

TTP4

Exercices de traitement des sols

Exercice 1 : Traitement d'un remblai à la chaux

1. Données :

Une entreprise souhaite réaliser le traitement d'un remblai à la chaux.

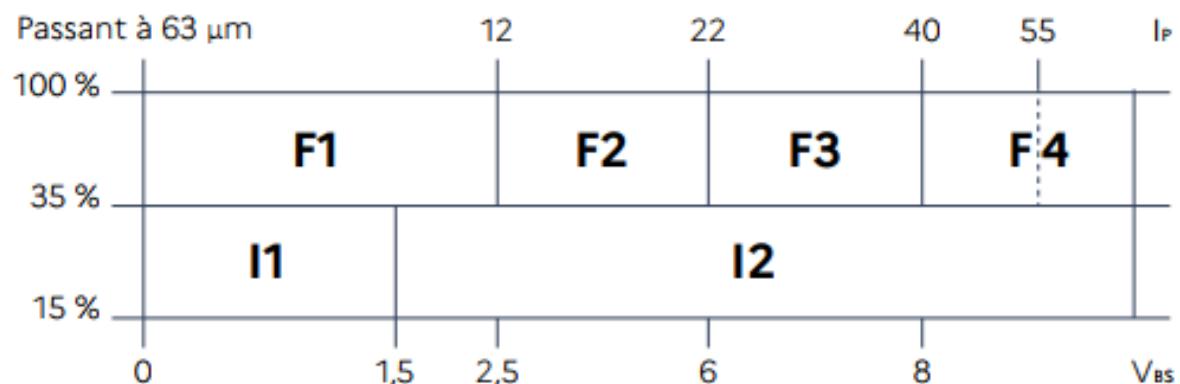
Elle réalise des essais sur les matériaux du remblai dont voici les résultats :

- L'analyse granulométrique donne 32% de passant à 80 µm et le $D_{max} < 50$ mm
- La valeur au bleu : 2.2g / 100g
- Essais de limites d'Atterberg :
 - Essai à la coupelle donne l'indice de liquidité : 20
 - Essai des « boudins » donne l'indice plastique à 7
- L'essai proctor donne :
 - Une masse volumique sèche à l'OPN de 1.79 t/m³
 - Pour une teneur en eau à l'OPN de 15%
- Des essais de teneur en eau naturelle à différentes périodes de l'année :
 - 16 – 17 – 17,2 – 18,3 – 18,5 – 19 – 19,2 – 20 – 20,2%

2. Questions :

1. A partir du guide GTR, effectuer le classement du sol :

Fascicule II du guide GTR page 12



2. Déterminer la sous classe du matériau pour chaque teneur en eau naturelle mesurée à partir du Fascicule II du guide GTR Annexe 1 Tableaux de classification des matériaux utilisés pour la construction des remblais et des couches de forme

Classe	Paramètres de nature 2 ^e niveau de classification	Sous-classe fonction de la nature	Caractères principaux	Paramètres et valeurs de seuils retenus	Sous-classe
I Sols intermédiaires	$V_{fs} \leq 1,5$ ou $I_p \leq 12$	I1 Sables et graves très sileux	<p>La proportion de fines et la faible plasticité de ces dernières rapprochent beaucoup le comportement de ces sols de celui des sols F.</p> <p>Pour la même raison qu'indiqué à propos des sols F, il y a lieu de préférer le critère V_{fs} au critère I_p, pour l'identification des sols I1.</p>	$IPI \leq 5$ $OU Wn \geq 1,25 WOPN$	I1th
				$5 < IPI \leq 12$ $OU 1,25 WOPN > Wn \geq 1,1 WOPN$	I1h
				$12 < IPI \leq 30$ $OU 1,1 WOPN > Wn \geq 0,9 WOPN$	I1m
				$0,9 WOPN > Wn \geq 0,6 WOPN$	I1s
				$0,6 WOPN > Wn$	I1ts
	$V_{fs} > 1,5$ ou $I_p > 12$	I2 Sables et graves, argileux à très argileux	<p>L'influence des fines est prépondérante ; le comportement du sol se rapproche de celui du sol fin ayant la même plasticité avec toutefois une plus grande sensibilité à l'eau due à la présence de la fraction sableuse en plus grande quantité.</p>	$IPI \leq 4$ ou $Ic \leq 0,85$ $OU Wn \geq 1,3 WOPN$	I2th
				$4 < IPI \leq 10$ ou $0,85 < Ic \leq 1$ $OU 1,3 WOPN > Wn \geq 1,1 WOPN$	I2h
				$10 < IPI \leq 25$ ou $1 < Ic \leq 1,15$ $OU 1,1 WOPN > Wn \geq 0,9 WOPN$	I2m
				$11,5 < Ic \leq 1,25$ $OU 0,9 WOPN > Wn \geq 0,7 WOPN$	I2s
				$1,25 < Ic$ $OU 0,7 WOPN > Wn$	I2ts

