

**Présentation du guide
technique de réalisation
des remblais et des
couche de forme (GTR)**

A partir de ce classement appelé communément **GTR** (**G**uide **T**echnique **R**outier), on distingue **quatre grandes classes géotechniques** de sol naturel présentant des propriétés spécifiques ainsi que des comportements **mécaniques** et **gélifs prévisibles** dans le temps :

- La **classe A** : les sols fins
Cette classe contient **quatre sous classes** : **A1, A2, A3, A4** ;
- La **classe B** : les sols sableux et graveleux avec fines
Cette classe contient **six sous classes** : **B1, B2, B3, B4, B5, B6** ;
- La **classe C** : les sols comportant des fines et des gros éléments
Cette classe contient **deux sous classes** : **C1, C2** qui s'associent pour la fraction 0/50mm aux classes A1, A2, A3, A4 ou B1, B2, B3, B4, B5, B6.
- La **classe D** : les sols insensibles à l'eau
Cette classe contient **trois sous classes** : **D1, D2, D3** ;

Terminologie

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.

Les sols sont de nature géologique diverse : alluvions, colluvions, matériaux meubles sédimentaires,...

Ils correspondent aux classes A, B, C et D définies ci-après. **Leur pourcentage de matières organiques est inférieur ou égal à 3 %.**

Terminologie

Matériaux rocheux

Il s'agit des matériaux naturels comportant une structure qui ne peut être désagrégée par simple trituration ou sous l'action d'un courant d'eau ; leur utilisation implique une désagrégation mécanique préalable par minage ou emploi d'engin d'extraction de forte puissance.

Les matériaux rocheux correspondent à la classe R définie ci-après ; ils ont pour origine l'ensemble des roches sédimentaires, magmatiques et métamorphiques.

Terminologie

Sols organiques

Il s'agit de sols ayant un pourcentage de matières organiques supérieur à 3 %

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.

Les sols organiques, les sous-produits industriels correspondent à la classe F définie ci-après.

CLASSIFICATION DES SOLS ET DES ROCHES

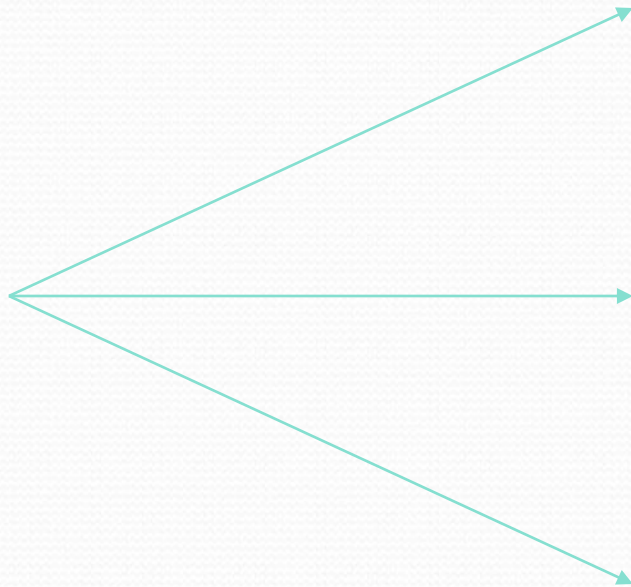
SOLS

Sols meubles

(A, B, C, D)

Matériaux rocheux (R)

**Sols organiques et sous
produits industriels (F)**





Paramètres de classification des sols meubles

Paramètres de nature

Ce sont des paramètres intrinsèques ; ils ne varient pas, ou peu, ni dans le temps ni au cours des différentes manipulations que subit le sol au cours de sa mise en œuvre.

Les paramètres de nature considérés dans la classification des sols sont la granularité, l'indice de plasticité et la valeur au bleu de méthylène du sol.

Paramètres de nature

La granularité

□ Le D_{\max}

Dimension maximale des plus gros éléments contenus dans le sol

Seuil retenu : 50 mm

Cette valeur permet de distinguer les sols fins, sableux et graveleux (classe A, B et D) (≤ 50 mm), des sols grossiers comportant des éléments blocailleux (Classe C) (> 50 mm).

Pour les sols de la classe C (sols comportant des fines et des gros éléments, deux sous-classes sont distinguées selon l'importance de la fraction 0/50 mm :

- **la sous-classe C1 qui rassemble les matériaux à éléments «anguleux» possédant une importante fraction 0/50 mm (≥ 60 à 80 %) et l'ensemble des matériaux à éléments «roulés».**
- **la sous-classe C2 qui comprend les matériaux à éléments anguleux possédant une faible fraction 0/50 mm (≤ 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 **C1Ai, C1Bi, C2Ai ou C2Bi, Ai ou Bi étant la classe de la fraction 0/50 mm du matériau considéré.**

Paramètres de nature

La granularité

- **Le tamisat à 80 μm
(ou pourcentage de fines)**

Ce paramètre permet de distinguer les sols riches en fines des sols sableux et graveleux

Seuils retenus :

- **35% : au-delà de 35 % de tamisât à 80 μm , les sols ont un comportement assimilable à celui de leur fraction fine.**
- **12% : c'est un seuil conventionnel permettant d'établir une distinction entre les matériaux sableux et graveleux pauvres ou riches en fines.**

Paramètres de nature

La granularité

□ Le tamisat 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% : Ce seuil permet de distinguer les sols sableux (plus de 70 % de tamisât à 2 mm) des sols graveleux (moins de 70 % de tamisât à 2 mm).

Paramètres de nature

L'argilosité

□ L'Indice de Plasticité (IP)

Seuils retenus :

- ✓ **12** : limite supérieure des sols faiblement argileux
- ✓ **25** : limite supérieure des sols moyennement argileux
- ✓ **40** : limite entre les sols argileux et très argileux.

