



LIBRAIRIE AL-MARKAZ
Centre Buidden S.B.A.Y.O. Al Hoceim
Mail : libraiie.almarkaz@gmail.com
T&F ax: 05.39.80.78.25
H 04

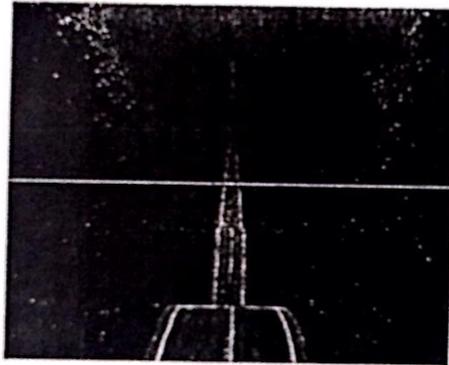


2^{ème} Année Génie Civil (S4)

2017 - 2018

Route II : Drainage et géotechnique routière

Pr. Zakaria TAHRI



Sommaire

- I : Classification des matériaux
- II : Terrassement
- III : Fondation des chaussées
- IV : Drainage

Classification des matériaux

I. Introduction

La réalisation d'un projet routier nécessite une connaissance approfondie du sol afin d'assurer la pérennité des ouvrages à construire.

Un sol est un matériau naturel constitué par des couches compactes ou des grains et par des fluides (air, eau ou gaz).

La norme NF P 11-300 établit une classification de tous les matériaux naturels ou artificiels susceptible de se trouver dans le sol. Elle reprend la classification GTR (Guide Technique Réalisation des remblais et des couches de forme, édité par le LCPC et le Sétra, 1992, 2^{ème} édition en 2000).

La classification repose sur deux critères principaux : la granulométrie et le comportement des éléments fins en présence d'eau.

3

Le GTR dédié plus particulièrement aux travaux de terrassement d'infrastructures routières constitue un document de référence. Ce GTR comporte deux fascicules :

- Fascicule 1 « Principes généraux » très utile à la compréhension de la méthodologie d'ensemble ;
- Fascicule 2 « Annexes techniques » constitue la partie opérationnelle du document dans laquelle on trouve, sous forme de tableaux, les éléments techniques nécessaires à l'étude et à la réalisation d'un projet.

Le GTR propose une :

- I. Classification des sols et des matériaux rocheux ;
- II. Définition des conditions d'utilisation des matériaux en remblai et couche de forme ;
- III. Modalité de compactage des remblais et des couche de forme.

4

II. Définitions

Sols : il s'agit de matériaux naturels, constitués de grains pouvant se séparer aisément par simple trituration ou éventuellement sous l'action d'un courant d'eau. Ces grains peuvent être de dimensions très variables, allant des argiles aux blocs. Ils correspondent aux classes A, B, C et D. Leurs pourcentage de matières organiques est inférieur ou égal à 3%.

Matériaux rocheux : il s'agit de matériaux naturels comportant une structure qui ne peut être désagrégée par simple trituration ou sous l'action d'un courant d'eau; leur utilisation demande une désagrégation mécanique préalable par minage ou emploi d'engin d'extraction de forte puissance. Ils correspondent à la classe R.

Sols organiques : il s'agit de sols ayant un pourcentage de matières organiques supérieur à 3 %. Ils correspondent à la classe F.

Sous-produits industriels : il s'agit de matériaux produits de l'activité humaine, d'origines diverses, pouvant être utilisés en remblais et en couches de forme. Ils correspondent aussi à la classe F.

5

III. Classification des sols

Les paramètres servant à identifier un sol issus d'essais, *in situ*, ou en laboratoire. Ils se classent en trois catégories :

1. Paramètre de nature ;
2. Paramètre de comportement mécanique ;
3. Paramètre d'état hydrique.

Ces paramètres renseignent sur la **granularité**, l'**argilosité**, la **résistance** et l'**état hydrique** du sol :

- Dimension maximale D_{max} des plus gros éléments contenus dans le sol et les tamisât à $80\mu\text{m}$ et 2 mm permettent de distinguer les sols ;
- Indice de plasticité et la valeur au bleu de méthylène du sol permette de caractériser l'argilosité du sol ;
- Paramètres de comportement mécanique (LA ; MDE et FS) sont pris en considération pour distinguer les sols.

6

Les caractéristiques de ces différents paramètres sont déterminées par des essais en laboratoire :

Paramètres	Qualité	Type d'essais
Nature	Granularité	○ Analyse granulométrique
	Argilosité	○ Limite d'Atterberg ○ Essai au bleu de Méthylène
Comportement mécanique		○ Résistance à la fragmentation : Los Angeles ○ Résistance à l'usure : micro Deval en présence d'eau ○ Friabilité : friabilité des sables
Etat hydrate		○ Teneur en eau ○ Essai Proctor ○ Poinçonnement, Indice portant Immédiat

Essais en laboratoire en fonction des matériaux

1. Paramètres de nature

Ce sont des paramètres qui ne varient pas ou peu, ni dans le temps ni au cours de différentes manipulations que subit le sol au cours de sa mise en œuvre. Les paramètres retenus concernent la granularité et l'argilosité.

1.a. Granularité

- Dimension maximale D_{max}

Seuil retenu :

- 50 mm : cette valeur permet de distinguer les sols fins, sableux et graveleux (Classes A, B, D_1 et D_2) des sols grossiers comportant des éléments blocailleux (Classes C et D_3).

Lorsque le matériau comporte des éléments fins et une fraction grossière 50/D non négligeable (Classe C) on distingue deux sous classes selon l'importance de la fraction 0/50 mm :

1. Sous-classe C_1 : matériaux roulés et matériaux anguleux peu charpentés dont la proportion de la fraction 0/50 mm dépasse 60 à 80% ;
2. Sous-classe C_2 : matériaux anguleux très charpentés comportant une proportion de la fraction 0/50 inférieure ou égale 60 à 80%.

Pour tenir compte des caractéristiques de la fraction 0/50 mm, l'identification des sols de la classe C est précisée à l'aide d'un double symbole du type C_1A_i ; C_1B_i ; C_2A_i ou C_2B_i ;

A_i ou B_i étant la classe de la fraction 0/50 mm du matériau considéré.

La valeur du D_{max} peut être indiquée en exposant de la sous classe. $C_1^{150}B_4h$

9

▪ Tamisât à 80 μ m

Ce paramètre permet de distinguer les sols riches en fines, et dans une large mesure, d'évaluer leurs sensibilités à l'eau.

Seuils retenus :

- 35% : seuil au-delà duquel le comportement du sol peut être considéré comme régi par celui de la fraction fine ($\leq 80 \mu\text{m}$) ;
- 12% : seuil permettant d'établir une distinction entre les matériaux sableux et graveleux pauvres ou riches en fines.

▪ Tamisât à 2 mm

Ce paramètre permet d'établir la distinction entre les sols à tendance sableuse et les sols à tendance graveleuse.

Seuil retenu :

- 70% : seuil au-delà duquel on définit les sols à tendance sableuse et en deçà les sols à tendance graveleuse.

10

I.1.1.b. Argilosité

L'argilosité est caractériser par :

1. Indice de plasticité I_p (Norme P 94-051) :

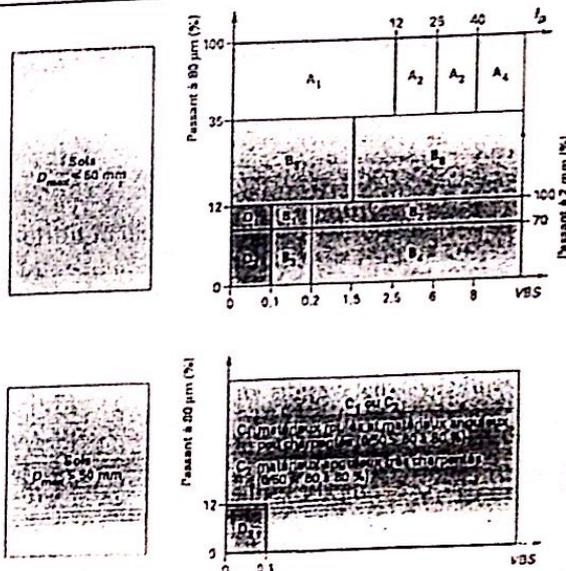
Seuils retenus : 12 ; 25 ; 40

2. Valeur au Bleu de Méthylène VBS (Norme P 94-068) :

Seuils retenus : 0,1 ; 0,2 ; 1,5 ; 2,5 ; 6 ; 8

La Norme NF P 11-300, définit la classification des sols répartis en quatre classes :

Classes	Types de sols
A	Fins
B	Sableux et graveleux avec fines
C	Comportant des fines et des gros éléments
D	insensibles à l'eau



2. Paramètres de comportement mécanique

Pour juger l'utilisation possible des sols en couche de forme, les paramètres de comportement mécanique doivent être pris en considération.

- Ils distinguent les matériaux dont la fraction granulaire est susceptible de résister au trafic des poids lourds ;
- Ils différencient les matériaux qui peuvent être utilisés tels quels dans la construction des couches de forme de ceux qui risquent de se fragmenter en un sol constitué en majorité d'éléments fins, inutilisable dans son état naturel sans traitement.

Ils différencient les matériaux se différencie par le Coefficient de Los Angeles; le Coefficient de Micro-Deval et le Coefficient de Friabilité des Sables.

Seuil retenu :

- 45 : pour les valeurs LA et MDE ;
- 60 : pour les valeurs ~~LA~~ et ~~MDE~~ ;

FD

13

3. Paramètres d'état

Il s'agit des paramètres qui ne sont pas propres au sol, mais liés à son environnement. Le GTR considère cinq états hydriques :

Très humide (th) : état d'humidité très élevé, ne permettant plus en général la réutilisation du sol ;

Humide (h) : état d'humidité élevé autorisant toutefois la réutilisation du sol en prenant des dispositions particulières (aération, traitement, remblais de faible hauteur...);

Humidité moyenne (m) : état d'humidité optimum, minimum de contrainte pour la mise en œuvre;

Sec (s) : état d'humidité faible mais autorisant encore une mise œuvre en prenant des dispositions particulières (arrosage, compactage...);

Très sec (ts) : état d'humidité très faible n'autorisant plus en général la réutilisation du sol.

14

Cet état hydrique du sol est caractérisé par une des trois paramètres suivants :

1. Teneur en eau naturelle W_n de la fraction 0/20 du matériau par rapport à l'optimum Proctor normal W_{OPN} : plus fiable pour caractériser les états *s* et *ts* ;
2. Indice de consistance I_c : caractérise correctement les cinq états mais dans le cas des sols fins moyennement et très argileux comportant au moins 80 à 90% d'éléments $\leq 400 \mu\text{m}$;
3. Indice Portant Immédiat IPI : privilégié pour caractériser les états *h* et *th*.

Classe A : Classification des sols fins

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique	
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état
$d_{\text{max}} \leq 50 \text{ mm}$ et Tamisat à $60 \mu\text{m} > 35\%$	A	$VBS \leq 2,5^{(1)}$ ou $I_p \leq 12$	A₁ Limons peu plastiques, loess, siltés alluvionnaires, sables fins peu pollués, arènes peu plastiques...	$IPI^{(1)} \leq 3$ ou $W_n \geq 1,25 W_{OPN}$	A ₁ th
				$3 < IPI^{(1)} \leq 8$ ou $1,10 \leq W_n < 1,25 W_{OPN}$	A ₁ h
				$8 < IPI \leq 25$ ou $0,9 W_{OPN} \leq W_n < 1,1 W_{OPN}$	A ₁ m
				$0,7 W_{OPN} \leq W_n < 0,9 W_{OPN}$	A ₁ s
				$W_n < 0,7 W_{OPN}$	A ₁ ts
		$12 < I_p \leq 25^{(1)}$ ou $2,5 < VBS \leq 6$	A₂ Sables fins argileux, limons, argiles et marnes peu plastiques arènes...	$IPI^{(1)} \leq 2$ ou $I_c^{(1)} \leq 0,9$ ou $W_n \geq 1,3 W_{OPN}$	A ₂ th
				$2 < IPI^{(1)} \leq 5$ ou $0,9 \leq I_c^{(1)} < 1,05$ ou $1,1 W_{OPN} \leq W_n < 1,3 W_{OPN}$	A ₂ h
				$5 < IPI \leq 15$ ou $1,05 < I_c \leq 1,2$ ou $0,9 W_{OPN} \leq W_n < 1,1 W_{OPN}$	A ₂ m
				$1,2 < I_c \leq 1,4$ ou $0,7 W_{OPN} \leq W_n < 0,9 W_{OPN}$	A ₂ s
				$I_c > 1,3$ ou $W_n < 0,7 W_{OPN}$	A ₂ ts
				$25 < I_p \leq 40^{(1)}$ ou $6 < VBS \leq 8$	A₃ Argiles et argiles marneuses, limons très plastiques...
		$1 < IPI^{(1)} \leq 3$ ou $0,8 \leq I_c^{(1)} < 1$ ou $1,2 W_{OPN} \leq W_n < 1,4 W_{OPN}$	A ₃ h		
		$3 < IPI \leq 10$ ou $1 < I_c \leq 1,15$ ou $0,9 W_{OPN} \leq W_n < 1,2 W_{OPN}$	A ₃ m		
		$1,15 < I_c \leq 1,3$ ou $0,7 W_{OPN} \leq W_n < 0,9 W_{OPN}$	A ₃ s		
		$I_c > 1,3$ ou $W_n < 0,7 W_{OPN}$	A ₃ ts		
		$I_p > 40^{(1)}$ ou $VBS > 8$	A₄ Argiles et argiles marneuses, très plastiques...	Valeurs seuils des paramètres d'état, à définir à l'appui d'une étude spécifique	
A ₄ th					
A ₄ h					
A ₄ s					