3. A partir du Fascicule II du GTR et de son annexe 2 « CONDITIONS D'UTILISATION DES MATERIAUX EN REMBLAI », indiquer qu'elles sont les conditions d'utilisation et de traitement de ce matériau en remblai à partir des sous classes obtenues précédemment :

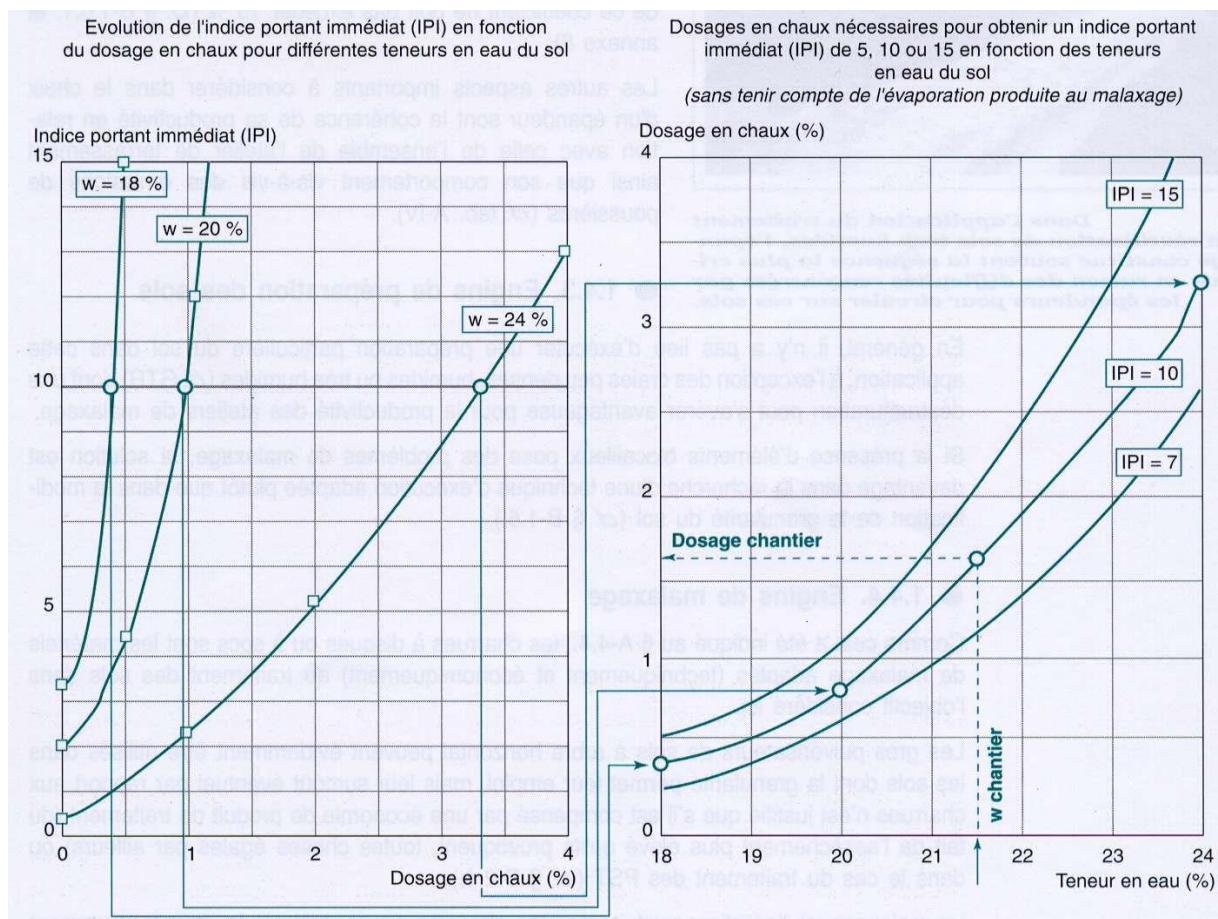
Sol	Observations générales	Situation météorologique		Conditions d'utilisation en remblai	Code E G W T R C H
I2th	Ces sols sont normalement inutilisables dans l'état en raison de leur portance quasi nulle. Leur modification d'état hydrique pour les ramener à l'état « h » ou « m » peut être envisagée sous réserve d'une étude spécifique qui démontre cette faisabilité.				NON
I2h	Ces sols sont très difficiles à mettre en œuvre en raison de leur portance faible. La fraction grenue n'est pas suffisante pour modifier sensiblement le comportement de la fraction argileuse. Ils sont sujets au « matelassage », ce qui est à éviter au niveau des arases de 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 seule C : compactage moyen	0002020
		-	évaporation importante	Solution 2 : utilisation en l'état C : compactage faible H : remblai de hauteur faible (≤ 5 m)	0000031
		++	pluie forte	Solution 1 : extraction en couche - aération E : extraction en couche W : réduction de la teneur en eau par aération R : couches minces C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	1010122
		+	pluie faible	Solution 2 : traitement T : traitement à la chaux seule C : compactage moyen	0002020
		=	ni pluie ni évaporation importante	C : compactage moyen	0000020
I2m	Ces sols ne posent pas de problème d'utilisation en remblai sauf par pluie forte. En l'absence de pluie, ils présentent en général une bonne traficabilité du fait de la présence d'une fraction granulaire importante.	++	pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes.	NON
		+	pluie faible	E : extraction frontale C : compactage moyen H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	2000022
		=	ni pluie ni évaporation importante	C : compactage moyen	0000020
		-	évaporation importante	Solution 1 : utilisation en l'état C : compactage intense H : remblai de hauteur moyenne (≤ 10 m)	0000012
		-		Solution 2 : arrosage pour maintien de l'état W : arrosage pour maintien de l'état hydrique C : compactage moyen	0030020
		-		Solution 3 : extraction frontale E : extraction frontale C : compactage intense	2000010

