs à pneus sont les mêmes que celles qui ont été présentées au niveau du chapitre relatif au compactage des remblais et des couches de forme. Cependant, pour les compacteurs à pneus, il est nécessaire au niveau du chantier de chercher à moduler la pression de gonflage pour assurer un niveau de traficabilité acceptable et une efficacité maximale de compactage.

b. Les conditions d'utilisation des sols :

Les conditions d'utilisation des sols concernent :

- L'épaisseur maximale de la couche compactée.
- Les différentes dispositions constructives à respecter en matière de finition

Ces conditions sont résumées ci-après. Elles se rapportent aux classes de sols présentées ci-dessus et aux sols tuffacés Tc et Tf qui correspondent à ces classes.

Les sols fins peu plastiques A1 et A2 :

Ces sols nécessitent une trituration préalable pour les plus plastiques (A2). Les sols A1 peuvent poser des problèmes de traficabilité. Le compactage à faible teneur en eau est plus facile avec les A1 que les A2.

La mise en œuvre en remblai se fait avec des épaisseurs de 15 à 35 cm. Le compactage se fera par des vibrants de classes V3, V4 ou V5.

Une finition est nécessaire au niveau de l'arase. Elle se fera par arrosage d'eau à raison de 5 à 10 l/m² et compactage au compacteur à pneu.

Les graves et sables propres : D1, D2, D3, B1 et B3 :

- Les sables propres D1 et B1 peuvent poser des problèmes de traficabilité.
- Les graves propres D2 et D3 et B3 conviennent bien au compactage à sec.
- Les épaisseurs de mise en œuvre en remblai varient de 30 à 70 cm.
- Le compactage se fera par vibrants : V1, V2, V3, V4 et V5.
- Une finition avec un compacteur à pneu ou un vibrant léger est nécessaire au niveau de l'arase.

Les graves et sables peu argileux : B2 et B4 :

La teneur en eau naturelle doit être inférieure à la teneur en eau critique $W_c = 4\%$. L'épaisseur de mise en œuvre varie de 20 à 40 cm. Les compacteurs à utiliser sont des vibrants : V2, V3, V4 et V5.

Les graves et sables très silteux : B5

Ces sols conviennent au compactage à sec. La teneur en eau naturelle doit être inférieur à $W_c = 3$ à 4% .

Une finition au niveau de l'arase par arrosage à raison de 7 à 10 l/m² et compactage par un compacteur à pneu P2 est nécessaire.

Les compacteurs à utiliser sont des vibrants : V3, V4 et V5.

Les graves et sables argileux : B6 (avec IP < 25) :

L'aptitude au compactage à sec dépend de l'importance de la fraction graveleuse dans le matériau. La teneur en eau ne doit pas dépasser 3 à 5 %. La mise en œuvre se fait par couches de 15 à 30 cm. En arase, ce matériau doit recevoir une finition semblable à celle d'un matériau B5.

Les compacteurs à utiliser sont les vibrants V4 et V5.

Les sols grossiers C1 :

Plus la fraction graveleuse est importante, plus facile est le compactage. Un écrêtage des gros éléments est nécessaire pour la mise en œuvre et le compactage. Les teneurs en eau critiques dépendent de l'importance des fines en quantité et en activité. La mise en œuvre se fera par couches de 15 à 30 cm. Une finition en arase peut s'avérer utile éventuellement.

Les compacteurs à utiliser sont les vibrants : V4 et V5

C. Les planches d'essais :

La décision de procéder à un compactage à sec doit être précédée de la réalisation de planches d'essais avec les matériaux et matériels disponibles. Cette planche a pour objectif de définir avec plus de précisions les modalités de compactage présentées ci-dessus (épaisseur des couches , nombre de passes) .

VII.3 – CONTROLE DE COMPACTAGE

a. Les moyens de contrôle de compactage :

Après un compactage à sec, la zone de surface est toujours mal compactée. Le compactage de cette dernière est continué en général à travers la couche supérieure sus-jacente, ceci a pour conséquence :

- Le contrôle du compactage par mesure de la densité moyenne couche par couche, tel qu'il est habituellement pratiqué, n'est pas utilisable.
- Le contrôle par essai de plaque EV2/EV1 à partir de la surface d'une couche, n'est pas utilisable lui aussi.

Cependant, dans le cas où le recours au contrôle de compactage par mesure de densité est nécessaire, il est conseillé de décaper les 10 cm de la couche avant la réalisation de la mesure.

Le recours aux mesures de densité par gamma densimètres à profondeur variable est possible avec les sols autres que C1. Dans ce cas, deux mesures sont réalisées au niveau de chaque point (à 10 cm et à 22,5 cm de la surface). La densité de la couche comprise entre la côte -10 et -22,5 cm est déterminée par la formule :

$$\gamma_{d\ 10}^{22,5} = \frac{22,5 \gamma_{d\ (22,5)} - 10 \gamma_{d\ (10)}}{12,5}$$

Dans tous les cas, le meilleur moyen de contrôle de compactage consiste à vérifier, en continu, le respect des modalités de compactage fixées au niveau des planches d'essais.

b. Spécifications :

En remblai :

La densité moyenne sur toute l'épaisseur de la couche compactée doit atteindre 95 % γ_d OPN. La densité de la partie inférieure de la couche doit atteindre 93 % γ_d OPN.

Au niveau de la couche de forme ou des 40 cm supérieurs situés sous la chaussée :

- La densité moyenne doit être supérieure à 95 % γ_d OPM ou à 100 % γ_d OPN.
- La densité à la partie inférieure doit atteindre 93 % γ_d OPM ou 98 % γ_d OPN.