L'argilosité

□ La Valeur de Bleu de Méthylène (VBS)

Seuils retenus :

- 0.1** : en dessous duquel sols insensibles à l'eau
- 0.2** : au dessus duquel apparaît la sensibilité à l'eau
- 1.5** : seuil distinguant les sols sablo limoneux des sols sablo argileux
- 2.5** : seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux moyennement plastiques
- 6** : seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux
- 8** : seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux

Paramètres de comportement mécanique

L'introduction dans la classification de ces paramètres résulte du fait que des sols **de nature comparable** peuvent se **comporter** de manière **relativement différente** sous l'action des **sollicitations** subies au cours de leur **misé en oeuvre** ou sous la **circulation des engins de transport**.

Ces paramètres ne sont pris en compte que pour **juger** de **l'utilisation** possible des sols en **couche de forme**.

Paramètres de comportement mécanique

- ❑ Los Angeles (LA)
- ❑ Micro Deval en présence d'Eau (MDE)
- ❑ Friabilité des Sables (FS)

Seuils retenus:

- ✓ **45** pour les valeurs LA et MDE
- ✓ **60** pour les valeurs FS

Paramètres d'état

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

Pour les sols, le seul paramètre d'état considéré dans la présente classification est **l'état hydrique** ; son importance est capitale vis-à-vis de tous les problèmes de remblai et de couche de forme.

Paramètres d'état

L'état hydrique

- **h : état humide**
- **m : état d'humidité moyen**
- **s : état sec**
- **ts : état très sec**

Paramètres utilisés pour caractériser l'état hydrique

- ❑ La position de w_n par rapport à w_{OPN} exprimé par le rapport w_n / w_{OPN}
- ❑ L'indice de consistance I_C
$$I_C = (W_L - w_n) / I_p$$
- ❑ L'Indice Portant Immédiat IPI
CBR immédiat sans surcharge ni immersion



Paramètres de classification des matériaux rocheux

Paramètres de classification des roches

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

Cas particulier des roches évolutives

Le caractère évolutif des roches est apprécié en laboratoire par :

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

Cas particulier des roches évolutives

Seuils retenus :

FR = 7

✓ Si $FR < 7$: peu fragmentable

✓ Si $FR > 7$: fragmentable

DG = 20 et 5

✓ $DG > 20$: très dégradabile

✓ $5 < DG < 20$: moyennement dégradabile

✓ $DG < 5$: peu dégradabile

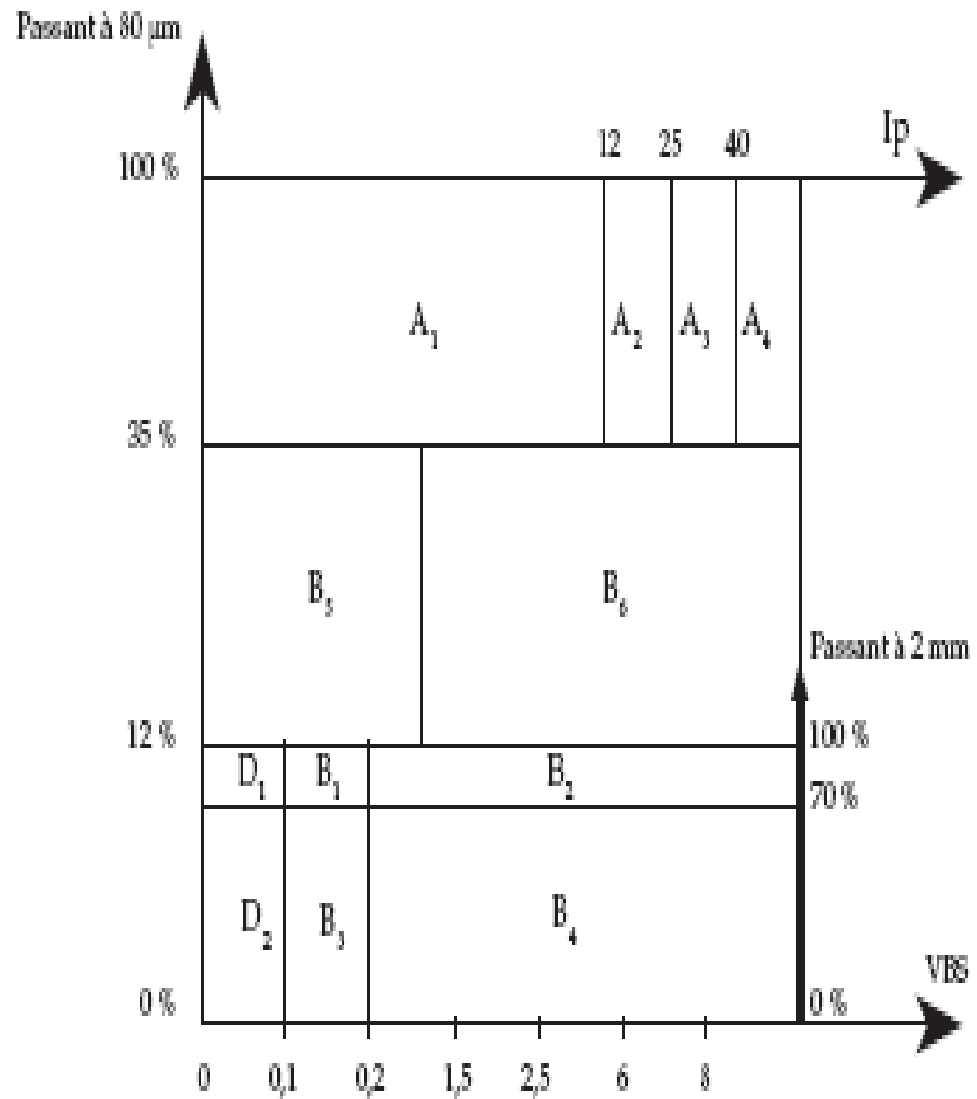
Classification des sols meubles

Classe	Type de sol	Sous-classe
La classe A $D_{\max} \leq 50$ mm et tamisat à $80\mu\text{m} > 35\%$	les sols fins (silts, limons, argiles, etc....)	A1, A2, A3 et A4 Suivant l'importance de la plasticité
La classe B $D_{\max} \leq 50$ mm et tamisat à $80\mu\text{m} \leq 35\%$	les sols sableux ou graveleux avec fines	B1, B2 B3, B4, B5, et B6 Suivant l'importance et les caractéristiques des fines et l'importance de la fraction sableuse
La classe C $D_{\max} > 50$ mm	Matériaux d'éboulis, Tv grossiers,..	C1 et C2 CiAi ou CiBi ou CiDi
La classe D $D_{\max} \leq 50$ mm et tamisat à $80\mu\text{m} \leq 12\%$ et une VBS < 0.1	Sables et graves propres	D1 (Sables propres) D2 (Graves propres)