Classe C : Classification des sols comportant des fines et des gros éléments

Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique et le comportement																											
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature																												
D _{max} > 50 mm et tamisat à 80 μm > 12% ou si le tamisat à 80 μm ≤ 12% la VBS est > 0,1	C	Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm > 60 à 80% et matériaux roulés. La fraction 0/50 est un sol de classe A	C₁A₁ Argiles à silex, éboulis, moraines, alluvions grossières...	Le sous-classement, en fonction de l'état hydrique et du comportement des sols de cette classe, s'établit en considérant celui de leur fraction 0/50 mm qui peut être un sol de la classe A ou de la classe B • 1 ^{er} exemple : un sol désigné C ₁ A ₂ h est un sol qui est : ○ soit entièrement roulé, ○ soit entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction 0/50 représente plus de 60 à 80% de la totalité du matériau. Dans les deux cas, sa fraction 0/50 mm appartient à la classe A ₂ avec un état hydrique h. • 2 ^{ème} exemple : un sol désigné C ₁ B ₄ 2m est un sol qui est : ○ entièrement ou partiellement anguleux; sa fraction 0/50 mm représente moins de 60 à 80% de la totalité du matériau. La fraction 0/50 mm est un sol de la classe B ₄ se trouvant dans un état hydrique m. Les différents sous-classes composant la classe C sont :																											
		Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm > 60 à 80% et matériaux roulés. La fraction 0/50 est un sol de classe B	C₁B₁ Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, moraines, alluvions grossières...																												
		Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%. La fraction 0/50 est un sol de classe A	C₂A₁ Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...																												
		Matériaux anguleux comportant une fraction 0/50 mm ≤ 60 à 80%. La fraction 0/50 est un sol de classe B	C₂B₁ Argiles à silex, argiles à meulière, éboulis, biefs à silex...																												
				<table border="1"> <tr> <td>C₁A₁</td> <td>C₁A₂</td> <td>C₁A₃</td> <td>C₁A₄</td> <td>C₂A₁</td> <td>C₂A₂</td> <td>C₂A₃</td> <td>C₂A₄</td> <td>Etat th, h, m, s ou ts</td> </tr> <tr> <td>C₁B₁₁</td> <td>C₁B₁₂</td> <td>C₁B₂₁</td> <td>C₁B₂₂</td> <td>C₂B₁₁</td> <td>C₂B₁₂</td> <td>C₂B₂₁</td> <td>C₂B₂₂</td> <td>Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique</td> </tr> <tr> <td>C₁B₃₁</td> <td>C₁B₃₂</td> <td>C₁B₄₁</td> <td>C₁B₄₂</td> <td>C₂B₃₁</td> <td>C₂B₃₂</td> <td>C₂B₄₁</td> <td>C₂B₄₂</td> <td>Etat th, h, m, s ou ts</td> </tr> </table>	C ₁ A ₁	C ₁ A ₂	C ₁ A ₃	C ₁ A ₄	C ₂ A ₁	C ₂ A ₂	C ₂ A ₃	C ₂ A ₄	Etat th, h, m, s ou ts	C ₁ B ₁₁	C ₁ B ₁₂	C ₁ B ₂₁	C ₁ B ₂₂	C ₂ B ₁₁	C ₂ B ₁₂	C ₂ B ₂₁	C ₂ B ₂₂	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique	C ₁ B ₃₁	C ₁ B ₃₂	C ₁ B ₄₁	C ₁ B ₄₂	C ₂ B ₃₁	C ₂ B ₃₂	C ₂ B ₄₁	C ₂ B ₄₂	Etat th, h, m, s ou ts
C ₁ A ₁	C ₁ A ₂	C ₁ A ₃	C ₁ A ₄	C ₂ A ₁	C ₂ A ₂	C ₂ A ₃	C ₂ A ₄	Etat th, h, m, s ou ts																							
C ₁ B ₁₁	C ₁ B ₁₂	C ₁ B ₂₁	C ₁ B ₂₂	C ₂ B ₁₁	C ₂ B ₁₂	C ₂ B ₂₁	C ₂ B ₂₂	Matériaux généralement insensibles à l'état hydrique																							
C ₁ B ₃₁	C ₁ B ₃₂	C ₁ B ₄₁	C ₁ B ₄₂	C ₂ B ₃₁	C ₂ B ₃₂	C ₂ B ₄₁	C ₂ B ₄₂	Etat th, h, m, s ou ts																							

19

Classe D : Classification des sols insensible à l'eau

CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS				CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME		
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Valeurs seuils retenues		Sous classe
VBS ≤ 0,1 et tamisat à 80 μm ≤ 12%	D	D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm > 70%	D ₁ Sables alluvionnaires propres, sables de dune...	FS ≤ 60	D ₁₁	
				FS > 60	D ₁₂	
		D _{max} ≤ 50 mm et tamisat à 2 mm ≤ 70%	D ₂ Graves alluvionnaires propres, sables...	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₂₁	
				LA > 45 et MDE > 45	D ₂₂	
		D _{max} > 50 mm	D ₃ Graves alluvionnaires grossières propres, dépôts glaciaires,...	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	D ₃₁	
				LA > 45 et MDE > 45	D ₃₂	

20

Classe B : Classification des sols sableux ou graveleux, avec fines

CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS								
CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME								
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement		
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	Paramètres de comportement	Sous classe fonction du comportement	
Dmax ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm ≤ 35%	B Sols sableux et graveleux avec fines	tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2	B₁ Sables siliceux...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		FS ≤ 60	B ₁₁	
						FS > 60	B ₁₂	
				IPI ⁽¹⁾ ≤ 4 ou w _n ≥ 1,25 w _{OPN}		B ₂ th	FS ≤ 60	B ₂₁ th
						B ₂ h	FS > 60	B ₂₂ th
				4 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 8 ou 1,10 w _{OPN} ≤ w _n < 1,25 w _{OPN}		B ₂ m	FS ≤ 60	B ₂₁ m
						B ₂ s	FS > 60	B ₂₂ m
		0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,10 w _{OPN}		B ₂ ts	FS ≤ 60	B ₂₁ ts		
				B ₂ th	FS > 60	B ₂₂ ts		
		0,5 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}		B ₂ th	FS ≤ 60	B ₂₁ th		
				B ₂ h	FS > 60	B ₂₂ th		
		w _n < 0,5 w _{OPN}		B ₂ m	FS ≤ 60	B ₂₁ m		
				B ₂ s	FS > 60	B ₂₂ m		
tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm > 70% 0,1 ≤ VBS ≤ 0,2		B₃ Gravés siliceux...	Matériaux généralement insensibles à l'eau		LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₃₁		
					LA > 45 et MDE > 45	B ₃₂		

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

17

Classe B (suite)

CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES REMBLAIS									
CLASSIFICATION A UTILISER POUR LES COUCHES DE FORME									
Classement selon la nature				Classement selon l'état hydrique		Classement selon le comportement			
Paramètres de nature Premier niveau de classification	Classe	Paramètres de nature Deuxième niveau de classification	Sous classe fonction de la nature	Paramètres d'état	Sous classe fonction de l'état	Paramètres de comportement	Sous classe fonction du comportement		
Dmax ≤ 50 mm et Tamisat à 80 μm ≤ 35%	B Sols sableux et graveleux avec fines	tamisat à 80 μm ≤ 12% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS > 0,2	B₄ Gravés argileux (peu argileux)...	IPI ⁽¹⁾ ≤ 7 ou w _n ≥ 1,25 w _{OPN}		B ₄ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ th	
						B ₄ h	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ th	
				7 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 15 ou 1,10 w _{OPN} ≤ w _n < 1,25 w _{OPN}		B ₄ h	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ h	
						B ₄ m	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ h	
				0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,10 w _{OPN}		B ₄ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ m	
						B ₄ s	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ m	
				0,6 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}		B ₄ s	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ s	
						B ₄ ts	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ s	
				w _n < 0,6 w _{OPN}		B ₄ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₄₁ ts	
						B ₄ th	LA > 45 et MDE > 45	B ₄₂ ts	
				IPI ⁽¹⁾ ≤ 5 ou w _n ≥ 1,25 w _{OPN}		B ₅ th	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ th	
						B ₅ h	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ th	
		5 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 12 ou 1,1 w _{OPN} ≤ w _n < 1,25 w _{OPN}		B ₅ h	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ h			
				B ₅ m	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ h			
		12 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 30 ou 0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,10 w _{OPN}		B ₅ m	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ m			
				B ₅ s	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ m			
		0,6 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN}		B ₅ s	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ s			
				B ₅ ts	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ s			
		w _n < 0,6 w _{OPN}		B ₅ ts	LA ≤ 45 et MDE ≤ 45	B ₅₁ ts			
				B ₅ th	LA > 45 et MDE > 45	B ₅₂ ts			
		tamisat à 80 μm compris entre 12 et 35% tamisat à 2 mm ≤ 70% VBS < 1,5 ⁽¹⁾ ou I _p ≤ 12		B₆ Sables et gravés argileux à très argileux	IPI ⁽¹⁾ ≤ 4 ou w _n ≥ 1,3 w _{OPN} ou I _p ≤ 0,8		B ₆ th		
					4 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 10 ou 0,8 < I _p ≤ 1 ou 1,1 w _{OPN} ≤ w _n < 1,3 w _{OPN}		B ₆ h		
							B ₆ m		
					10 < IPI ⁽¹⁾ ≤ 25 ou 1 < I _p ≤ 1,2 ou 0,9 w _{OPN} ≤ w _n < 1,1 w _{OPN}		B ₆ m		
B ₆ s									
0,7 w _{OPN} ≤ w _n < 0,9 w _{OPN} ou 1,2 < I _p ≤ 1,3					B ₆ s				
		B ₆ ts							
w _n < 0,7 w _{OPN} ou I _p > 1,3		B ₆ ts							
		B ₆ th							

⁽¹⁾ Paramètres dont le choix est à privilégier

18

III. Classification des matériaux rocheux (Classe R)

Pour son emploi en remblai ou en couche de forme, la classification des matériaux rocheux s'effectue sur la base de :

1. Paramètre de la nature pétrographique de la roche ;
2. Paramètre d'état et de comportement mécaniques.

1. Paramètre de la nature pétrographique de la roche :

Deux classes principales de matériaux rocheux sont distinguées :

- a. Matériaux rocheux issus des roches sédimentaires : la classification est subdivisée suivant les principales natures des roches rencontrées dans cette catégorie. Cette subdivision s'avère indispensable, car les matériaux issus de chacune des roches précitées présentent des comportements différents dans leur utilisation en remblai et en couche de forme ;
- b. matériaux rocheux issus des roches magmatiques et métamorphiques : aucune subdivision complémentaire n'a été introduite, ces matériaux pouvant être considérés comme ayant des comportements voisins du point de vue de leur utilisation en remblai et en couche de forme.

Matériaux rocheux	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Grès	R ₁
			Calcaires	R ₂
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pâtes ...	R ₃
		Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches ...	R ₄
		Roches salines	Sal gemme, gypse	R ₅
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granitos, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardaisiers ...		R ₆

2. Paramètre d'état et de comportement mécaniques :

Les paramètres d'état et de comportement mécanique retenus dans la classification des matériaux rocheux sont :

- Coefficient Los Angeles et Coefficient Micro-Deval : ces deux paramètres sont introduits pour les roches relativement dures. Leur interprétation vise essentiellement les possibilités d'emploi de ces matériaux en couche de forme ;
- Masse volumique déshydratée en place ρ_d (Norme P 94-064) : présente l'avantage d'être aisément mesurable et en corrélation étroite avec la fragmentabilité des matériaux. Son interprétation vise essentiellement les possibilités d'emploi de ces matériaux en remblai.
- Coefficient de fragmentabilité FR (Norme P 94-066) : son interprétation vise les possibilités d'emploi en remblai des matériaux rocheux évolutifs et en couche de forme de certains matériaux rocheux plus ou moins friables pour lesquels les coefficients LA, MDE manquent de sensibilité.

23

- Coefficient de dégradabilité DG (Norme P 94-067) : son interprétation vise essentiellement les possibilités d'emploi en remblai des matériaux issus de roches argileuses (marnes, schistes sédimentaires...).
- Teneur en eau naturelle W_n (Norme NF P 94-050) : l'influence de ce paramètre n'est prise en compte dans la classification que pour certaines craies et roches argileuses très fragmentables.
- Teneur en éléments solubles (% NaCl, gypse...) : l'interprétation de ce paramètre est évidemment limitée au cas des roches salines.