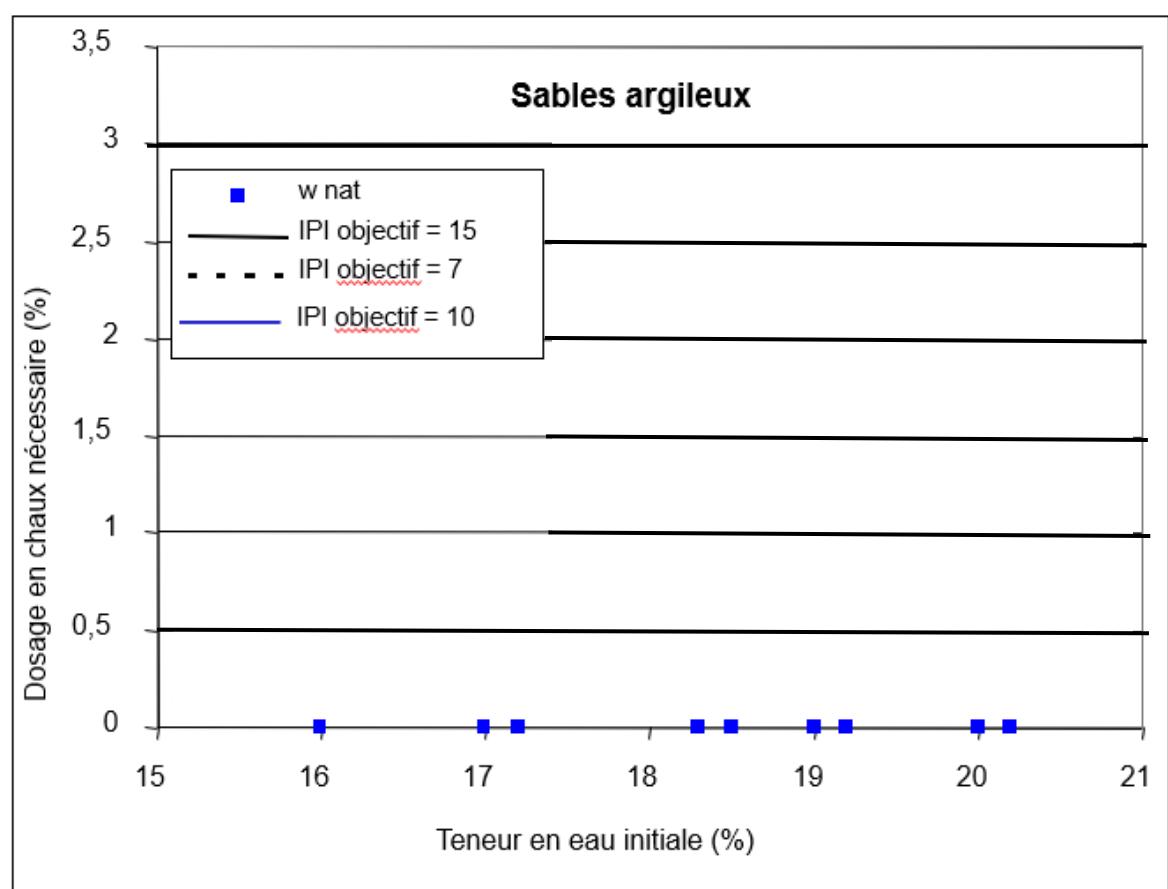
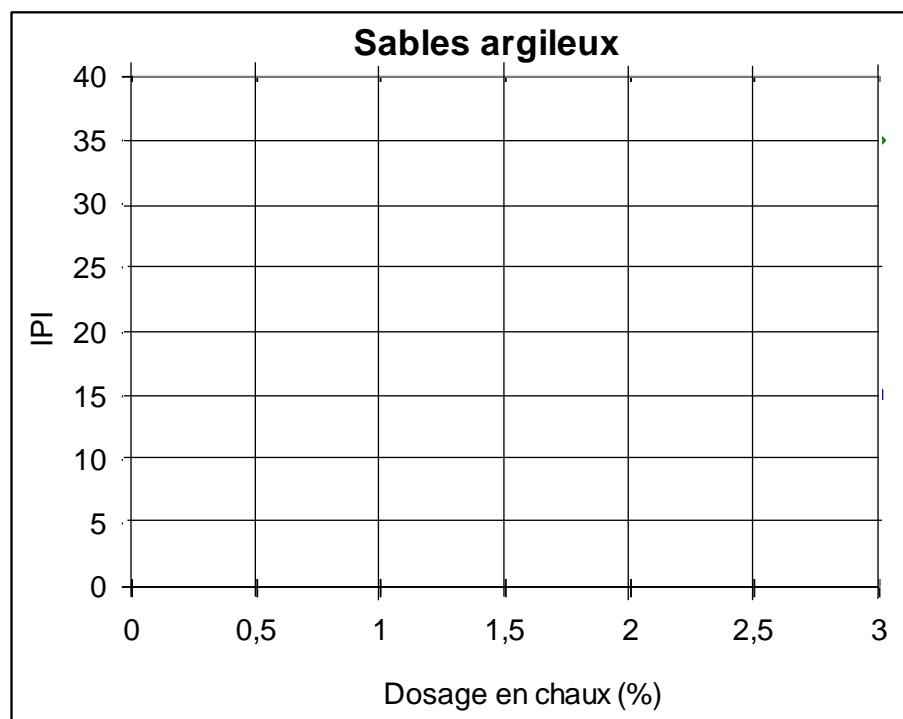
4. Préparer le chantier de traitement en déterminant le % de chaux nécessaire pour obtenir un objectif d'IPI de 10.