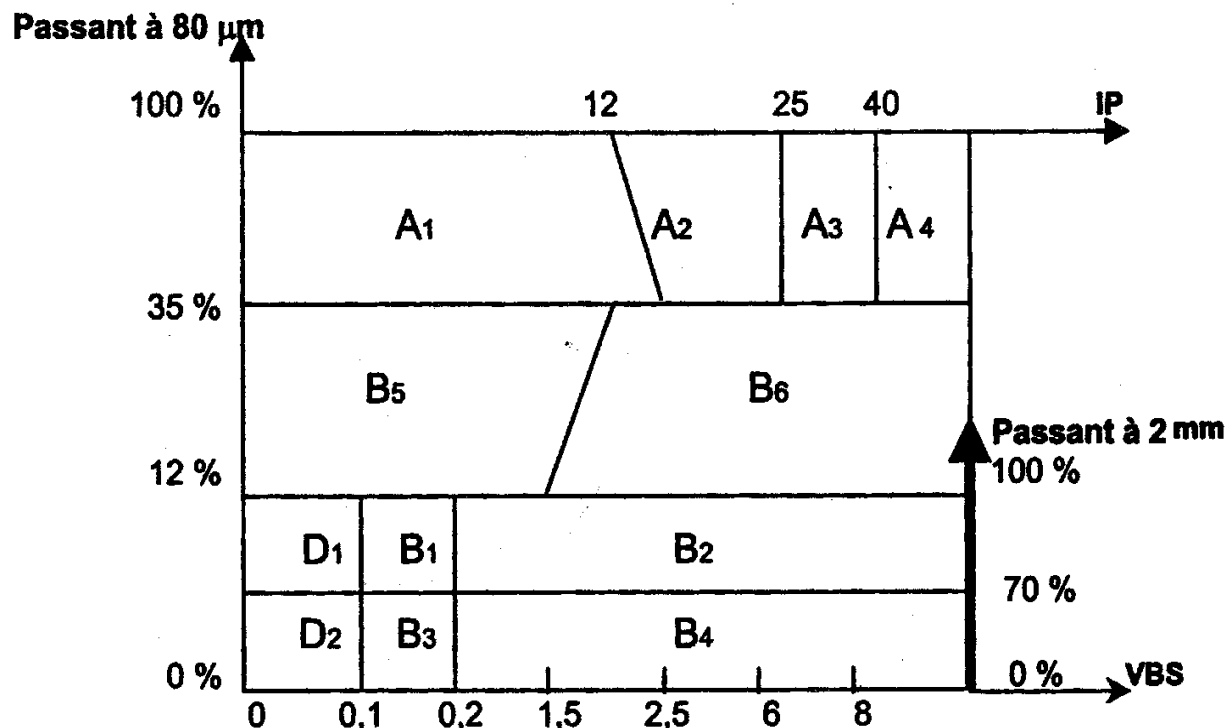
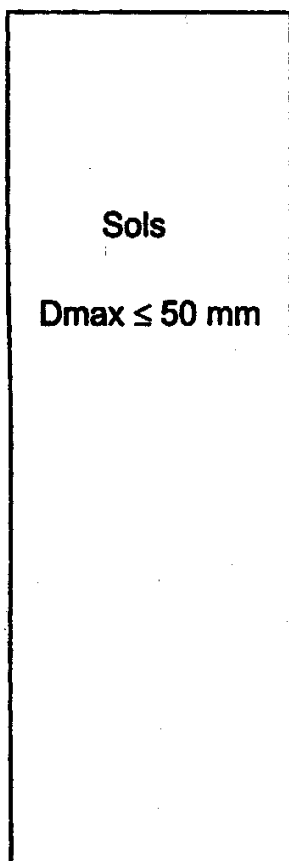
Classification des sols meubles (suite)

Classe	Type de sol	Sous-classe
Les sols Tirseux $W_l - W_r > 42$ (Indice d'instabilité volumétrique)	Sols fins caractérisés par un fort gonflement	TxA3 : pour les sols avec $IP \leq 40$ TxA4 : pour les sols avec $IP > 40$
Les sols Tuffacés Taux de $Ca CO_3$	Sols calcifiés	Tf : si $50\% \leq Ca CO_3 \leq 70\%$ Tc : si $Ca CO_3 > 70\%$ Soit TfAi ou TfBi Soit TcAi ou TcBi

Sols
 $D_{max} \leq 50 \text{ mm}$



CLASSIFICATION GMTR DES SOLS MEUBLES



- Les A_i et/ou B_i peuvent être parfois :
 - α des tufs fortement carbonaté TcA_i ou TcB_i si CaCO₃ > 70%
 - α des tufs faiblement carbonaté TfA_i ou TfB_i si 50% ≤ CaCO₃ ≤ 70%
- Les A₃ et les A₄ peuvent être parfois :
 - α des tirsés dont : WI-Wr > 42 avec WI > 53 et Wr < 13

Classification des matériaux rocheux

<h2 style="color: #008080;">Roches Sédimentaires</h2>	<h3 style="color: #0070C0;">Roches carbonatées</h3>	<ul style="list-style-type: none"> - Craies 	R₁
		<ul style="list-style-type: none"> - Grès calcaire - Calcarénite - Encroûtements calcaires - Calcaires marneux - Calcschistes - Calcaires durs - Calcaires dolomitiques 	R₂
	<h3 style="color: #0070C0;">Roches argileuses</h3>	<ul style="list-style-type: none"> - Marnes - Schistes sédimentaires - Flyschs marneux - Argilites - Pelites 	R₃
	<h3 style="color: #0070C0;">Roches siliceuses</h3>	<ul style="list-style-type: none"> - Grès argileux - Grès siliceux - Poudingues - Brèches 	R₄
	<h3 style="color: #0070C0;">Roches salines</h3>	<ul style="list-style-type: none"> - Gypse - Gypse marneux - Sel gemme 	R₅