24

Matériaux rocheux

Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique et le comportement			
Nature pétrographique de la roche		Caractères principaux	Paramètres et valeurs seuils retenus	Sous-classe		
Roches sédimentaires	Roches carbonatées	<p>R₁ Crâie</p> <p>La crâie est un empilement de particules de calcite dont les dimensions sont de l'ordre de 1 à 10µm. Cet empilement constitue une structure d'autant plus fragile que la porosité est grande (ou inversement que la densité stœchiométrique est faible). Les mesures et constatations de chantier ont montré qu'au cours des opérations de terrassement, il y a formation d'une quantité de fines en relation directe avec la fragilité de l'empilement. Lorsque la crâie se trouve dans un état saturé ou proche de la saturation, l'eau contenue dans les pores se communique aux fines produites, leur conférant le comportement d'une pâte, qui s'étend rapidement à l'ensemble du matériau, empêchant la circulation des engins et générant des pressions interstitielles dans les ouvrages.</p> <p>Inversement, lorsque la teneur en eau est faible, la crâie devient un matériau rigide, très portant mais difficile à compacter. Enfin, certaines crâies peu denses et très humides, peuvent continuer à se fragmenter, après mise en œuvre, sous l'effet des contraintes mécaniques et du gel, principalement.</p>	pd > 1,7	crâie dense	R ₁₁	
			1,5 < pd ≤ 1,7 et w _u ≤ 27		crâie de densité moyenne	R _{12h}
			1,5 < pd ≤ 1,7 et 22 ≤ w < 27			R _{12m}
			1,5 < pd ≤ 1,7 et 18 ≤ w < 22			R _{12s}
			1,5 < pd ≤ 1,7 et w _u < 19	crâie peu dense	R _{13s}	
			pd ≤ 1,5 et w _u ≤ 31		R _{14th}	
			pd ≤ 1,5 et 26 ≤ w _u < 31		R _{14h}	
			pd ≤ 1,5 et 21 ≤ w _u < 26		R _{14m}	
			pd ≤ 1,5 et 16 ≤ w _u < 21		R _{14s}	
			pd ≤ 1,5 et w _u < 16		R _{15s}	
Roches sédimentaires	Calcaires rocheux durs	<p>R₂</p> <p>Cette classe regroupe l'ensemble de la gamme des matériaux calcaires rocheux. Leurs caractéristiques prédominantes, vis-à-vis de leur utilisation dans des remblais ou des couches de forme, sont la friabilité et éventuellement pour les plus fragmentables d'entre eux, la gravité. D'une manière générale, ces matériaux ne sont pas des matériaux rocheux évolués et ne posent pas de problèmes particuliers dans leur emploi en remblai. En couche de forme, leur friabilité peut conduire, par attrition ou désagrégation, à la formation de fines pouvant conférer à l'ensemble du matériau un comportement sensible à l'eau sous circulation des engins.</p>	MDE ≤ 45	calcaire dur	R ₂₁	
			MDE > 45 et pd > 1,8	calcaire de densité moyenne	R ₂₂	
			pd ≤ 1,8	calcaire fragmentable	R ₂₃	

25

Matériaux rocheux

Classement selon la nature			Classement selon l'état hydrique et le comportement			
Nature pétrographique de la roche		Caractères principaux	Paramètres et valeurs seuils retenus	Sous-classe		
Roches sédimentaires	Roches argileuses	<p>R₃</p> <p>Marnes Schistes micacés Argiles Pellées</p> <p>Les matériaux de cette classe se caractérisent par le fait qu'ils possèdent une structure (le plus souvent carbonatée) plus ou moins résistante, dans laquelle sont emprisonnés, en proportion très variable (entre 5 et 25% d'après ce qui est généralement admis), des minéraux argileux susceptibles d'être gonflants. Ils se fragmentent plus ou moins à la mise en œuvre en libérant des fines, plastiques et sensibles à l'eau. La destruction de leur structure peut se poursuivre après la mise en œuvre sous l'action des contraintes mécaniques de l'eau et du gel. Cette évolution se produit d'autant plus, que les matériaux ont été moins fragmentés à la mise en œuvre, et que la granulométrie obtenue à ce stade est homogénéisée.</p> <p>Pour les plus fragmentables d'entre eux (classe R₃₁) il convient de caractériser l'état de leur fraction 0/50 mm.</p>	FR ≤ 7 et DG > 20	Roches argileuses peu fragmentables, très fragmentables, très déformables	R ₃₁	
			FR ≤ 7 et 5 < DG ≤ 20		R ₃₂	
			FR ≤ 7 et DG ≤ 5		R ₃₃	
			FR > 7 et $\begin{cases} w_u \leq 13 w_{cl} \\ \text{ou } IP1 \leq 7 \end{cases}$		Roches argileuses peu fragmentables, très déformables	R ₃₄
			FR > 7 et $\begin{cases} 11 w_u \leq w \leq 13 w_u \\ \text{ou } 2 \leq IP1 \leq 5 \end{cases}$			R _{35h}
			FR > 7 et 0,9 w _{cl,u} ≤ w _u < 1,1 w _{cl,u}			R _{35m}
			FR > 7 et 0,7 w _{cl,u} ≤ w _u < 0,9 w _{cl,u}			R _{35a}
			FR > 7 et w _u < 0,7 w _{cl,u}			R _{35s}
			FR > 7 et MDE ≤ 45			Roches siliceuses dures
			LA > 15 ou MDE > 45 et FR ≤ 7		Roches siliceuses de densité moyenne	R ₄₂
FR > 7	Roches siliceuses fragmentables	R ₄₃				
Roches salines	Roches salines	<p>R₅</p> <p>Gypse Sel gemme Anhydrite</p> <p>Du point de vue mécanique, les matériaux de cette classe s'apparentent à ceux des classes R₁ et R₂, mais en outre ils sont plus ou moins solubles dans l'eau et induisant, de ce fait, dans les ouvrages, des risques de désordre qui seront d'autant plus grands que :</p> <ul style="list-style-type: none"> - la solubilité du sel soluble est grande. - sa proportion contenue dans l'ensemble d'un matériau est élevée. - la fragilité à la mise en œuvre est faible (grande perméabilité de l'ouvrage). 	teneur en sel soluble ≤ 5 à 10% dans le cas du sel gemme* ≤ 30 à 50% dans le cas du gypse*	Roches salines peu solubles	R ₅₁	
			teneur en sel soluble > 5 à 10% dans le cas du sel gemme* > 30 à 50% dans le cas du gypse*	Roches salines très solubles	R ₅₂	

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

26

Matériaux rocheux

Classement selon la nature		Classement selon le comportement							
Nature pétrographique de la roche		Caractères principaux	Paramètres et valeurs seuils retenus						
Roches magmatiques et métamorphiques	R_1 Granite, basalte, trachyte, andésite... Gneiss, schistes métamorphiques, schistes ardouisiens...	Les matériaux entrant dans cette classe peuvent avoir des caractéristiques mécaniques très différentes; en particulier, leur fragmentabilité et leur friabilité peuvent varier très largement (de faible à très élevée). Les matériaux de la classe R_1 et la majorité de ceux de la classe R_2 ne s'altèrent pas au sein des ouvrages, sous l'effet des contraintes mécaniques et de l'eau; mais en revanche, ceux de la classe R_3 ont un comportement voisin des classes R_4 ou R_5 .	$LA \leq 45$ et $MDE \leq 45$						
			$LA > 45$ ou $MDE > 45$ et $FR \leq 7$						
			$FR > 7$						
			<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="text-align: center;">Roches magmatiques et métamorphiques dures</td> <td style="text-align: center;">R_1</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Roches magmatiques et métamorphiques de dureté moyenne</td> <td style="text-align: center;">R_2</td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Roches magmatiques et métamorphiques fragmentables ou altérables</td> <td style="text-align: center;">R_3</td> </tr> </table>	Roches magmatiques et métamorphiques dures	R_1	Roches magmatiques et métamorphiques de dureté moyenne	R_2	Roches magmatiques et métamorphiques fragmentables ou altérables	R_3
Roches magmatiques et métamorphiques dures	R_1								
Roches magmatiques et métamorphiques de dureté moyenne	R_2								
Roches magmatiques et métamorphiques fragmentables ou altérables	R_3								

27

Les caractéristiques de ces différents paramètres sont déterminées par des essais en laboratoire :

Paramètres	Qualité	Type d'essais
Nature	Granularité	○ Analyse granulométrique
	Argilosité	○ Limite d'Atterberg ○ Essai au bleu
Comportement mécanique	Sols	○ Résistance à la fragmentation : Los Angeles ○ Résistance à l'usure : micro Deval en présence d'eau ○ Friabilité : friabilité des sables
	Roches	○ Résistance à la fragmentation : fragmentabilité ○ Résistance à l'usure : dégradabilité ○ Autres essais : Los Angeles, micro Deval en présence d'eau, friabilité des sables
Etat hydrique		○ Teneur en eau ○ Essai Proctor ○ Poinçonnement, Indice portant Immédiat

Essais en laboratoire en fonction des matériaux

28

4. Classification des sols organiques et sous-produits industriels

Cette catégorie concerne des matériaux particuliers dont l'emploi en remblai et en couche de forme peut dans certains cas se révéler intéressant du point de vue technique et économique, à condition de ne pas nuire l'environnement.

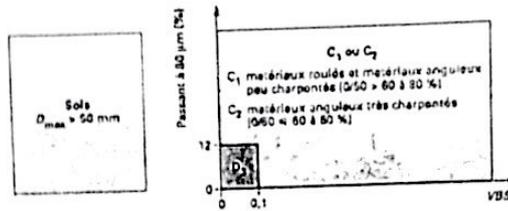
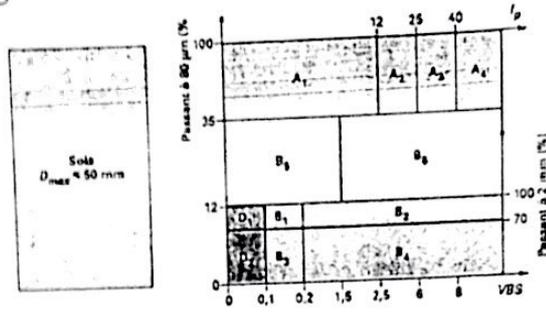
Le GTR dénombre neuf familles (sous-classes F1 à F9), chacune d'elles est caractérisée par le (ou les) paramètres (s) duquel (ou desquels) dépendent les possibilités d'emploi.

29

Famille de matériaux	Symbole	Paramètres considérés comme significatifs vis-à-vis du réemploi
Matériaux naturels renfermant des matières organiques	F1	Teneur en matières organiques puis examen de leurs caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols A, B ou C.
Cendres volantes silico-alumineuses	F2	Rapport entre leur teneur en eau naturelle et leur teneur en eau optimum Proctor normal et valeur de l'IP1 à la teneur en eau naturelle.
Schistes houillers	F3	Taux de combustion et examen de leurs caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols A, B, C, D ou aux matériaux rocheux.
Schistes des mines de potasse	F4	Teneur en NaCl et pour ceux à faible teneur, examen de leurs caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols A, B ou C.
Phosphogypse	F5	Mode d'obtention comportant ou non une neutralisation à la chaux, examen de la granulométrie et de la teneur en eau.
Mâchefers d'incinération d'ordures ménagères	F6	Taux d'imbrulés et d'éléments solubles, qualité du déferrailage, du criblage et de l'homogénéisation, durée du stockage, présence ou non de cendres volantes de combustion.
.. Matériaux de démolition	F7	Qualité du déferrailage et de l'homogénéisation, présence d'éléments indésirables (plâtres, bois...), granulométrie.
Laitiers de hauts-fourneaux	F8	Caractéristiques géotechniques de manière analogue aux sols B, C, D, ou aux matériaux rocheux.
Autres sous-produits industriels	F9	Paramètres à définir à l'appui d'une étude spécifique.

30

La classification fait l'objet de la norme NF 11-300. Elle sépare l'ensemble des matériaux en trois grandes catégories :



Matériaux rocheux	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Crails	R ₁
			Calcaires	R ₂
		Roches argileuses	Marnes, argilles, pozzolanes	R ₃
		Roches siliceuses	Gres, pozzingues, trachytes	R ₄
	Roches salines	Sel gemme, gypse	R ₅	
Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardouaisiens		R ₆	
Matériaux particuliers	Sols organiques et sous-produits industriels			F

Terrassement

Les travaux de terrassement regroupent l'ensemble des travaux de mouvements et de mise en forme de terre dans le cadre de la réalisation d'infrastructure, aussi bien pour les bâtiment que pour les routes. Les terrassement généraux ont pour but de créer des plateformes sur lesquelles seront réalisées des routes.

Les travaux de terrassement se décomposent en quatre phases : les **travaux de préparation**, **l'extraction**, **le transport** et **la mise en œuvre**

Il faut distinguer deux cas:

- o la **création** d'une route : l'intervention est réalisée sur un sol naturel ;
- o la **reconstruction** d'une route : il s'agit d'intervention sur des couches plus ou moins homogènes de matériaux à traiter, à conserver ou à mettre en décharge.

32

I. Travaux de terrassement

1. Travaux de préparation :

Ces travaux consiste à préparer le terrain puis à implanter le terrassement. L'implantation est une phase à réaliser avec rigueur. Elle se fonde sur des plans précisant le contour de la fouille, les profondeurs du terrassement, etc...