- a. Voici les planches d'essai réalisées sur deux teneurs en eau naturelles et pour un pourcentage de chaux à 0%, 1% et 3% :

	%age chaux	0 %	1 %	3 %
	w _{OPN} (%)	15	17	18
w naturelle :	IPI	4	13	35
17,5 %	w sol traité (%)	17,4	16,8	15,1
w naturelle :	IPI	2	6	15
19,5 %	w sol traité (%)	19,6	18,7	16,1

- b. Tracer les courbes suivantes à partir de ces 2 valeurs de teneurs en eau naturelles et les trois objectifs d'IPI de 7, 10 et 15 :





- c. En déduire le pourcentage de chaux à prévoir pour les teneurs en eau naturelle du remblai que l'on peut traiter pour obtenir un IPI de 10.

Exercice 2 : Traitement d'une couche de forme au ciment

Une entreprise de travaux publics est adjudicataire d'un marché « Chaussées » pour le compte d'une DIR sur une route à 2x2 voies du réseau routier national d'une longueur de 10 km.

Les travaux de terrassements ont fait l'objet d'un marché séparé et sont terminés.

Ils ont conduit à une plate-forme de classe PF2qs avec une couche de forme constituée d'un matériau rocheux du site (roche métamorphique), concassé sur place et mis en œuvre sur une épaisseur de 50 centimètres.