Classification des matériaux rocheux (suite)

<p>Roches Magmatiques et Métamorphiques</p>	<ul style="list-style-type: none">- Granite- Basalte- Diorite- Quartzite <p>Autres roches éruptives et métamorphiques dures</p>	<p>R₆</p>
--	---	-----------------------------

Exemple d'application

Dmax (mm)	> 50 mm	> 2mm	< 0,080mm	WL	WP	VBS	w	wopn	IPI
6,3	0	11	77	32	21		4,5	8,5	
100	19	25	8			0,18			
100	15	23	68	27	13		2	9	
63	35	31	22	30	20	0,16			18
20	0	22	10			0,08			
85	10	15	28	35	18				8
35	0	53	11			1,8	10,3	10,8	

Exemple d'application

Sol n°	Classe
1	A₁s
2	C₁B₁
3	C₁A₂ts
4	C₂B₅m
5	D₁
6	C₁B₆h
7	B₄m

$D_{max} \leq 50 \text{ mm}$ et tamisat à $80 \mu\text{m} \leq 35\%$	B Sols sableux et graveleux avec fines	- tamisat à $80 \mu\text{m} \leq 12\%$ - tamisat à $2 \text{ mm} \leq 70\%$ - VBS > 0,2 ou ES ≤ 25	B_4 Graves argileuses (peu argileuses)...	Ils sont plus graveleux que les sols B_5 et leur fraction sableuse est plus faible. Pour cette raison, ils sont en général perméables. Ils réagissent assez rapidement aux variations de l'environnement hydrique et climatique (humidification - séchage). Lorsqu'ils sont extraits dans la nappe, il est assez peu probable, en climat océanique, que leur état hydrique puisse s'améliorer jusqu'à devenir "moyen". Leur emploi en couche de forme sans traitement avec des LH nécessite, par ailleurs, la mesure de leur résistance mécanique (Los Angelès, LA, et/ou Micro Deval en présence d'eau, MDE).	$7 < \text{IPI} \leq 15$ ou $1,10 w_{\text{OPN}} \leq w_n < 1,25 w_{\text{OPN}}$	$B_4 \text{ h}$	$LA \leq 4!$ $LA > 4$
					$0,9 w_{\text{OPN}} \leq w_n < 1,10 w_{\text{OPN}}$	$B_4 \text{ m}$	$LA \leq 4!$ $LA > 4$
					$0,6 w_{\text{OPN}} \leq w_n < 0,9 w_{\text{OPN}}$	$B_4 \text{ s}$	$LA \leq 4!$ $LA > 4$
					$w_n < 0,6 w_{\text{OPN}}$	$B_4 \text{ ts}$	$LA \leq 4!$ $LA > 4$
					$\text{IPI} \leq 5$ ou $w_n \geq 1,25 w_{\text{OPN}}$	$B_5 \text{ th}$	$LA \leq 4!$ $LA > 4$
					$5 < \text{IPI} \leq 12$ ou $1,10 w_{\text{OPN}} \leq w_n < 1,25 w_{\text{OPN}}$	$B_5 \text{ h}$	$LA \leq 4!$ $LA > 4$
					$12 < \text{IPI} \leq 30$ ou $0,9 w_{\text{OPN}} \leq w_n < 1,10 w_{\text{OPN}}$	$B_5 \text{ m}$	$LA \leq 4!$ $LA > 4$
					$0,6 w_{\text{OPN}} \leq w_n < 0,9 w_{\text{OPN}}$	$B_5 \text{ s}$	$LA \leq 4!$ $LA > 4$
					$w_n < 0,6 w_{\text{OPN}}$	$B_5 \text{ ts}$	$LA \leq 4!$ $LA > 4$
					$\text{IPI} \leq 4$ ou $w_n \geq 1,3 w_{\text{OPN}}$ ou $lc \leq 0,8$	$B_6 \text{ th}$	
					$4 < \text{IPI} \leq 10$ ou $0,8 < lc \leq 1$ ou $1,1 w_{\text{OPN}} \leq w_n < 1,3 w_{\text{OPN}}$	$B_6 \text{ h}$	
					$10 < \text{IPI} \leq 25$ ou $1 < lc \leq 1,2$ ou $0,9 w_{\text{OPN}} \leq w_n < 1,1 w_{\text{OPN}}$	$B_6 \text{ m}$	
					$0,7 w_{\text{OPN}} \leq w_n < 0,9 w_{\text{OPN}}$ ou $1,2 < lc \leq 1,3$	$B_6 \text{ s}$	
					$w_n < 0,7 w_{\text{OPN}}$ ou $lc > 1,3$	$B_6 \text{ ts}$	

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

Roches sédimentaires	Roches carbonatées	R ₁ Craie	<p>La craie est un empilement de particules de calcite dont les dimensions sont de l'ordre de 1 à 10µm.</p> <p>Cet empilement constitue une structure d'autant plus fragile que la porosité est grande (ou inversement que la densité sèche est faible).</p> <p>Les mesures et constatations de chantier ont montré qu'au cours des opérations de terrassement, il y a formation d'une quantité de fines en relation directe avec la fragilité de l'empilement.</p> <p>Lorsque la craie se trouve dans un état saturé ou proche de la saturation, l'eau contenue dans les pores se communique aux fines produites, leur conférant le comportement d'une pâte, qui s'étend rapidement à l'ensemble du matériau, empêchant la circulation des engins et générant des pressions interstitielles dans les ouvrages.</p> <p>Inversement, lorsque la teneur en eau est faible, la craie devient un matériau rigide, très portant mais difficile à compacter.</p> <p>Enfin, certaines craies peu denses et très humides, peuvent continuer à se fragmenter, après mise en œuvre, sous l'effet des contraintes mécaniques et du gel, principalement.</p>	$\rho_d > 1,7$	craie dense	R ₁₁
				$1,5 < \rho_d \leq 1,7$ et $w_n \geq 27$	craie de densité moyenne	R ₁₂ h
				$1,5 < \rho_d \leq 1,7$ et $22 \leq w_n < 27$		R ₁₂ m
				$1,5 < \rho_d \leq 1,7$ et $18 \leq w_n < 22$		R ₁₂ s
				$1,5 < \rho_d \leq 1,7$ et $w_n < 18$		R ₁₂ ts
				$\rho_d \leq 1,5$ et $w_n \geq 31$	craie peu dense	R ₁₃ th
				$\rho_d \leq 1,5$ et $26 \leq w_n < 31$		R ₁₃ h
				$\rho_d \leq 1,5$ et $21 \leq w_n < 26$		R ₁₃ m
				$\rho_d \leq 1,5$ et $16 \leq w_n < 21$		R ₁₃ s
				$\rho_d \leq 1,5$ et $w_n < 16$		R ₁₃ ts