2. Extraction

Les méthodes d'extraction diffèrent selon la nature et les difficultés d'exécution de ces travaux d'extraction :

- o Pour les sols meubles, l'engin le plus couramment utilisé est la pelle hydraulique ;
- o Pour les sols très compacts ou rocheux, le recours à des matériels spéciaux (brise roche, etc...) est nécessaire car le matériaux ne peut plus extrait directement ;
- o Sur des chaussées existantes, les différentes couches peuvent être rabotées.

Les matériaux extraits sont ensuite emportés :

- o Soit en décharge ;
- o Soit directement sur un autre chantier en tant que matériaux en remblai ;
- o Pour recyclage après traitement mécanique ou tri

33

3. Transport

Le transport des matériaux est une nuisance et il doit être maîtrisé. Les véhicules utilisés seront différents en termes de taille ou de charge utile si le chantier est en rase campagne ou s'il est en milieu urbain contraint.

Les distances de transport ont tendance à s'allonger en raison de trouver des emprunts (remblais) et des dépôts, d'autant que la réutilisation du matériaux est privilégiée au détriment de la réduction du transports.

4. Mise en œuvre

À l'issu d'une phase d'étude permettant de définir les conditions d'utilisation du matériau en remblai, celui-ci est mis en œuvre en trois étapes :

- Apport des terres de remblai au moyen d'une décapeuse, d'une chargeuse ou d'un engin de transport ;
- Réglage au moyen d'une niveleuse, en couche plus ou moins épaisses (de 0,2 à 0,50 m) selon la nature du matériau, son état et les condition atmosphérique ;
- Compactage avec un compacteur dont les caractéristiques sont adaptées au type de remblai.

Phases	Création d'une chaussée	Reconstruction de chaussée en zone rurale
Préparation	Implantation Décapage	Analyse de l'existant : traitement <i>in situ</i> ?
Extraction	En fonction du matériaux : Pelle hydraulique Brise-roche Traitement de sol	En fonction du matériaux : Traitement en phase Pelle hydraulique Brise-roche Rabotage
Transport	Stockage Évacuation Réutilisation	Évacuation en décharge ou sur plateforme de traitement
Mise en œuvre	Mécanique : engins de chantier de grande et moyenne taille	Mécanique : engins de chantier de grande et moyenne taille

Étapes de travaux de terrassement

II. Remblai

On appelle remblais les matériaux destinés à élever le niveau altimétrique du sol jusqu'à celui requis pour construire les structures d'une chaussée.

Le présent cours se limite aux remblais destinés à supporter une chaussée et ses ouvrages annexes. Il ne concerne pas, notamment, les remblais destinées à supporter des dallages, des bâtiments, des ouvrages d'art et des pistes d'aviation.

Les remblais peuvent provenir du site des travaux (déblais mis en remblais) ou d'un lieu d'emprunt extérieur (carrière, déblais excédentaires sur un autre site).

Quelle que soit son origine, les matériaux destinés au remblais doivent être identifiées ; en effet, si la plupart des matériaux conviennent à cet usage, certains sont impropres en raison de leurs caractéristiques physiques ou chimiques. Par exemple, les matériaux contenant des matières organiques ou certains déchets ne conviennent pas. Les matériaux dont les caractéristiques mécaniques sont très faibles (Ex. tourbe) sont à exclure et ceux qui évoluent dans le temps (Ex. craie) ou en présence d'eau (Ex. matériaux argileux) nécessitent des conditions de mise en œuvre particulières ou des traitements à la chaux ou aux liants hydrauliques. Le comportement des matériaux en présence d'eau est un critère déterminant pour l'utilisation des remblais.

36

1. Règles d'utilisation des matériaux en remblai

La classification fait l'objet de la norme NF 11-300. Elle sépare l'ensemble des matériaux en trois grandes catégories : les **sols meubles** (classe A, B, C et D), les **matériaux rocheux** (classe R) et les **matériaux organiques et sous-produits industriels** (classe F).

Les règles d'utilisation des matériaux en remblai sont données par le Sêtra sous forme de tableaux composés de cinq colonnes pour chaque classe et sous classe de sol en fonction de l'**état hydrique** : très humide (th), humide (h), moyen (m), sec et très sec (ts).

Pour chaque classe ou sous-classe de matériaux définie dans la classification, les tableaux des conditions d'utilisation des matériaux en remblai indiquent les conditions de mise en œuvre à respecter en fonction de la situation météorologique constatée au moment où le matériau est mis en remblai.

37

Composition des tableaux relatifs aux règles d'utilisation des matériaux en remblai

N° de colonne	Indication	Observations
1	Cas envisagé, défini par : la classe la sous-classe l'état du matériau	Lorsque cet état est caractérisé par la teneur en eau, il s'agit de l'état hydrique constaté à l'extraction. Cet état hydrique peut être plus ou moins modifié au moment de la mise en remblai suivant la situation météorologique du moment et suivant la technique de mise en œuvre adoptée.
2	Observations générales sur le comportement du matériau considéré.	Elle contribuent à la justification technique des conditions d'utilisation proposées.
3	Situation météorologique durant la mise en remblai. Pour chaque cas, les différentes situations météorologiques pouvant se présenter sont envisagées. Elles sont représentés par des symboles (++, +, =, -) exprimant le sens de la variation de la teneur en eau en fonction de la situation météorologique.	Ces symboles ne correspondent pas à des seuils quantifiables, il revient au géotechniciens du chantier de caractériser cette situation en fonction non seulement de pluie mais également du vent, de la température et du sol lui-même.

38

N° de colonne	Indication	observations
4	Conditions d'utilisation	Ces conditions s'appliquent au cas de matériau indiqué dans la première colonne dans l'hypothèse de la situation météorologique portée dans la troisième colonne. Dans certains cas plusieurs solutions sont proposées et elles sont alors désignées par un titre soulignant l'aspect caractéristique de la solution. L'ordre de la présentation n'implique cependant pas entre elles de priorité ou de hiérarchie.
5	Codes correspondants aux différentes conditions d'utilisation.	E G W T R C H

- E* : Extraction ;
- G* : Action sur la granularité ;
- W* : Action sur la teneur en eau ;
- T* : Traitement ;
- R* : Régalage ;
- C* : Compactage ;
- H* : Hauteur des remblais.

39

Les symboles représentant les différentes situations météorologiques sont :

- ++ : Situation météorologique a pour effet d'**accroître la teneur en eau** du matériau de manière **brutale et imprévisible**. Ce cas est traduit dans les tableaux par l'expression "pluie forte";
- + : Situation météorologique a pour effet d'**accroître la teneur en eau** du matériau de manière **lente et relativement prévisible**. Ce cas est traduit dans les tableaux par l'expression "pluie faible";
- = : Situation météorologique **n'a pas d'action sensible sur la teneur en eau** du matériau considéré. Ce cas est traduit dans les tableaux par l'expression "ni pluie - ni évaporation importante";
- : Situation météorologique a pour effet de **diminuer la teneur en eau** du matériau ; il s'agit toujours d'une diminution qui peut être considérée comme **relativement prévisible** sous les climats. Ce cas est traduit dans les tableaux par l'expression "évaporation importante".

40

Rubrique E : Extraction

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

1. **Extraction en couche** : d'épaisseur de l'ordre de 0,1 à 0,3m, permet une bonne fragmentation et un tri relatif des différentes couches de matériaux. Elle a la particularité d'exposer au maximum les sols aux agents atmosphériques, ce qui selon les cas peut-être un effet recherché ou au contraire contre-indiqué ;
2. **Extraction frontale** (front de taille > 1 à 2 m) : se caractérise évidemment par des effets exactement opposés. Elle offre en plus la possibilité dans les formations stratifiées, de sélectionner le niveau présentant la meilleure portance pour le réserver à la circulation des engins de transport.

41

Rubrique G : Action sur la granularité

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

1. **Élimination des éléments > 800 mm** : cette valeur constitue une limite maximum des blocs admissibles dans le corps d'un remblai compte tenu des performances des compacteurs les plus puissants actuellement.
2. **Élimination des éléments > 250 mm** : cette valeur constitue la dimension maximale des blocs permettant un malaxage du sol avec un agent de traitement.
3. **Fragmentation complémentaire après extraction** : cette modalité s'applique aux matériaux rocheux évolutifs. L'objectif recherché est d'obtenir un matériau ayant à la fois un D_{max} compatible avec les compacteurs utilisés et une courbe granulométrique la plus étalée possible de manière à prévenir au maximum ses possibilités d'évolution à long terme.

Rubrique W : Action sur la teneur en eau

Il s'agit des différentes mesures pouvant être prescrites pour modifier l'état hydrique des matériaux. Les actions envisagées sont :

1. **Réduction de la teneur en eau par aération** : lorsque les conditions météorologiques sont favorables ;
2. **Essorage par mise en dépôt provisoire** ;
3. **Arrosage pour maintien de l'état hydrique de matériau** : durant la mise en œuvre lorsque les conditions météorologiques sont évaporantes ;
4. **Humidification pour changer d'état** : opération délicate qui exige de grandes quantités d'eau et le recours à un brassage ou un malaxage pour la faire pénétrer au sein du matériau.

Rubrique T : Traitement

Cette rubrique concerne les actions de traitement des matériaux avec de la chaux ou d'autres réactifs (ciments, cendres volantes, laitiers, ...). Les actions envisagées sont :

1. **Traitement avec un réactif ou un additif adaptés ;**
2. **Traitement à la chaux seule.**

Des indications détaillées sur les conditions d'exécution des traitements de matériau en vue de leur utilisation en remblai seront fournis dans le document technique SETRA-LCPC "Traitement des sols à la chaux et/ou aux liants hydrauliques" GTS.

44

Rubrique R : Régalage

Sous cette rubrique est donnée une indication sur l'épaisseur des couches élémentaires à mettre en œuvre (indication approximative). Les actions envisagées sont :

1. **Couche mince : épaisseur de 20 à 30 cm ;**
2. **Couche moyenne : épaisseur de 30 à 50 cm.**

Ces actions permettent de :

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

L'épaisseur maximale des couches élémentaires est définie par l'épaisseur de compactage possible sur le matériau envisagé avec le compacteur utilisé. Ces valeurs sont indiquées dans les tableaux de compactage.

45

Rubrique C : Compactage

Trois niveaux d'énergie sont distingués :

1. **Faible ;**
2. **Moyen ;**
3. **Intense.**

- ✓ Des tableaux donnés dans le *GTR* fournissent les données quantitatives répondant précisément au cas de chantier considéré (couple matériau – compacteur).
- ✓ Le code 0 n'existe pas pour la rubrique compactage.
- ✓ Un compactage faible implique :
 - Un niveau de compactage précis à appliquer ;
 - Des contraintes de chantier particulières, telles que l'interdiction aux engins de transport de circuler sur les ouvrages en cours de la construction.

46

Rubrique H : Hauteur des remblais

Les possibilités d'utilisation des matériaux sont en fonction de la hauteur du remblai.

Certaines conditions de mise en œuvre, qui sont acceptables pour des remblais de faible hauteur, ne doivent pas être employées pour des remblais plus élevés car elles introduiraient des risques excessifs du point de vue du tassement ou de la stabilité du corps de remblai.

On considère que les :

1. **Remblai de hauteur faible ($\leq 5\text{m}$) ;**
2. **Remblai de hauteur moyenne ($\leq 10\text{m}$).**

47

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

48

Tableau des conditions d'utilisation d'un matériau en remblai : Sol B_{2m} et B_{2s})

Sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en remblai	Code							
				E	G	W	T	R	C	H	
B _{2m}	Ces sols sont très sensibles à la situation météorologique	+	pluie faible	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON						
		=	ni pluie, ni évaporation importante	C : compactage moyen	0	0	0	0	0	2	0
		-	évaporation importante	Solution 1 : utilisation en l'état C : compactage intense	0	0	0	0	0	1	0
				Solution 2 : arrosage W : arrosage pour maintien de l'état C : compactage moyen	0	0	3	0	0	2	0
B _{2s}	Pour ces sols, il faut compenser l'insuffisance de la teneur en eau par un compactage intense, un arrosage ou une humidification. L'humidification dans la masse pour changer l'état est relativement facile à réaliser	**	pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON						
		+	pluie faible	E : extraction en couche R : couches minces C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne ($\leq 10m$)	1	0	0	0	1	1	2
		=	ni pluie, ni évaporation importante	Solution 1 : utilisation en l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne ($\leq 10m$)	0	0	0	0	0	1	2
				Solution 2 : humidification W : humidification pour changer d'état R : couches minces C : compactage moyen	0	0	4	0	1	2	0
		-	évaporation importante	Solution 1 : arrosage W : arrosage pour maintien de l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne ($\leq 10m$)	0	0	3	0	0	1	2
				Solution 2 : humidification W : humidification pour changer d'état R : couches minces C : compactage moyen	0	0	4	0	1	2	0

III. Contrôle de la mise en œuvre des remblais

Le projet de réalisation de remblais sera toujours accompagné d'un examen ou d'une étude du sous-sol; il faut vérifier l'absence d'anomalies géologique (failles ou cavités et couches compressibles profondes, telles que la tourbe ou l'argile), susceptible d'être à l'origine de désordres ultérieurs importants.