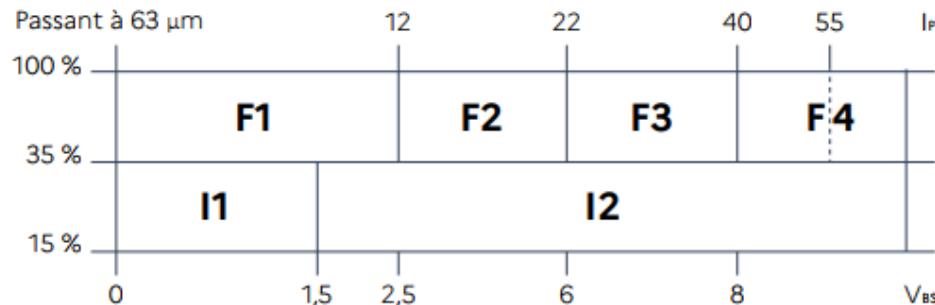
Pendant la phase de préparation de son chantier, l'entreprise adjudicataire du marché « Chaussées » procède à des observations de la plate-forme, en particulier dans les tranchées en cours de réalisation pour la mise en place de certains réseaux.

L'observation des matériaux interpelle le conducteur de travaux qui fait procéder à quelques prélèvements du matériau de la couche de forme et qui les confie à son laboratoire de contrôle.

Les identifications réalisées sur les matériaux prélevés ont conduit aux résultats ci-après :

- Dmax : compris entre 40 et 50 mm
- Pourcentage de fines : 10 % - 11 % - 13 % - 18 %
- Passant à 2 mm : 78 % - 72 % - 73 % - 77 %
- VBS (g/100 g) : 0,18 – 0,23 – 0,22 – 0,26
- Los Angeles : 55

1. Réaliser le classement du sol :



Pour les matériaux fins (passant à 63 µm) < 15%, il existe un second tableau pour la classification.

Il faut comparer les fractions 0,063/2 mm et 2/63 mm

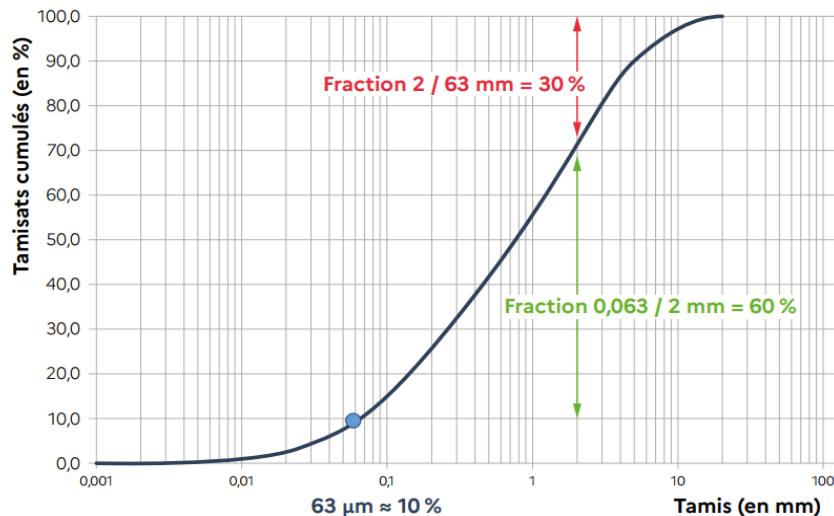
Et calculer le Coefficient d'uniformité Cu (inférieur ou supérieur à 6)

Passant à 63 µm			
15 %	S4	S3	fraction 0,063/2 mm ≥ fraction 2/63 mm
5 %	G4	G3	fraction 2/63 mm ≥ fraction 0,063/2 mm
0 %	S2	S1	fraction 0,063/2 mm ≥ fraction 2/63 mm
0 %	G2	G1	fraction 2/63 mm ≥ fraction 0,063/2 mm