		$pd \leq 1,5$ et $w_n < 16$		R_{13ts}
R_2 Calcaires rocheux divers Ex : - calcaires grossiers - travertins - tufs et encroûtements, etc...	<p>Cette classe regroupe l'ensemble de la gamme des matériaux calcaires rocheux.</p> <p>Leurs caractéristiques prédominantes, vis-à-vis de leur utilisation dans des remblais ou des couches de forme, sont la friabilité et éventuellement, pour les plus fragmentables d'entre eux, la gélivité.</p> <p>D'une manière générale, ces matériaux ne sont pas des matériaux rocheux évolutifs et ne posent pas de problèmes particuliers dans leur emploi en remblai. En couche de forme, leur friabilité peut conduire, par attrition ou désagrégation, à la formation de fines pouvant conférer à l'ensemble du matériau un comportement sensible à l'eau sous circulation des engins.</p>	$MDE \leq 45$	calcaire dur	R_{21}
		$MDE > 45$ et $pd > 1,8$	calcaire de densité moyenne	R_{22}
		$pd \leq 1,8$	calcaire fragmentable	R_{23}

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

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



CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN REMBLAI

PRINCIPES RETENUS

Les conditions d'utilisation des sols, des matériaux rocheux, des sous-produits industriels sont celles qu'il y a lieu de respecter pour autoriser l'emploi en remblai des différentes classes et sous-classes de matériaux qui sont distinguées dans la classification présentée dans le chapitre précédent.

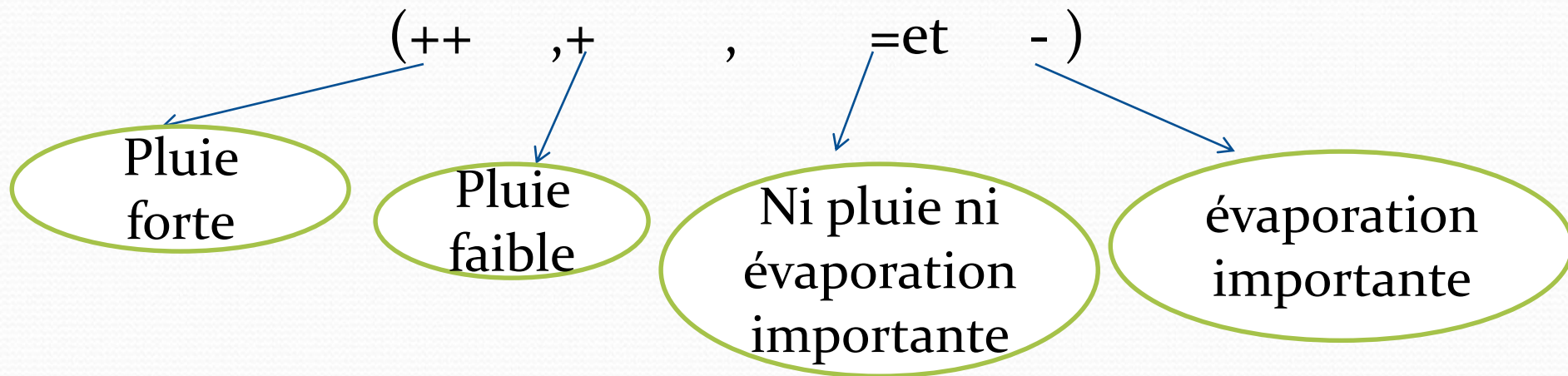
Ces conditions sont exprimées, en exigences techniques directement intégrables dans les cahiers des charges des marchés pour obtenir la qualité généralement recherchée pour ces ouvrages.

Elles ont été définies dans le double souci :

- d'une part, de viser le juste niveau de qualité technique nécessaire compte tenu des possibilités des matériels d'exécution actuels et des pratiques habituelles,
- d'autre part, de tenir compte des coûts moyens des différentes techniques et méthodes utilisées actuellement dans les pays industrialisés. De ce fait il est possible que certaines conditions d'utilisation non envisagées dans le présent document puissent être retenues et donner satisfaction dans des contextes technico-économiques différents où ne s'appliquent pas les mêmes règles de délais de construction, de niveau de service ou de coût. En particulier, dans cet esprit, on a considéré que les matériaux sensibles à l'eau se trouvant dans un état hydrique très humide (th) ou très sec (ts) n'étaient pas réutilisables normalement dans les remblais ou les couches de forme (cf. 1.2.1).