La qualité d'un remblais est caractérisée par sa compacité, qui peut être contrôlé par référence à des valeurs connues. Les contrôles des remblais sont à deux types :

1. **Contrôle direct** : consiste à mesurer la densité du sol, soit avec un :

- **densimètre à membrane** : une quantité de matériau extraite en place est séchée puis pesée ; son volume est ensuite évalué par la quantité d'eau entrant dans la membrane ;
- **gammadensimètre** : mesurant l'absorption du rayonnement γ de la matière en fonction de sa densité. L'absorption est d'autant plus importante que la densité est grande (l'absorption du rayonnement γ et la sa densité sont liée par un abaque).

2. **Contrôle indirect** : contrôler de réception des remblais, qui comprend la mesure de portance de la plate-forme ainsi réalisée, au moyen d'essais à la plaque ou à la dynaplaque et d'essais pénétrométriques sur la hauteur totale des remblais.

50

Contrôle de l'énergie apporter au sol

Cette méthode de contrôle interne (en continue) permet de s'assurer que la valeur du rapport entre le volume de sol compacté pendant le temps t et la surface balayée par le compacteur pendant le même temps $t(Q/S)$ correspond à la classe du terrain à compacter et au type de compacteur utilisé.

Des tableaux données dans le *GTR* permettent de connaître, en fonction de ces deux paramètres, la valeurs du rapport Q/S , exprimé en m .

Exemple : A_1

Energie compacteur litre	Code 2	Q/S (m)															
		0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
V	1	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
N	2	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
Q/L		1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
Energie compacteur moyens	Code 3	Q/S (m)															
		0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
V	1	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
N	2	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
Q/L		1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0
Energie compacteur norme	Code 1	Q/S (m)															
		0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25	0,26	0,27	0,28	0,29	0,30
V	1	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
N	2	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
Q/L		1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,0

Q/S (m)
 e (m)
 V (km/h)
 N -
 Q/L (m³/h.m)
 compacteur ru
 compacteur ch

51

Fondations des chaussées

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

La conception de la couche de forme requiert une réflexion renouvelée à chaque chantier, afin de tenir compte à la fois des objectifs et des conditions de réalisation des travaux.

Le dimensionnement de la couche de forme est une étape fondamentale d'un projet de la route. C'est elle qui supporte la chaussée et qui doit assurer des performances mécaniques de façon durable (y compris en période de gel ou d'intempéries).

5.

I. Conception de la couche de forme

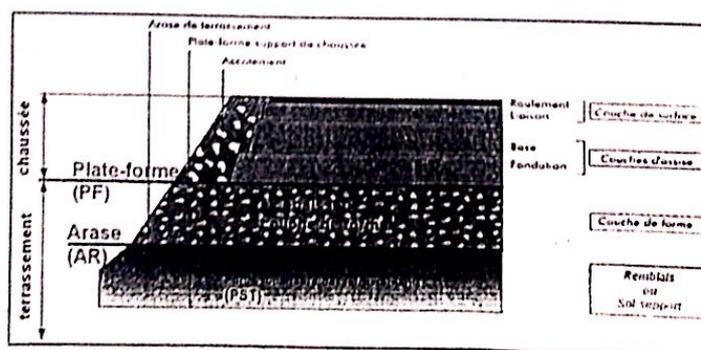
1. Définition, nature et rôle de la couche de forme

La structure de chaussée est constituée des éléments suivants :

- **Partie terrassement** : partie supérieure du terrassement (sol support) et la couche de forme ;
- **Structure de la chaussée** : couche d'assise et couche de surface.

Deux plateformes se superposent :

- **Arase terrassement AR** : correspond au nivellement du sol support ;
- **Plate-forme Support de chaussée** : correspond à la surface supérieure de la couche de forme qui reçoit la couche de la chaussée.



5.

Selon la nature du chantier (le sol, le climat, le trafic), la couche de forme peut être :

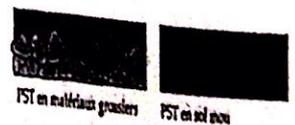
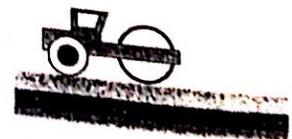
- Inexistante car inutile lorsque les matériaux constituant le remblai ou le sol en place ont eux-mêmes les qualités requises ;
- Limitée à l'apport d'une seule couche d'un matériau ayant les caractéristiques nécessaires (cas traditionnel) ;
- Constituée d'une superposition de couches de matériaux différents répondant à des fonctions distinctes, incluant par exemple un géotextile (anticontaminant), des matériaux grossiers, une couche de réglage, etc.

54

Le rôle de la couche de forme est d'assurer selon le cas de chantier l'ensemble ou certaines des fonctions à court et long terme.

À court terme :

- Assurer la circulation (**traficabilité**) des engins de chantier dans les bonnes conditions ;
- Assurer **portance suffisante**, compte tenu en particulier des aléas météorologiques, pour une exécution correcte du compactage des couches de chaussées ;
- Assurer un **nivellement** de la plate-forme support de chaussée permettant de réaliser la couche de fondation dans les tolérances d'épaisseur fixées ;
- **Protection** de l'arasement vis-à-vis des agents climatiques dans l'attente de la réalisation de la chaussée.



55

À long terme :

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

56

2. Critères à satisfaire

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

Pour que la couche de forme puisse être exécutée de manière satisfaisante, il est nécessaire que l'orniérage de l'arase terrassement soit limité, ce qui amène à rechercher à ce niveau la portance minimale à court terme :

Portance minimale du sol support avant la mise en œuvre des couches de forme	
Type de couche de forme	Module EV2 (MPa)
Couche de forme en matériaux traités	35
Couche de forme en matériaux granulaires	15 à 20

57

b. Pour la réalisation des couches de chaussée

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

- 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 œuvre des couches de chaussée doit être telle que :

EV2*	> 50 MPa
Ou déflexion**	< 2 mm

* Module EV2 déterminé à la plaque, ou le module équivalent à la dynaplaque ;

** Déflexion relevée au deflectographe Lacroix ou à la poutre Benkelman sous essieu de 13 tonnes.

58

II. Matériaux en couche de forme

Pour être employé en couche de forme, un matériau doit satisfaire à quatre critères :

1. Insensibilité à l'eau :

Le matériau de couche de forme doit avoir des caractéristiques mécaniques indépendantes de son état hydrique, soit à l'état naturel, soit par une modification appropriée, de manière à garantir :

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

Les sols traités restent souvent sensibles à l'eau au jeune âge. Le choix du liant et de son dosage doivent en tenir compte.

59

b. Pour la réalisation des couches de chaussée

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

- 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 œuvre des couches de chaussée doit être telle que :

EV2*	> 50 MPa
Ou déflexion**	< 2 mm

- * Module EV2 déterminé à la plaque, ou le module équivalent à la dynaplaque ;
- ** Déflexion relevée au deflectographe Lacroix ou à la poutre Benkelman sous essieu de 13 tonnes.

II. Matériaux en couche de forme

Pour être employé en couche de forme, un matériau doit satisfaire à quatre critères :

1. Insensibilité à l'eau :
2. Dimension maximale des éléments :
3. Résistance au trafic de chantier :
4. Insensibilité au gel

1. Insensibilité à l'eau :

Le matériau de couche de forme doit avoir des caractéristiques mécaniques indépendantes de son état hydrique, soit à l'état naturel, soit par une modification appropriée, de manière à garantir :

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

Les sols traités restent souvent sensibles à l'eau à jeune âge. Le choix du liant et de son dosage doivent en tenir compte.

2. Dimension maximale des éléments :

La dimension des plus gros éléments doit permettre d'assurer un nivellement de la plate-forme dans les tolérances requises, en général ± 3 cm, et le cas échéant, un malaxage intime avec les produits de traitement.

61

3. Résistance au trafic de chantier :

Un matériau non traité de couche de forme, doit être :

- suffisamment résistant à la fragmentation et à l'attrition pour ne pas donner lieu, sous l'effet du compactage et du trafic, à la formation d'éléments fins en surface qui le rendraient sensible à l'eau.
- suffisamment résistant aux efforts tangentiels transmis par les pneumatiques pour éviter tout risque d'enlèvement (problèmes rencontrés surtout avec les matériaux granulaires homométriques roulés).

4. Insensibilité au gel

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

- Dégradation des roches et des matériaux traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques par "gélifraction" ;
- Gonflement au gel des sols par "cryosuccion".

62

III. Conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme

On peut ne pas toujours trouver sur le chantier, ou à proximité du chantier, des matériaux qui conviennent naturellement à un emploi en couches de forme. Afin de limiter les emprunts et les dépôts et de réduire les distances de transport, une amélioration des sols disponibles sera envisagée par une ou plusieurs techniques. Les règles d'utilisation des matériaux sont données sous forme de tableaux composés de six colonnes :

- Les quatre premières colonnes sont identiques à celles relatives aux conditions d'utilisation des matériaux en remblais ;
- Dans la cinquième colonne figure les codes correspondant aux différentes conditions d'utilisation :
 - Action sur la granularité (G) ;
 - Action sur la teneur en eau (W) ;
 - Traitement (T) ;
 - Protection superficielle (S).
- La sixième colonne présente les épaisseurs des couches de forme à mettre en œuvre en fonction du niveau de portance de la plateforme support de chaussée.

63

1. Techniques de préparation et de protection des matériaux pour emploi en couche de forme

Action sur la granularité (G)

Elles peuvent viser soit à éliminer la fraction fine sensible à l'eau, mais l'opération est alors délicate et coûteuse, soit à éliminer la fraction grossière qui gêne une mise en œuvre correcte.

On retient en général les dimensions maximales suivantes :

- 50 mm pour les matériaux devant être malaxés avec des produits de traitement ;
- 60 à 80 mm pour les matériaux granulaires concassés non traités ;
- 100 mm pour les matériaux granulaires roulés non traités.

Action sur la teneur en eau (W)

Elles visent à amener le sol à une teneur en eau aussi voisine que possible de la teneur en eau de l'optimum Proctor normal. Elles consistent en un arrosage pour maintenir la teneur en eau durant le malaxage ou le compactage, ou en humidification de masse.

64

Traitement (T)

Un simple ajout de chaux et/ou de ciment, elle permet :

- d'améliorer la traficabilité du terrain ;
- de rendre les plateformes de terrassement et de couche de forme plus rigides et insensibles aux intempéries ;
- de mieux planifier les travaux (réduire les aléas dus aux intempéries).

Le traitement peut être réalisé :

- à la chaux seule, pour les sols argileux et très argileux ;
- au ciment seul (ou matériau hydraulique équivalent) pour les sols peu ou pas argileux ;
- à la chaux et au ciment dans le cas des sols moyennement argileux.

65

✓ Action de la chaux

La chaux agit selon deux mécanismes :

- diminution de la teneur en eau (réaction chimique d'hydratation de la chaux) ;
- Amélioration des propriétés géotechniques des sols contenant une quantité d'argile importante par effet de floculation.

✓ Action des ciments

Le ciment crée des liaisons entre les grains. Il permet d'obtenir un squelette rigide et d'assurer la portance du support. Ce type de traitement est essentiellement utilisé pour obtenir un développement rapide et durable des caractéristiques mécaniques des sols fins (à moyen et long termes).

Afin de stabiliser un sol très humide, on réalise d'abord un traitement à la chaux, qui ramène le sol à son état hydrique optimal, puis on le traite au ciment afin d'améliorer rapidement les propriétés géotechniques.

66

✓ Mise en œuvre

Le traitement de la chaux et au ciment s'effectue en plusieurs phases :

- Épandage de la chaux ;
- Malaxage, afin d'obtenir une bonne aération du terrain sur toute l'épaisseur de la couche à traiter, en une ou plusieurs passes suivant la cohésion du sol ;
- Épandage du ciment ;
- Malaxage ;
- Arrosage éventuelle ;
- Compactage et réglage.

67

□ Protection superficielle (S)

La plupart des matériaux utilisés en couche de forme requièrent une protection de surface dont le rôle principal est le suivant :

✓ **Matériau traité à la chaux ou aux liants hydrauliques :**

- maintenir un état hydrique constant durant la période de prise et de durcissement ;
- Permettre l'accrochage de la couche de chaussée ;

✓ **Matériau non traité :**

- Garantir l'exigence de nivellement ;
- Donner une résistance suffisante aux efforts tangentiels engendrés par les pneus des engins.

Cette protection est généralement réalisée sous forme d'un enduit de cure à l'émulsion de bitume éventuellement gravillonné ou clouté.

68

Techniques de préparation et de protection des matériaux pour emploi en couche de forme

Rubrique	Code	Conditions d'utilisation
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 l'état hydrique
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
	6	Traitement avec 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

IV. Dimensionnement de la couche de forme

1. Portance

Classes des plateformes :

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

Les PF sont classées suivant la capacité de la couche de forme à supporter les charges qui lui transmises. Le GTR distingue 4 classes de portance des PF en fonction du module de déformation EV2.

Le module minimal de la classe de PF est la valeur utilisée dans le dimensionnement de la structure de chaussée.