0 6 Cu

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

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

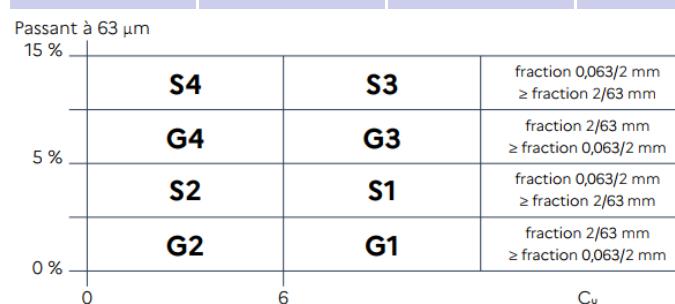
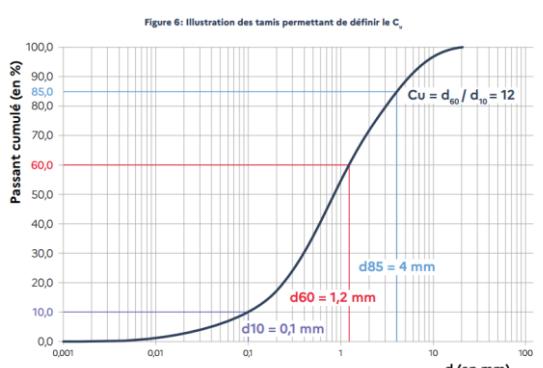


1. A partir des valeurs suivantes déterminer le classement des matériaux sur les 4 sondages

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Passant à 63µm	10 %	11 %	13 %
Passant à 2 mm	78 %	72 %	73 %
Fraction 63 µm/2 mm			
Fraction 2 mm/63 mm			

2. Déterminer le coefficient d'uniformité (Cu) du matériau :

	Echantillon 1	Echantillon 2	Echantillon 3
Passant à 63µm	10 %	11 %	13 %
Passant à 2 mm	78 %	72 %	73 %
D ₁₀	0,063 mm	0,060 mm	0,058 mm
D ₆₀	1,5 mm	1,75 mm	1,70 mm
C _u = D ₆₀ / D ₁₀			



3. En étudiant l'annexe 1 du GTR concernant la classification de ces matériaux, indiquer la sous classe du matériau S3 en fonction des résultats de l'essai de la friabilité du sable :



Si M est la masse du matériau soumis à l'essai et m la masse des éléments inférieur à 0,1 mm produire au cours de l'essai le coefficient de friabilité du sable est :

$$F_s = 100 \frac{m}{M}$$

Massé sèche introduite : 500 gr

Massé sèche inférieure à 0.1 mm après essai : 350 gr

Calculer le coefficient de friabilité du sable et déduire la sous classe du matériau S3 :

Tamisat à 63 µm compris entre 5 et 15 % et Cu ≥ 6	S3 Sables limoneux, sables argileux (peu argileux)... Granulométrie étalée	La plasticité et/ou la quantité de leurs fines rendent ces sols généralement sensibles à l'eau. Leur temps de réaction aux variations de l'environnement hydrique et climatique est court, tout en pouvant varier assez largement (fonction de perméabilité). Quand ils sont sensibles à l'eau, lorsque leur état hydrique est « h » ou « th », il est difficile de les améliorer par essorage. Leur emploi en couche de forme non traitée nécessite, par ailleurs, la mesure de leur résistance mécanique (FS).	FS ≤ 60	S31
			FS > 60	S32

4. Détermination de la sensibilité du sol à l'eau

1. *Essai Los Angeles*

On place 5000 g de matériau sec dans le tambour avec 11 boulets normalisés et on effectue 500 tours.

L'échantillon est ensuite retiré du tambour, lavé au-dessus d'un tamis de mailles de 1,6 mm, puis séché. Le refus (masse de l'échantillon restant) est ensuite pesé.

La différence de masse permet de calculer le coefficient Los Angeles (LA) en appliquant la formule suivante :

Massé du refus sec après essai : 2250 gr



$$LA = 100 \times \frac{(M_{initial} - M_{refus})}{M_{initial}}$$

2. Essai Micro Deval à l'Eau (MDE) :

Préparer un échantillon de granulats à tester de 500 grammes lavé et séché.

Introduire l'échantillon dans le tambour d'essai avec 5 kilogrammes de billes métalliques calibrées et 2,5 litres d'eau.

Faire faire au tambour 12 000 tours à la vitesse de 100 tr/min. Soit le faire tourner pendant 2 heures.

Retirer l'échantillon de granulats, et le laver au-dessus d'un tamis de 1,6 mm.

Récupérer les fines d'usures qui passent à travers le tamis, les sécher puis les peser (masse en gramme).