PRESENTATION DES TABLEAUX

- 1^{ère} colonne : la classe, la sous-classe et l'état hydrique du matériau
- 2^{ème} colonne : observations générales sur le comportement du matériau
- 3^{ème} colonne : situation météorologique



- 4ème colonne : conditions d'utilisation en remblai
- 5ème colonne : codes des conditions d'utilisation

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

Rubrique	Code	Conditions d'utilisation
E Extraction	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Extraction en couches (0,1 à 0,3m)
	2	Extraction frontale (pour un front de taille > 1 à 2m)
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Elimination des éléments > 800mm
	2	Elimination 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 ($\leq 10m$)

Exemple de tableau de conditions d'utilisation des matériaux en remblai

A₁ (états s et ts), A₂ (états th et h)

Sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en remblai	Code							
				E	G	W	T	R	C	H	
A₂h	Ces sols sont difficiles à mettre en œuvre en raison de leur portance faible. La mise en dépôt provisoire et le drainage préalable ne sont habituellement pas des solutions envisageables dans le climat français moyen. Le matelassage est à éviter au niveau de l'arase-terrassement.	+	pluie faible	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON						
			=	ni pluie, ni évaporation importante	Solution 1 : traitement T : traitement à la chaux C : compactage faible	0	0	0	2	0	2
		Solution 2 : utilisation en l'état C : compactage faible H : remblai de faible hauteur (≤ 5 m)			0	0	0	0	0	3	1
		-	évaporation importante	Solution 1 : aération E : extraction en couches W : réduction de la teneur en eau par aération R : couches minces C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	1	0	1	0	1	2	2
Solution 2 : traitement T : traitement à la chaux C : compactage moyen	0			0	0	2	0	2	0		

				C : compactage intense	
B_ss	Ces sols sont très difficiles à compacter, du fait de leur faible teneur en eau. En conséquence il convient : - soit de compacter intensément avec un arrosage superficiel - soit d'humidifier le matériau dans sa masse pour le ramener en B _s m Cette humidification est encore 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 (≤ 10 m)	1 0 0 0 1 1 2
		=	ni pluie, ni évaporation importante	Solution 1 : humidification W : humidification pour changer d'état R : couches minces C : compactage moyen	0 0 4 0 1 2 0
				Solution 2 : utilisation en l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0 0 0 0 0 1 2
		-	évaporation importante	Solution 1 : extraction frontale et arrosage E : extraction frontale W : arrosage pour maintien de l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	2 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

B₆m	Ces sols ne posent pas de problème d'utilisation en remblai sauf par pluie forte	++	pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON
		En l'absence de pluie, ils présentent en général une bonne traficabilité du fait de la présence d'une fraction granulaire importante	+	pluie faible	E : extraction frontale C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)
	=		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 H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0 0 0 0 0 1 2
				Solution 2 : arrosage pour maintien de l'état W : arrosage pour maintien de l'état C : compactage moyen	0 0 3 0 0 2 0
				Solution 3 : extraction frontale E : extraction frontale C : compactage intense	2 0 0 0 0 1 0

C₁A₁s C₁B₅s	Ces sols sont difficiles à compacter L'humidification pour changer d'état exigeant un malaxage au moins grossier du sol peut être rendue difficile par la présence des blocs. Si ce malaxage ne peut être réalisé il convient alors de laisser percoler l'eau à partir de la surface après avoir réalisé une scarification. Dans ce cas il convient d'observer un temps de percolation de plusieurs heures	++	pluie forte	Situation ne permettant pas de maîtriser l'humidification des sols nécessaire pour permettre leur utilisation et risquant de conduire rapidement à des excès de teneur en eau	
		+	pluie faible	Solution 1 : utilisation en l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur faible (≤ 5 m)	0
				Solution 2 : extraction en couches E : extraction en couches R : couches minces C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	1
		=	ni pluie, ni évaporation importante	Solution 1 : utilisation en l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0
				Solution 2 : humidification W : humidification pour changer d'état R : couches minces C : compactage moyen	0

R₁₁	Ces matériaux se réemploient sans difficulté à condition que l'on obtienne à l'extraction une granulométrie assez continue et dont le diamètre des plus gros éléments ne gêne pas le réglage en couche mince ou moyenne. Des difficultés de circulation pour les engins à pneus peuvent cependant apparaître en cas de pluie du fait de la formation d'une pellicule glissante en surface.	++	pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes
		+	pluie faible	R : couches moyennes C : compactage moyen
		= OU -	pas de pluie	R : couches moyennes C : compactage intense

R₂₁ R₄₁ R₆₁	Matériaux rocheux sains Ces matériaux habituellement insensibles à l'eau, sont utilisables en remblais quelles que soient les conditions météorologiques	++ + = ou =	toutes conditions météorologiques	G : élimination des éléments > 800 mm C : compactage moyen	0 1 0 0 0 2 0
n	Matériaux rocheux de dureté	Les conditions dépendant de la nature et de l'état du sol obtenu en chantier (ao			

<p>R₂₃ R₄₃ R₆₃</p>	<p>Matériaux rocheux "déstructurés", évoluant en cours de chantier vers un sol fin souvent sensible à l'eau</p>	<p>Les conditions dépendent de la nature et de l'état du sol obtenu en chantier. A priori, ces matériaux peuvent se classer :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pour R₂₃ : principalement en C₂Bi ou D₃ - pour R₄₃ : principalement en C₁Bi, Bi, D₁ ou D₂ - pour R₆₃ : toutes classes possibles <p>Dans chaque cas le géotechnicien doit préciser le sol le plus probable auquel on aboutit en fin de mise en œuvre</p> <p>On se référera alors aux conditions d'utilisation de ce sol en y ajoutant systématiquement l'obligation d'une fragmentation complémentaire</p>
--	---	---



Compactage des remblais

Prescriptions pour le compactage

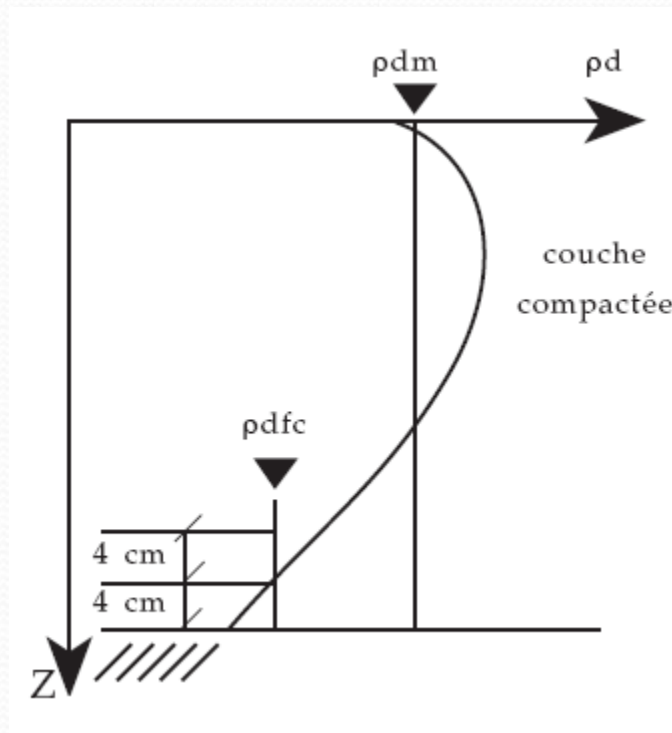
Elles sont fixées afin de :