	20	50	120	200
Module de calcul (MPa)				
Classe de plate-forme	PF1	PF2	PF3	PF4

Classe de l'arases

Les arases sont définis pour des portances maximales de 120 MPa. Au-delà de cette portance, l'arase serait elle-même capable de servir de support à la chaussée, rendant inutile la mise en œuvre d'une couche de forme. L'arase deviendrait alors plateforme.

Module de déformation (MPa)	20	50	120	200
Classe de l'arase terrassement	AR1	AR2	AR3	AR4

71

2. Démarche pour fixer l'épaisseur

L'épaisseur de la couche de forme est déterminée au terme de la démarche suivante :

- La PST est classé en fonction du classement géotechnique du sol et des conditions hydriques , 7 catégories de PST sont distinguées, notées de PST n° 0 à PST n° 6 ;
- À chaque PST est associée une ou deux classes de portance à long terme de l'Arase Terrassement ARi.
- Pour chaque PST et pour les différents matériaux de couche de forme une épaisseur de couche de forme préconisé.

Remarque :

- Lorsque la couche de forme a au moins l'épaisseur préconisée, la classe de la plate-forme est indiquée dans les tableaux selon la PST et la nature de la couche de forme.
- Si l'épaisseur de la couche de forme est inférieure à la valeur préconisée, la classe de la plate-forme à retenir est celle de la classe de l'Arase Terrassement.

72.

Les différents cas de Partie Supérieure des Terrassements (PST)

Cas de P.S.T	Schéma	Description	Classe de farase	Commentaires
P.S.T. n°0		Sols A, B ₁ , B ₂ , B ₃ , B ₄ , C se trouvant dans un état hydrique (h). Contexte Zones tourbeuses, marécageuses ou inondables. PST dont la portance risque d'être quasi nulle au moment de la réalisation de la chaussée ou au cours de la vie de l'ouvrage.	AR0	La solution de franchissement de ces zones doit être recherchée par une opération de terrassement (purge, substitution) et/ou de drainage (fossez profonds, rabattement de la nappe...) de manière à pouvoir reclasser le nouveau support obtenu au moins en classe AR1.
P.S.T. n°1		Sols Matériaux des classes A, B ₁ , B ₂ , B ₃ , B ₄ , C, R ₁ , R ₂ , R ₃ et certains matériaux C ₁ , R ₁ et R ₂ dans un état hydrique (h). Contexte PST en matériaux sensibles de mauvaise portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A) et sans possibilité d'amélioration à long terme (B).	AR1	Dans ce cas de PST, il convient - soit de procéder à une amélioration du matériel jusqu'à 0,5 m de profondeur par un traitement principalement à la chaux vive et selon une technique remblai. On est ramené au cas de PST 2, 3 ou 4 selon le contexte - soit d'exécuter une couche de forme en matériau granulaire insensible à l'eau de forte épaisseur (en admettant une légère réduction si l'on intercale un géotextile anticontaminant à l'interface PST - couche de forme).
P.S.T. n°2		Sols Matériaux des classes A, B ₁ , B ₂ , B ₃ , B ₄ , C, R ₁ , R ₂ , R ₃ et certains matériaux C ₁ , R ₁ et R ₂ dans un état hydrique (h). Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A). Cette portance peut cependant chuter à long terme sous l'action des infiltrations des eaux pluviales et d'une remontée de la nappe (B).	AR1	Bien que les exigences requises à court terme pour la plate-forme support puissent être éventuellement obtenues au niveau de l'arase, elles (surtout) ne sont pas toujours nécessaires de prévoir à l'état initial une couche de forme. Si on peut réaliser un nivellement de la nappe à une profondeur suffisante, on est ramené au cas de PST 3.
P.S.T. n°3		Sols Mêmes matériaux que dans le cas de PST 2. Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A) mais pouvant chuter à long terme sous l'action de l'infiltration des eaux pluviales (B).	AR1 AR2	En l'absence de mesures de drainage à la base de la chaussée et d'imperméabilisation de l'arase, même situation que celle décrite dans le cas PST 2 Classement en AR2 si des dispositions constructives de drainage à la base de la chaussée et d'imperméabilisation de l'arase permettent d'évacuer les eaux et d'éviter leur infiltration dans la PST.

P.S.T. n°4		Sols Mêmes matériaux qu'en PST 1 sous réserve que la granulométrie permette le traitement. Contexte PST en matériaux sensibles à l'eau (en remblai ou rapportés en fond de déblai hors nappe) améliorés à la chaux ou aux liants hydrauliques selon une technique "remblai" et sur une épaisseur de 0,30 à 0,50 m. L'action du traitement est cependant durable.	AR2	La portance de l'arase peut être localement élevée mais la dispersion n'autorise pas un classement supérieur. La décision de réalisation d'une couche de forme sur cette PST dépend du projet et des valeurs de portance de l'arase mesurées à court terme (après prise de liant).
P.S.T. n°5		Sols B ₄ et D ₄ et certains matériaux rocheux de la classe R ₄ . Contexte PST en matériaux sableux fins insensibles à l'eau, hors nappe, posant des problèmes de trafic au sé.	AR2 AR3	La portance de l'arase de cette PST dépend beaucoup de la nature des matériaux. Classement en AR3 si le module EV2 de l'arase est supérieur à 120 MPa. Les valeurs de portance à long terme peuvent être très inférieures aux valeurs mesurées à court terme. La nécessité d'une couche de forme sur cette PST est imposable pour satisfaire les exigences de traficabilité.
P.S.T. n°6		Sols Matériaux des classes D ₄ , R ₁ , R ₂ , R ₃ , R ₄ , R ₅ , R ₆ , R ₇ , R ₈ ainsi que certains matériaux C ₁ , R ₁ , R ₂ et R ₃ . Contexte PST en matériaux graveleux ou rocheux insensibles à l'eau mais posant des problèmes de réglage et/ou de traficabilité.	AR3 AR4	Classement en AR3 si EV2 ≥ 120 MPa et en AR4 si EV2 ≥ 200 MPa. Les valeurs de portance à long terme peuvent être assimilées aux valeurs mesurées à court terme. La nécessité d'une couche de forme ne s'impose que pour les exigences à court terme (nivellement et traficabilité) et peut donc se réduire à une couche de fin réglage.

(A) Comportement de la PST à la mise en œuvre de la couche de forme
(B) Situation pendant la "phase de construction" de la chaussée.

Tableaux des conditions d'utilisation en couche de forme pour les différentes classes de matériaux

Case	Observations générales	Situation météorologique		Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS	Épaisseur préconisée de la couche de forme (en m.) et classe PF de la plateforme support de la classe				
						PST n°1	PST n°2	PST n°3	PST n°4	
						AR 1	AR 1	AR 1	AR 2	AR 2
B ₃₁	Ces sols insensibles à l'eau (*) et constitués par des granulats résistants peuvent être utilisés en couche de forme : - soit dans leur état naturel, - soit traités avec un liant hydraulique. Ils se traitent en place et en centrale (*) On considère ici les sols de la classe B ₃ dont l'insensibilité à l'eau est confirmée.	++	pluie même forte	Utilisation en l'état	0 0 0 0	e = 0,75 ou (2) e = 0,6 PF2	e = 0,5 ou (2) e = 0,4 PF2	e = 0,4 ou (2) e = 0,3 PF2	e = 0,3 ou (2) e = 0,2 PF2	(3)
		= ou -	pas de pluie	Solution 1 Utilisation en l'état Solution 2 W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 1 1 1			e = 0,35	e = 0,35	e = 0,35
B ₃₂	Ces sols insensibles à l'eau (*) sont constitués par des granulats friables qui sous l'action du trafic pourraient se transformer en éléments fins (fillers) sensibles à l'eau. Pour cette raison leur emploi en couche de forme impose de les traiter avec un liant hydraulique. Ces sols se traitent en place ou en centrale. (*) On considère ici les sols de la classe B ₃ dont l'insensibilité à l'eau est confirmée.	+	pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON	(1)				
		= ou -	pas de pluie	W : Arrosage pour maintien de l'état hydrique T : Traitement avec un liant hydraulique S : Application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0 1 1 1		PF2	PF2	PF3	PF3

- (1) Sur cette PST, la mise en œuvre d'un matériau traité répondant à une qualité 'couche de forme' n'est pas réalisable. Procéder d'abord à un traitement selon une technique 'remblai' et se rapporter alors au cas de PST n°4 si l'effet du traitement est durable et aux cas de PST n°2 ou 3 s'il ne l'est pas.
 (2) Si intercalation d'un géotextile à l'interface PST-couche de forme.
 (3) Dans le cas de la PST n°4, une couche de forme conduisant à une PF2 peut se limiter à une couche de protection superficielle de quelques centimètres d'épaisseur de ce matériau. Celle-ci peut même être inutile si l'on a prévu la possibilité d'éliminer par rabotage les 5 à 10 cm supérieurs de la PST. Elle peut également être remplacée par un enduit de cure gravillonné ou éventuellement clouté, appliqué directement sur l'arase terrassement.

V. Sous-couches

Le rôle de la sous couche est de constituer, dans certains cas particulier, un écran entre les matériaux mis en œuvre dans les terrassements et ceux qui sont employées en couche de fondation (ou en couche de base si la couche de fondation est supprimée). On distingue deux types de sous couches :

1. Sous-couche anti-contaminante

Elle a comme but d'empêcher la pénétration d'un matériau de plateforme fin à travers les vide d'une couche de fondation à structure ouverte. Sa granularité doit respecter le règle de filters vis-à-vis du sol :

$$D_{15} < 5 d_{85}$$

D_{15} : maille du tamis qui laisse passer 15% des matériaux du sol de la sous-couche ;

d_{85} : maille du tamis qui laisse passer 85% des matériaux du sol de forme.

2. Sous-couche drainante et anti-capillaire

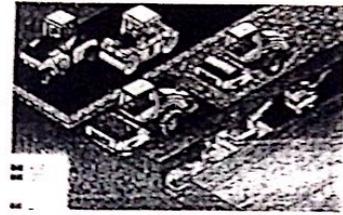
Elle a le double but d'assurer un drainage efficace des couches de chaussée et d'arrêter les remontées capillaires au niveau de la forme des terrassements (zone marécageuse ou nappes phréatiques peu profondes).

La sous-couche drainante et anti-capillaire est généralement constituée de sable grossier et de gravier, mais d'autres matériaux peuvent également être employés avec succès (scories pouzzolaniques, mâchfer, etc.).

La sous-couche et parfois la couche de forme peuvent être remplacées par des additifs de structure tels que textiles tissés ou non tissés.

Comptage des remblais et des couches de forme

Compactage

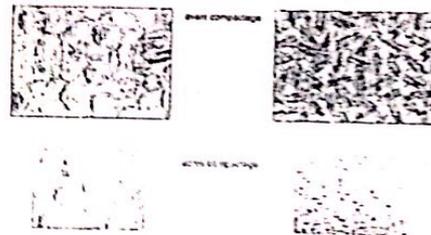


I. Objectif du comptage

Le compactage est une opération qui consiste à augmenter rapidement la densité d'un matériaux, afin qu'elle n'évolue pas dans le temps. Son objectif est d'éviter les tassements et d'améliorer les caractéristiques mécaniques.

Le comptage permet de :

- Faire glisser les grains les uns sur les autres dans un meilleur agencement ;
- Éliminer l'eau excédentaire ;
- Comprimé l'air enfermé dans le sol.

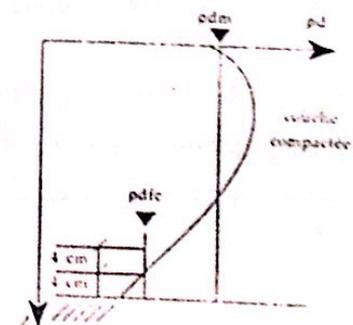


Ces objectifs sont atteints lorsque la masse volumique sèche moyenne de la couche est :

- $\rho_{dm} \geq 95\%$ OPN pour un remblai ;
- $\rho_{dm} \geq 98,5\%$ OPN pour une couche de forme.

Avec la mise en œuvre par couche et les matériaux actuels, sur chantier, l'expérience montre que :

Le profil de la masse volumique sèche ρ_d varie au sein de la couche compactée suivant une loi du gradient : $\rho_d = f(Z)$



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

ρ_{dm} : masse volumique sèche moyenne sur toute l'épaisseur de la couche compactée ;

ρ_{dfc} : masse volumique sèche en fond de couche c.-à-d. la valeur moyenne sur une tranche de 8 cm d'épaisseur située à la partie inférieure de la couche compactée.

q₃ : Objectif de densification pour le compactage des couches de forme, et il lui correspond les deux conditions suivantes :

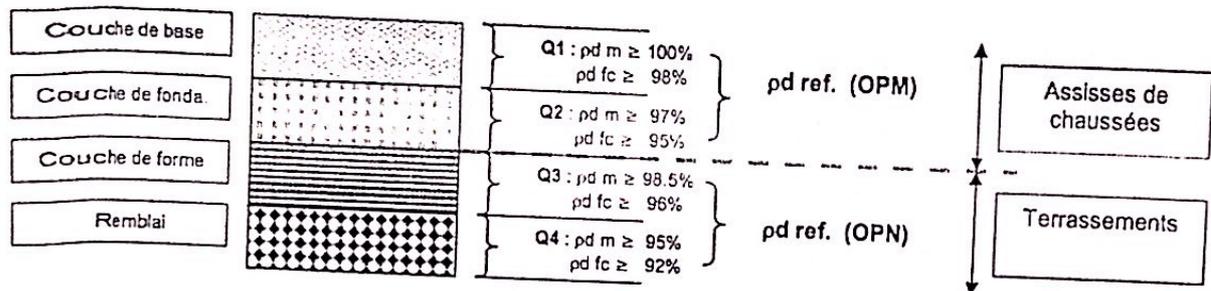
$$\rho_{dm} \geq 98,5\% \rho_{d \text{ OPN}}$$

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

q₄ : Objectif de densification pour le compactage des remblais, et il lui correspond les deux conditions suivantes :

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

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



80

Les facteurs influençant le compactage sont :

- le matériau tel que défini par la classification ;
- le matériel de compactage utilisé ;
- l'épaisseur compactée ;
- l'objectif de compactage.