Calculer en % la variation de masse de l'échantillon initial en utilisant la formule :

$$(500 - m) \times 100 / 500$$

Tambours d'essai (12000 tours à 100 t/min)



Détail d'un tambour avec 2,5 kg de billes d'acier

Masse sèche passant au tamis de 1.6 mm après essai : 250 gr

5. En étudiant le GTR Annexe 3 concernant l'utilisation des matériaux en couche de forme, Indiquer, pour chaque classe de sol obtenue, les conditions d'utilisation matériau en couche de forme. Préciser les conditions d'utilisation de ces matériaux si un traitement est réalisé. Remplir les deux grilles de décisions

Classe de sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en couche de forme	Code GWTS
I1	La grande sensibilité à l'eau des sols de cette classe implique nécessairement de les traiter pour les utiliser en couche de forme*. Ce traitement peut être un traitement aux liants hydrauliques pour les moins argileux de la classe ou un traitement associant chaux + liant hydraulique pour les plus argileux et les plus humides. Ces sols se traitent le plus souvent en place et éventuellement en centrale après les avoir traités en place à la chaux.	+ pluie faible	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant.	NON
		= ou - pas de pluie	W : arrosage ou humidification pour gestion de l'état hydrique T : traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux S : application d'un enduit de cure éventuellement gravillonné	0121
S12 S22 S32 S42	La sensibilité à l'eau des sols de ces classes impose de les traiter avec un liant hydraulique*. Ces sols se traitent souvent en place mais, lorsqu'ils sont dans un état moyen ou sec, ils sont également susceptibles d'être traités en centrale.	+ pluie faible	Situation météorologique ne permettant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant(s).	NON
		= ou - pas de pluie	W : arrosage ou humidification pour gestion de l'état hydrique T : traitement avec un liant hydraulique S : application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté	0112

GRILLE DE DECISION

Matériaux : I1

	+	=	-
Météo			
G :			
W : Arosage ou humidification			
T : Traitement au LH			
T : Traitement au LH et/ou Chaux			
S : Enduit de cure			
Observations			

GRILLE DE DECISION

Matériaux : S32

	+	=	-
Météo			
G :			
W : Arosage ou humidification			
T : Traitement au LH			
T : Traitement au LH et/ou Chaux			
S : Enduit de cure éventuellement clouté			
Observations			

6. Après cette analyse, est-il judicieux de garder ces matériaux en l'état en couche de forme ?

2. Traitement en place de la couche de forme :

Rappel sur les essais d'aptitudes

- ↳ Echantillons Diam 5 cm x H 5 cm
- ↳ Traitement à la chaux
 - ↳ Mesure du gonflement après 7 jours dans l'eau à 40°C
 - ↳ < 5 % : apte > 10 % : inapte
- ↳ Traitement Chaux & Liants hydrauliques
 - ↳ Mesure du gonflement après 7 jours dans l'eau à 40°C
 - ↳ Mesure de la résistance à la traction après 7 jours dans l'eau à 40 °C
 - ↳ < 0,1 MPa : inapte > 0,2 MPa : apte

1. Traitement au liant L1

Le marché « Terrassements » initial prévoyait un traitement en place de la couche de forme pour obtenir une plate-forme de classe PF3. L'entreprise adjudicataire de ce marché « Terrassements » avait procédé à une étude d'aptitude qui avait conduit aux résultats présentés dans le tableau ci-dessous.

Pour quel dosage le sol pouvait-il être considéré comme inapte au traitement ?

Dosages en liant	Essais d'aptitude	
	Gonflement vol.	R_{tb}
5 % L1	0,53 %	0,11 MPa
6 % L1	0,89 %	0,16 MPa
7 % L1	1 %	0,21 MPa