- -limiter les tassements des corps des remblais et assurer leur stabilité
- Obtenir des caractéristiques suffisantes pour la mise en œuvre de la CDF

Deux objectifs de densification sont définis:

1. q_3 : objectif requis pour la CDF
2. q_4 : objectif requis pour les remblais

répartition de la densité en fonction de la profondeur



Classement des compacteurs

- 1- compacteur à pneu (Pi)

ils sont classés 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

Classement des compacteurs

- 2- compacteur vibrant à cylindres lisses (V_i)

le classement se fait à partir du paramètre $(M_1/L)\sqrt{A_0}$ et d'une valeur minimale pour A_0

M_1/L est exprimé en Kg/cm et A_0 en mm conduisent aux cinq classes définies ci-après:

V1 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$ { entre 15 et 25 et $A0 \geq 0,6$
{ supérieur à 25 et $A0$ entre 0,6 et 0,8

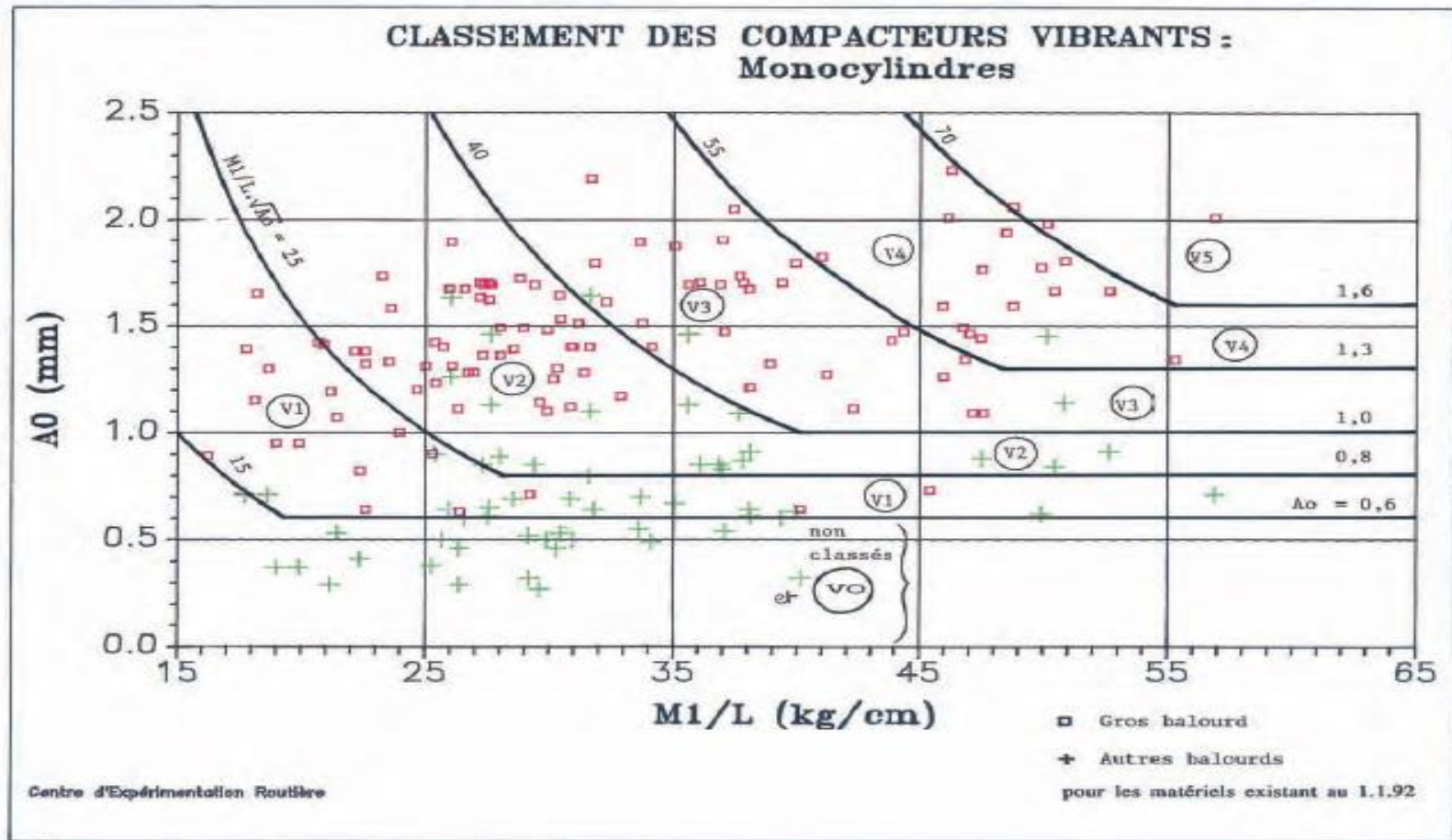
V2 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$ { entre 25 et 40 et $A0 \geq 0,8$
{ supérieur à 40 et $A0$ entre 0,8 et 1,0

V3 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$ { entre 40 et 55 et $A0 \geq 1,0$
{ supérieur à 55 et $A0$ entre 1,0 et 1,3

V4 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$ { entre 55 et 70 et $A0 \geq 1,3$
{ supérieur à 70 et $A0$ entre 1,3 et 1,6

V5 : $(M1/L) \times \sqrt{A0}$ supérieur à 70 et $A0 \geq 1,6$

Une illustration graphique est donnée par la figure



Essai pour la détermination de A0

A0 peut être contrôlée par la méthode des coussins selon la norme NFP 98-761 "Essai de vérification du moment des excentriques des compacteurs vibrants".