Les tableaux de compactage pour l'utilisation des matériaux en remblais et en couche de forme donnés par le GTR précisent les conditions qui assurent la cohérence entre ces facteurs définissant le compactage.

II. Matériels de compacteurs

Classification et utilisation

- Les définitions et classifications des compacteurs font l'objet de la norme NF P 98-736 ;
- Les compacteurs pris en compte ont une largeur supérieure ou égale à 1,30m ;
- À l'intérieur d'une même famille, le numéro de la classe croît avec l'efficacité du compacteur.

Les différentes classes d'engins de compactage sont :

1. Compacteurs à pneu (Pi)

Le classement est fait selon la charge par roue CR :

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

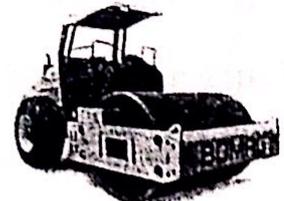


Vitesse maxi 6 km/h

Vitesse moyenne de travail entre 3,5 et 5 km/h

2. Compacteurs vibrants à cylindre lisse (Vt)

Le classement est effectué à partir du paramètre $(M_1/L) \cdot \sqrt{A_0}$, et d'une valeur minimale pour A_0 :



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

- M_1/L : charge M appliquée par largeur de cylindre L, en kg/cm ;
- A_0 : amplitude de la vibration à vide, en mm.

Vitesse maxi 12 km/h

Vitesse moyenne de travail entre 3 et 5 km/h

3. Compacteurs vibrants à pieds dameurs VPi

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

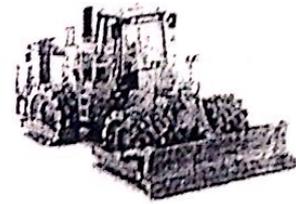


VP1 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 15 et 25 supérieur à 25	et $A0 \geq 0,6$ et $A0$ entre 0,6 et 0,8
VP2 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 25 et 40 supérieur à 40	et $A0 \geq 0,8$ et $A0$ entre 0,8 et 1,0
VP3 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 40 et 55 supérieur à 55	et $A0 \geq 1,0$ et $A0$ entre 1,0 et 1,3
VP4 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	{ entre 55 et 70 supérieur à 70	et $A0 \geq 1,3$ et $A0$ entre 1,3 et 1,6
VP5 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$	supérieur à 70	et $A0 \geq 1,6$

4. Compacteurs statiques à pieds dameurs SPi

Le classement est fait selon le paramètre $(M1/L)$:

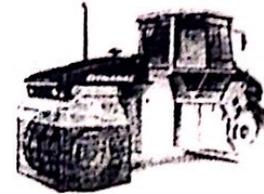
- o SP1 : $M1/L$ entre 30 et 60 kg/cm ;
- o SP2 : $M1/L$ supérieur à 60 kg/cm et inférieur à 90 kg/cm



$M1/L$: charge statique moyenne par unité de largeur du ou des cylindres à pieds

5. Compacteurs mixtes

Ils sont constitués d'un cylindre vibrant et d'un train de pneus.



On les considère comme la somme d'un compacteur vibrant monocylindre et d'un compacteur à pneus. Ces compacteurs sont désignés $VXi - Pj$.

Exemple : Un compacteur mixte pouvant être considéré comme la somme d'un compacteur vibrant monocylindre de la classe V3 et d'un rouleau à pneus de la classe P1.

6. Compacteurs à plaques vibrantes

Elles sont classées à partir de la pression statique sous la semelle Mg/S exprimée en kPa (Mg représente le poids de la plaque).

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

Les plus petites plaques PQ1 et PQ2 ne sont pas prises en compte.



III. Règles de compactage

1. Nombre de passe n et nombre d'application de la charge N :

Une passe est par définition un aller ou un retour de compacteur, avec :

- o n : nombre de passes ;
 - o N : nombre d'applications de charge.
- Compacteurs monocylindres et compacteurs à pneus : $N = n$;
 - Compacteur Tandem longitudinal : une passe constitue deux applications de charge $n = N/2$.

La valeur N indiquée dans les tableaux correspond au cas de la mise en œuvre à l'épaisseur maximale e, et est calculée par le rapport (arrondi à l'entier supérieur) :

$$N = \frac{e}{Q/S}$$

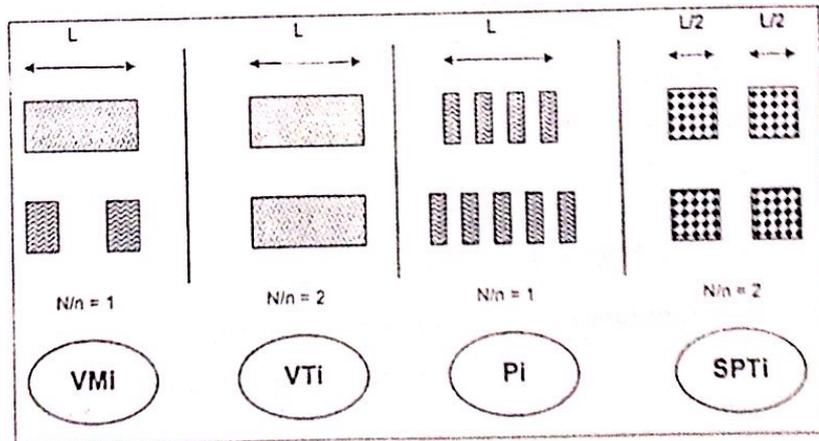
Pour une épaisseur inférieure à l'épaisseur maximale, N est calculée par l'expression :

$$N = \frac{e \text{ réelle compactée}}{Q/S}$$

86

2. Largeur de compactage L

Elle correspond à la largeur compactée.



Pour $N/n=2$, le recouvrement doit être total entre essieu AV et AR.

5. Epaisseur compactée

La valeur d'épaisseur compactée indiquée est une valeur maximale : l'épaisseur réelle doit lui être inférieure ou égale.

87

3. Débit par unité de largeur de compactage Q/L

Il correspond au débit théorique qu'aurait un compacteur monocylindre ($n = N$) d'un mètre de largeur, en respectant les prescriptions de Q/S, e, et V.

$$Q/L = 1000 \times (Q/S) \times V$$

Q/L en $m^3/h.m$; Q/S en m et V en km/h

Si les conditions d'utilisation sont différentes de celles du tableau, la valeur Q/L doit être recalculer. Elle permet de prévoir le débit pratique attendu pour un compacteur, donné par :

$$Q_{pratique} = k \times (Q/L) \times L \times (N/n)$$

Le coefficient de rendement k peut être estimé entre 0,5 et 0,75 suivant les chantiers (le rapport entre le temps utile de compactage et le temps de présence du compacteur sur chantier.

88

4. Paramètre Q/S

- Q : volume de sol compacté pendant un temps donné (ex : un jour, ou une heure).
- S : surface balayée par le compacteur pendant le même temps.

D'un point de vue pratique, la valeur de Q/S représente l'épaisseur d'un matériau donné que peut compacter un compacteur donné en une application de charge pour obtenir la compacité recherchée.

Interprétation : Trois énergies de compactage

- Énergies de compactage intense (code 1) et moyenne (code 2) : la valeur de Q/S indiquée est une valeur maximale. Le Q/S réel doit être inférieur ou égal au Q/S indiqué dans le tableau ;
- Énergie de compactage faible (code 3) : la valeur de Q/S réel doit être proche du Q/S indiqué dans les tableaux ($\pm 20\%$ 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.
- Dans les tableaux de compactage, les valeurs de Q/S diminuent lorsque l'intensité de compactage exigée est plus grande.

89

6. Vitesse de translation

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

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

91

IV. Exemples d'application

* Sol B₁ en sable x

Modalités		Compacteur P1	
code 2	Q/S	0,060	
	e	0,35	
	V	5,0	
	N	6	
	Q/L	300	

Q/S : Valeur constante quel que soit le choix d'épaisseur (en m)

e : réel compacté \leq e (en m)

V : Vitesse maximale pour les vibrants et la vitesse moyenne pour les autres matériels

N : Nombre d'applications de charge : arrondi supérieur de $e_{\text{réel}}/(Q/S)$, donné pour e tableau

Q/L : Débit par mètre de largeur

Modalités		Compacteur V3	
code 2	Q/S	0,135	
	e	0,3	0,8
	V	5,0	2,0
	N	3	6
	Q/L	675	270

▪ Même règles de calcul que précédemment dans chaque colonne

▪ Si l'épaisseur nominale prévue pour le chantier (e_{chantier}) est comprise entre les deux épaisseurs, les conditions optimales de comptage sont :

↳ Vitesse moyenne du compacteur vibrant :

$$V = (V_{\text{minimale}} \times e_{\text{maximale}}) / e_{\text{chantier}}$$

↳ $Q/L = 1000 \times V \times Q/S$

↳ N est toujours égale à : $N = e_{\text{chantier}} / (Q/S)$

Tableau de compactage pour l'utilisation des matériaux en remblai

A₁, C₁, A₁(*)

Compacteur		P1	P2	P3	V1	V2	V3	V4	V5	VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	SP1	SP2	PC3	PC4	
Modèles																			
Energie de compactage faible	Q/S	0 080	0 120	0 180	0 055	0 085	0 125	0 165	0 205	0 055	0 085	0 165	0 205	0 265	0 070	0 100		0 065	
	e	0.30	0.45	0.60	0.25	0.35	0.30	0.50	0.35	0.65	0.40	0.80	0.25	0.30	0.30	0.35	0.40	0.25	0.40
	V	5.0	5.0	5.0	2.0	2.5	4.0	2.5	5.0	2.5	5.0	2.5	2.0	3.0	4.0	5.0	5.0	8.0	8.0
Code 3	N	4	4	4	5	5	3	4	3	4	2	4	5	4	2	2	4	4	3
	Q/L	400	600	900	110	215	500	315	825	415	1025	515	110	255	660	1025	1325	560	800

Q/S
e
V
N
Q/L

(m)

(m)

(km/h)

-

(m²/hm)

compacteur ne convenant pas

(*) Impose que Dmax < 2/3 de l'épaisseur de la couche compactée.

(1) S'assurer de la traficabilité du compacteur.

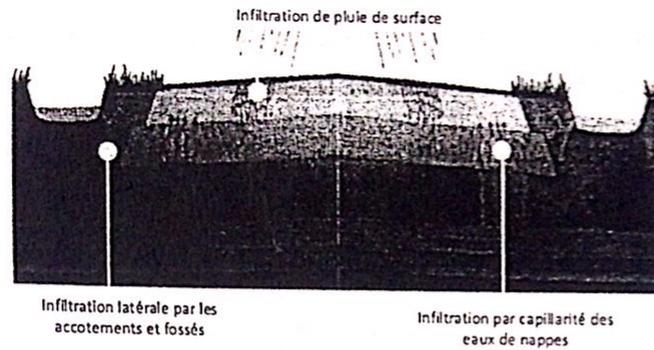
(2) Prévoir une opération annexe pour effacer les empreintes lorsqu'il y a risque de pluie en fin de journée (rabotage des centimètres supérieurs, ou emploi d'un autre type de compacteur si celui-ci apporte l'effet souhaité).

Drainage routier

Tout professionnel de la route sait bien que l'eau et la route ne font pas un bon ménage, donc pour cette raison il faut drainer le corps de la chaussée et la plate-forme support de chaussée.

- L'eau de ruissellement à la surface de la chaussée occasionne une baisse importante du niveau de service offert à l'utilisateur.
- L'eau contenue dans le corps de la chaussée qui provient d'infiltrations d'origines diverses est un élément décisif de l'accélération de dégradation des structures de chaussée.

La lutte contre les conséquences néfastes engendrées par l'eau, doit se faire en établissant un système de drainage efficace. Or pour être efficace, un tel projet nécessite un bon choix des dispositifs drainants, une bonne exécution et un entretien courant.



L'établissement d'un système de drainage nécessite comme étape préliminaire, le recueil des **données de base** sans lesquelles on risque d'avoir un projet incomplet. Ces données de base sont:

- Les données météorologiques ;
- Les données géotechniques ;
- Les données hydrologiques ;
- Les données relatives au projet ;
- Les données topographiques.