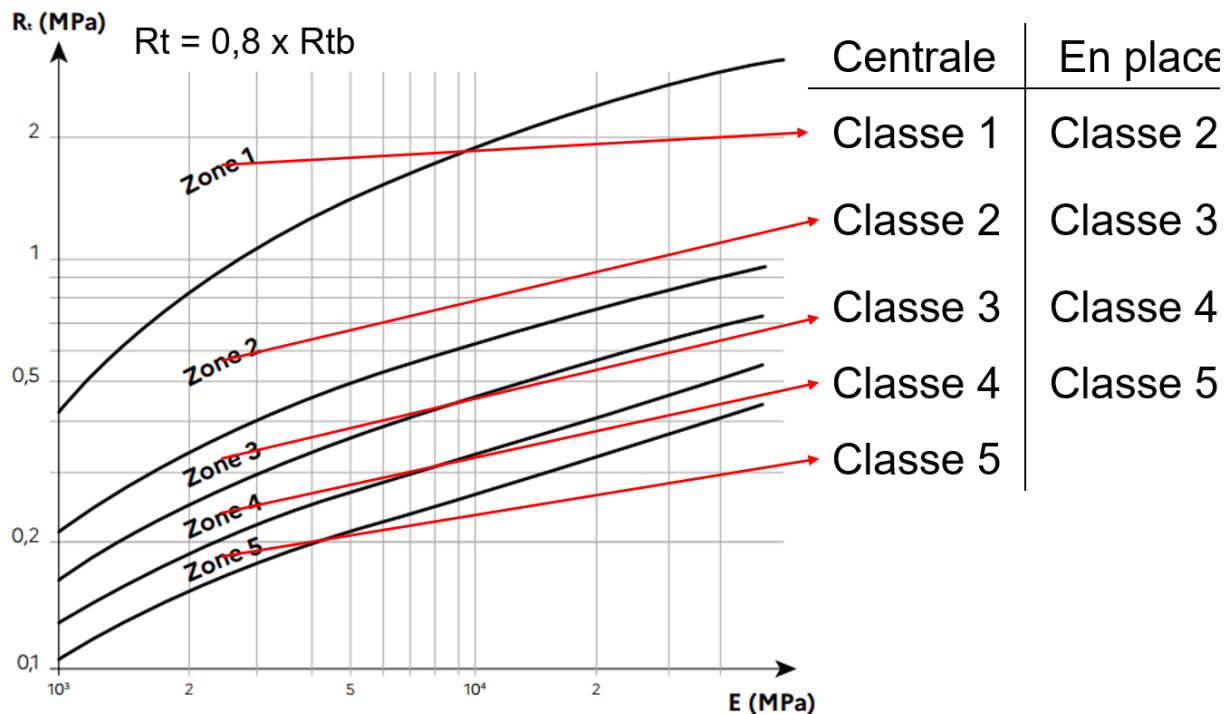
2. Traitement au liant L2

L'entreprise adjudicataire du marché « Chaussées » fait réaliser une étude de traitement avec un autre liant (L2) sur le matériau mis en œuvre en couche de forme lors des terrassements. Cette étude conduit aux résultats présentés dans le tableau ci-dessous. Le traitement devra être réalisé au mois de septembre.

Dosage	ρ_d	w (%)	Rc 7 jrs (MPa)	Rc 14 jrs (MPa)	Rtb 90 jrs (MPa)	E 90 jrs (MPa)
5 % L2	1,86	12,3	0,91	1,62	0,24	2917
6 % L2	1,86	12,3	1,72	2,35	0,35	3680

Est-ce que les deux dosages en liant L2 permettent de respecter les règles du Guide de traitement des sols ?

3. Quelle est la classe mécanique du sol traité avec le dosage que vous retiendrez (attention : $R_t = 0,8 \times R_{tb}$) ?



4. Classe d'arase et épaisseur de la couche de forme

Proposez une classe d'arase en argumentant et déterminez l'épaisseur à traiter au dosage que vous aurez choisi pour obtenir une plate-forme de classe PF3 ?

Classe AR		AR1				AR2		
Portance court terme		35 MPa				50 MPa		
Classe mécanique	3			30	40 ⁽¹⁾		25	30
	4	30	35	35	45 ⁽¹⁾	25	30	35
	5	35	45 ⁽¹⁾	50 ⁽¹⁾	55 ⁽¹⁾	30	35	45 ⁽¹⁾
Classe de plateforme		PF2	PF2qs	PF3	PF4	PF2qs	PF3	PF4
(1) L'obtention de la compacité recherchée en fond de couche conduit généralement à une mise en œuvre en 2 couches.								

5. Estimation du coût du traitement :

Sur la base du dosage et de l'épaisseur choisis, estimatez le coût du traitement sachant que l'entreprise a remis un prix de 4 €/m³ pour l'épandage, malaxage, réglage et compactage auquel il faut ajouter la fourniture de liant hydraulique à 100 €/t (largeur de plate-forme traitée : 20 m sur 10 km)

$$Q_{(t/m^2)} = e_{(m)} \times \rho_d(t/m^3) \times \frac{dosage_{(%)}}{100 - dosage_{(%)}}$$

6. Chiffrage de la solution GNT sans traitement

GNT 0/80 de 50 cm d'épaisseur

Fourniture et transport de la GNT : 11,78 €/T

Mise en œuvre avec niveleuse et compacteur :

1,03 €/m² (pour 50 cm) (masse volumique GNT : 1,8 T/m³)