La mesure de l'amplitude à vide A0 peut être réalisée à l'aide d'un vibrographe en faisant vibrer le compacteur sur des coussins pneumatiques (cf norme NFP 98 761).



Les paramètres définissant les modalités de compactage sont :

1-Le paramètre Q/S

Le nombre indiqué dans la partie supérieure de chaque case des tableaux représente une valeur du rapport Q/S

Q: représente le rythme de production de l'atelier

S: représente le rythme d'utilisation d'un compacteur

2- l'épaisseur compactée:

La valeur d'épaisseur compactée indique une valeur maximale.

Les paramètres définissant les modalités de compactage sont (suite):

3-La vitesse de translation

Ce paramètre influe sur l'efficacité des compacteurs en profondeur.

Les valeurs indiquées sont généralement des valeurs maximales à $\pm 10\%$.

Exemple de tableau

Compacteur Modalités		A ₁ , C ₁ , A ₁ (*)																				
		P1	P2	P3	V1	V2	V3		V4		V5		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	SP1	SP2	PQ3	PQ4	
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		0.20	
	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	0	(1)	
	Code 3	N	4	4	4	5	5	3	4	3	4	2	4	5	4	2	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		65	
Energie de compactage moyenne	Q/S	0.045	0.065	0.095		0.040	0.065		0.085		0.100			0.040	0.085	0.100	0.130	0.040	0.070			
	e	0.25	0.35	0.45		0.25	0.30	0.40	0.30	0.50	0.30	0.60		0.25	0.30	0.30	0.30	0.20	0.30			
	V	5.0	5.0	5.0	0	2.0	2.5	2.0	3.5	2.0	4.0	2.0		2.0	2.5	3.5	4.0	8.0	8.0		0	
	Code 2	N	6	6	5		7	5	7	4	6	3	6		7	4	3	3	5	5		
	Q/L	225	325	475		80	165	130	300	170	400	200		80	215	350	520	320	560			
Energie de compactage intense	Q/S		0.035	0.050		0.025	0.040		0.050		0.065			0.025	0.050	0.065	0.085		0.035			
	e		0.20	0.30		0.20		0.30	0.30	0.40	0.30	0.45		0.20	0.30	0.30	0.30		0.25			
	V	0	5.0	5.0	0	2.0		2.0	2.5	2.0	3.0	2.0		2.0	2.0	2.5	3.0		8.0		0	
	Code 1	N	6	6		8		8	6	8	5	7		8	6	5	4		8		0	
	Q/L		175	250		50		80	125	100	195	130		50	100	165	255		280			

Q/S (m)
e (m)
V (km/h)
N -
Q/L (m²/h.m)

0 compacteur ne convenant pas

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

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

(2) Prévoir une opération annexe pour effacer les empreintes lorsqu'il y a un 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).

2. Lecture des tableaux - Exemples d'application

* Cas des compacteurs P_i , $V1$, $V2$, V_{pi} , SP_i et PQ_i (colonne unique).

Exemple : Sol B1, en remblai (qualité q4)

Modalités		Compacteur P_1
code 2 Le code à retenir provient des tableaux d'utilisation des sols (fonction de l'état hydrique et de la météo).	Q/S	0,060
	e	0,35
	V	5,0
	N	6
	Q/L	300

Valeur (en m) constante quel que soit le choix d'épaisseur

e réel compacté $\leq e$ (en m)
c'est : la vitesse maximale pour les vibrants km/h
la vitesse moyenne pour les autres matériels

Nombre d'applications de charge :
arrondi supérieur de $e \text{ réel} / (Q/S)$, donné pour e tableau,
Si $e = 0,30$ alors $N = 5$
Débit par mètre de largeur
 $Q_{\text{prat}} = k \times (Q/L) \times L \times (N/n)$
Si $k = 0,6$ $L = 2$ m $N/n = 1$
 $Q_{\text{prat}} = 360 \text{ m}^3/\text{h}$

* Cas des compacteurs $V3$ à $V5$ (colonne dédoublée : encadrement des conditions possibles)

Exemple : SOL B1, en remblai

Modalités		Compacteur V_3	
code 2	Q/S	0,135	
	e	0,30	0,80
	V	5	2
	N	3	6
	Q/L	675	270

Valeur constante quel que soit le choix du couple épaisseur/vitesse

Colonne de droite : choix V faible 2,0 km/h privilégiant e élevée (0,80 m)

Colonne de gauche : choix du débit maximal, avec V élevée bornée à 5 km/h au maximum et e fixée à 0,30 m

même règles de calcul que précédemment dans chaque colonne

On observe qu'une vitesse plus élevée s'accompagne nécessairement d'une épaisseur réduite, à cause du gradient de densité plus accentué dans la couche. Mais, moyennant le respect de ces conditions, le débit est cependant plus élevé.

Il est bien entendu interdit de panacher les chiffres en provenance des deux colonnes (l'épaisseur la plus élevée avec la vitesse la plus élevée).

Dans le cas où l'épaisseur nominale prévue (ou retenue) pour le chantier (e chantier) est comprise entre les deux épaisseurs ci-dessus, il est possible de déterminer les conditions optimales de comptage en calculant :

- la vitesse moyenne du compacteur vibrant à partir de la relation $V \times e = \text{cste}$ (les valeurs prises en compte sont celles données colonne de droite : V minimale et e maximale) :

$$V = \frac{X + V \times e}{e \text{ chantier}}$$

- Q/L à partir de la relation :

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

- N est toujours pris égal à : $\frac{e \text{ chantier}}{Q/S}$

Les valeurs ainsi calculées sont alors utilisées à titre de prescriptions comme si elles étaient directement lues dans les tableaux.

Ainsi dans l'exemple précédent, si l'épaisseur prévue pour le chantier est 0,50 m, il sera défini :

Modalités		V3
code 2	Q/S	0,135
	e	0,50
	V	3
	N	4
	Q/L	405

$$V = \frac{0,80 \times 2}{0,5} = 3,2 \text{ arrondi à } 3$$

$$V = \frac{0,5}{0,135} = 3,7 \text{ arrondi à } 4$$

$$Q/L = 1000 \times 3 \times 0,135 = 405$$



Exemple pratique