I. Drainage des eaux superficielles

1. Surface de roulement

Le ruissellement de l'eau à la surface vers les points bas peut entraîner la formation d'une **lame d'eau** d'épaisseur h . Cette lame d'eau, qui a pour conséquence des **infiltrations** à travers les points faibles (joints, fissures...) et un risque d'**aquaplanage**, doit être évacué rapidement.

La réduction de la lame d'eau est possible en donnant au profil en travers la pente la plus forte.

Remarque : il faut veiller à ce que l'effet des pentes longitudinales et transversales combinées, ne provoque ni écoulement lent (stagnation) ni écoulement intense (érosion).

Pour des chaussées en enrobé, l'épaisseur de la lame d'eau est calculée par la formule suivante :

$$h = 0,46 \times (l \times i)^{1/2} \times n^{1/5}$$

$l = B [1 + (n_2 / n_1)^2]$: Longueur d'écoulement avec :

B : Largeur de la chaussée (m)

n_2 : Pente transversale (%)

n_1 : Pente longitudinale (%)

i : Intensité des pluies (mm/s)

n : Pente de l'écoulement

2. Accotement

La lame d'eau d'épaisseur h , une fois drainée de la chaussée, ruisselle vers l'accotement et peut provoquer l'érosion ou la déstabilisation de ce dernier.

La pente préconisée est de 4 à 5% pour l'accotement afin de favoriser le ruissellement vers le collecteur.

La valeur de la pente d'accotement doit être maîtrisée en fonction de la vitesse critique pour contrôler les phénomènes d'érosion du matériau de l'accotement.

La vitesse d'écoulement peut être calculée par la formule de Manning- Strickler :

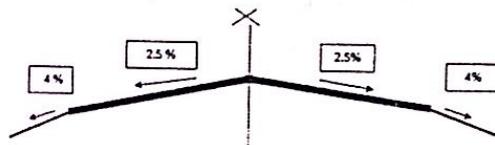
$$V = K \cdot h^{2/3} \cdot p^{1/2}$$

V : vitesse de l'écoulement ;

K : Coefficient de Strickler ;

h : épaisseur de la lame ;

p : pente de l'écoulement.



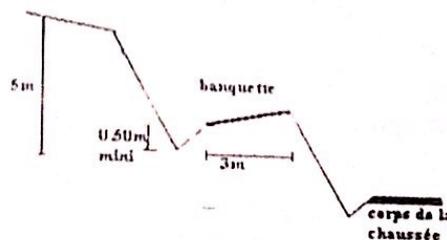
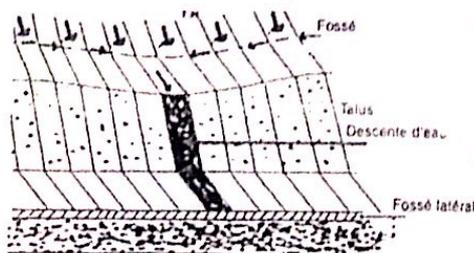
96

3. Talus :

La vitesse de ruissellement de l'eau à la surface du talus entraîne l'instabilité de celle-ci. L'eau peut acquérir une énergie suffisante pour arracher les grains du sol en créant des ravines qui s'approfondissent d'une averse à l'autre.

a. Lutte contre l'érosion

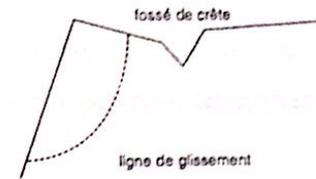
- Aménagement de descentes d'eau souvent sous forme de cascades pour amortir la vitesse d'écoulement ;
- Pour les talus de grande hauteur (>10 m) : aménagement des banquettes avec une contre-pente afin d'accroître la sécurité d'un glissement, et d'empêcher les matériaux érodés d'atteindre la chaussée.



97

a. Fossé de crête

Un fossé de crête doit être prévu chaque fois qu'un déferlement d'eau venant d'amont peut atteindre la crête du talus ou qu'une accumulation d'eau peut se produire au sommet.



c. Aménagement du pied du talus

- berme de pied de talus : avec une largeur allant de 1 à 3 m et dotée d'une pente vers le fossé pour éviter la stagnation d'eau, il contribue à la protection des dispositifs de drainage, et facilite le passage des engins d'entretien.
- Fossé de pied du talus : il assure une double fonction de drainage de la route et du talus.

54

II. Drainage du corps de la chaussée

Le drainage du corps de la chaussée a pour but de limiter, en durée et en quantité, la présence à l'intérieur du corps de la chaussée de l'eau libre pouvant former une nappe suspendue. La présence de cet eau libre représente un danger pour la structure et la drainer peut se faire par des :

- Couches drainantes ;
- Tranchées drainantes (longitudinale et transversale) ;
- Drains en arrête de poisson ;
- Ecrans drainants de rive de chaussée.

NB : Tous ces systèmes se caractérisent par un point commun qui est l'utilisation des **matériaux drainants**.

1. Couche drainante

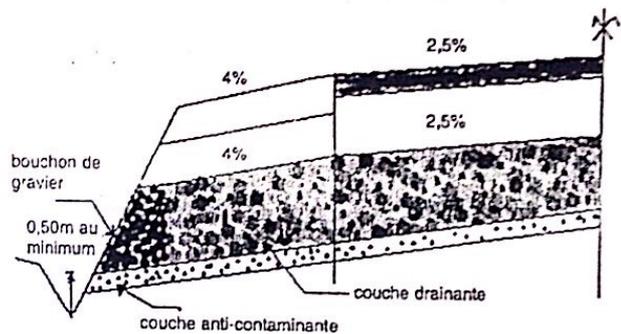
La couche drainante est un tapis de matériaux drainants supportés par le sol de fondation ou éventuellement par la couche de forme. Son épaisseur H doit être :

- Suffisante pour que la frange capillaire n'atteigne pas la couche supérieure ;
- Compatible avec la portance exigée pour supporter les contraintes du trafic ;

Son épaisseur H doit satisfaire à certains critères à savoir :

$$H = (L^2 \cdot q / K)^{1/2}$$

L : longueur de l'écoulement
 q : taux d'alimentation (cm/s) ;
 K : perméabilité du matériau (cm/s) ;
 $H_{\min} = 20 \text{ cm}$.



100

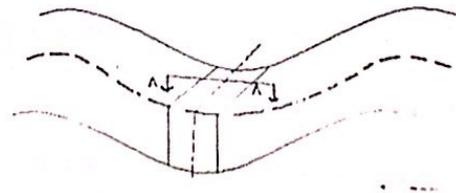
2. Tranchées drainantes :

a. Couches drainantes transversales

Réalisée dans le sol de fondation pour capter les eaux infiltrées dans le corps de la chaussée. Elle est soit transversale soit en biais de 60° par rapport à l'axe de la route.

Domaine d'application :

- Points bas du profil en long ;
- Passage déblai – remblai.



Objectifs :

- Accélérer l'évacuation des eaux dans les points bas du profil ;
- Intercepter l'écoulement de l'eau lorsque la pente longitudinale dépasse la pente transversale (minimiser le chemin d'écoulement).

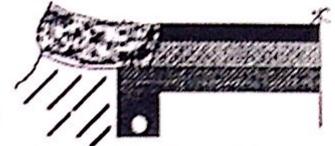
101

b. Couche drainante longitudinale

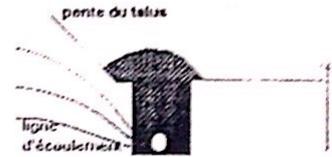
Tranchée exécutée au bord de la chaussée, remplie de matériaux drainants et éventuellement d'un drain servant à la collecte des eaux.

Objectifs :

- Conduire les eaux évacuées latéralement par la couche drainante et les drains en arrête de poisson et éventuellement les eaux infiltrées à travers les accotements ;
- Rabattement de la nappe du Talus.



Trenchée drainante associée à une couche drainante.



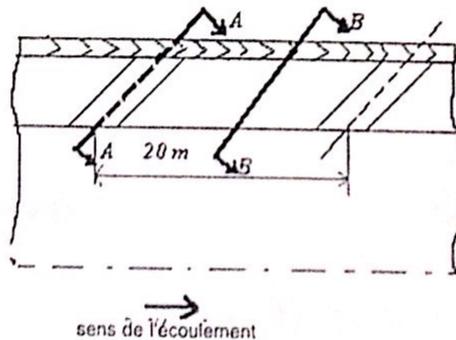
Trenchée drainante en pied de talus

102

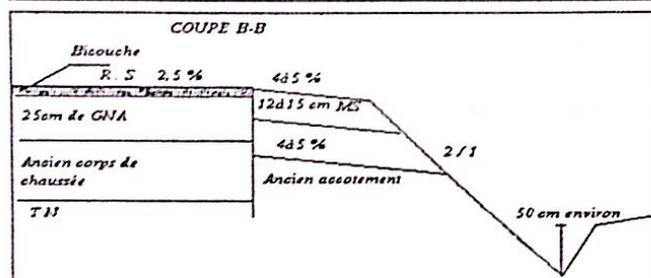
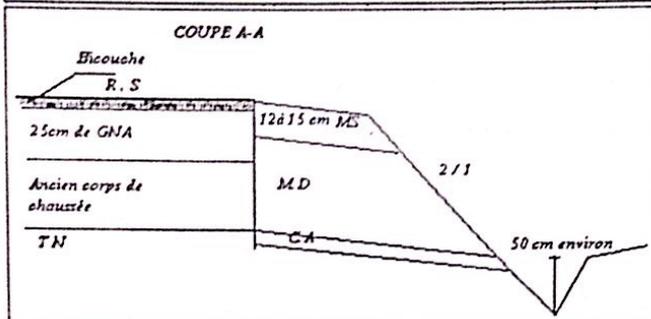
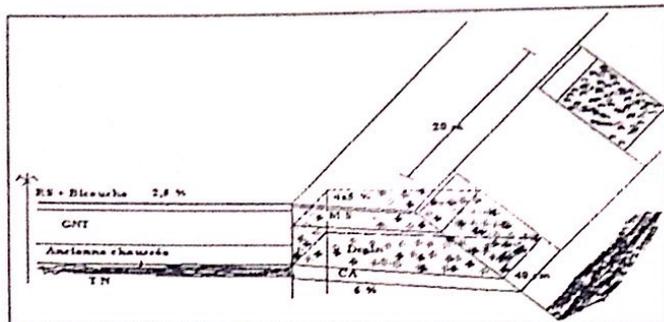
2. Drain en arrête de poisson

C'est une technique dérivée du drainage par tranchées drainantes transversales.

Ils sont placés de part et d'autre de la chaussée et distant de 20 m et de 40 cm de largeur. Son but est d'évacuer l'eau infiltrée dans le corps de la chaussée qui se trouve piéger entre l'ancienne chaussée moins perméable et l'accotement.



103

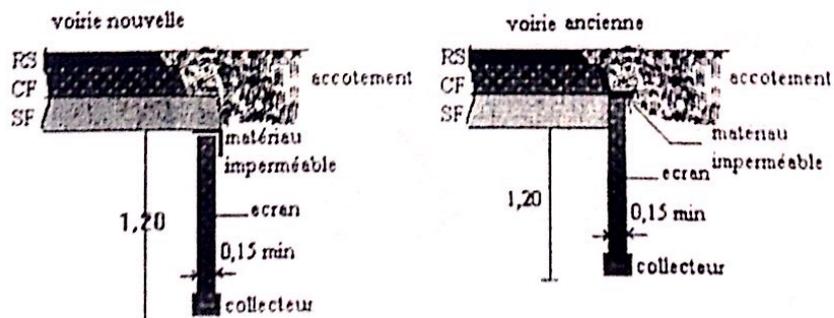


104

2. Ecran Drainant de Rive de Chaussée (EDRC)

C'est une tranchée drainante étroite à parois minces verticales.

- Il joue le rôle d'un écran capillaire ;
- Il permet d'évacuer l'excès d'eau du corps de la chaussée.



RS : revêtement superficiel
 CF : couche de fondation
 SF : sol de fondation.

Caractéristiques des matériaux drainants :

a. Matériaux enveloppés dans un géotextile :

- Grave routier 0/30 avec : E.S \geq 50 & passant à 2 mm < 10% ;
- Enveloppés dans un géotextile (200 à 300g/m²) anti-contaminant ;
- Drain non enveloppé en béton poreux ou en PVC.

b. Matériaux non enveloppés

Solution facile sur chantier :

- Grave routière 0/30 de granulométrie continue avec un E.S \geq 50, passant à 2 mm < 10% pour le drain en béton poreux & passant à 2 mm < 15% pour le drain en PVC.
- Drain en béton poreux ou en PVC dont il est conseillé d'envelopper dans un géotextile

Solution élaborée et plus coûteuse (application des règles de TERZAGHI)

- Le matériau doit vérifier :

$$D_{15} / D_{85} > 5 \text{ non contamination}$$

$$D_{15} / d_{15} > 5 \text{ pouvoir drainant}$$

$$D_{60} / D_{10} < 20 \text{ pour éviter la ségrégation à la mise en œuvre.}$$

Le LPEE propose un tout-venant 0/40 ou 0/60 ou un matériau à granulométrie serré 20/40.

106



107