



المدرسة الحسنية للأشغال العمومية
ECOLE HASSANIA DES TRAVAUX PUBLICS

Géotechnique routière.

Cours pour la filière Génie Logistique et Transports de l'EHTP

Année académique : 2022/2023

Animé par :

Abdelmalek TAMIM , Ingénieur routier sénior et formateur – Gérant de Pi Conseil



www.cours-genie-civil.com

Plan du cours

1. Introduction à la géotechnique routière;
2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement;
3. L'étude géotechnique routière;
4. Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai;
5. Les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme;
6. Le compactage des remblais et des couches de forme;
7. Le contrôle de compactage.

I. Introduction à la géotechnique routière

La géotechnique routière est une discipline à l'interface de plusieurs domaines , notamment :

- La mécanique des sols;
- La géotechnique;
- La géologie;
- L'hydraulique;
- L'ingénierie routière.

Son objectif est de permettre à l'ingénieur de mieux appréhender le comportement des sols et roches qui entrent dans la réalisation des projets routiers : remblais/déblais/couches de formes....

I. Introduction à la géotechnique routière



Le manque de maîtrise de cette discipline pourrait conduire à des pathologies des routes de type : glissement de versants, tassements , sous dimensionnement des arases...

I. Introduction à la géotechnique routière

Les principaux documents de bases qui s'intéressent à la géotechnique routière sont :

- Catalogue Marocain des Structures de Chaussées Neuves (1995);
- Guide Marocain des Terrassements Routiers (GMTR) (2001);
- Guide pour les études de géotechnique routier relatif aux plates-formes et aux chaussées (volume : II à l'usage des géotechniciens);

Les documents les plus importants sont le GMTR et le Catalogue des Structures de Chaussées.

I. Introduction à la géotechnique routière

Le GMTR a pour thème général les conditions d'utilisation des sols en remblai et en couches de formes.

Il traite également d'autres sujets importants, tels que :

- La classification des sols;
- Le contrôle de compactage des remblais et couches de formes;
- L'exécution des remblais particuliers (zone inondable, remblais contigus..);
- Le compactage à sec....

I. Introduction à la géotechnique routière

Le Catalogue de Structures de Chaussées est un document qui permet le dimensionnement des structures de chaussées à partir des données de bases, à savoir :

- La géotechnique ;
- L'environnement;
- Le drainage ;
- Le trafic.

Le dimensionnement pourrait être fait via d'autres méthodes internationales, dans des cas particuliers, telles que : AASHTO (USA) ou ALIZÉ-LCPC (France).

2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement

L'ancienne classification des sols dite LPC consistait en deux grandes classes :

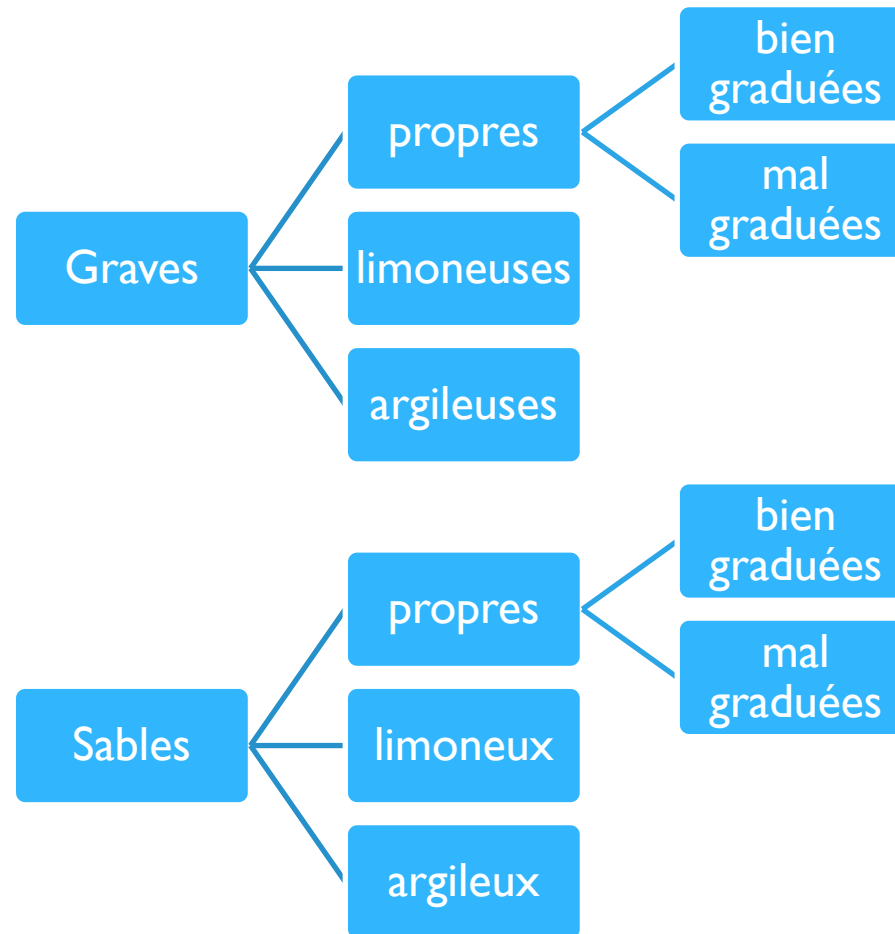
Graves et Sables.

Puis selon le % des fines les graves et sables sont classés : propres, argileux ou limoneux.

Les graves et sables propres sont classées en « bien » ou « mal » graduées selon la forme des courbes granulométriques.



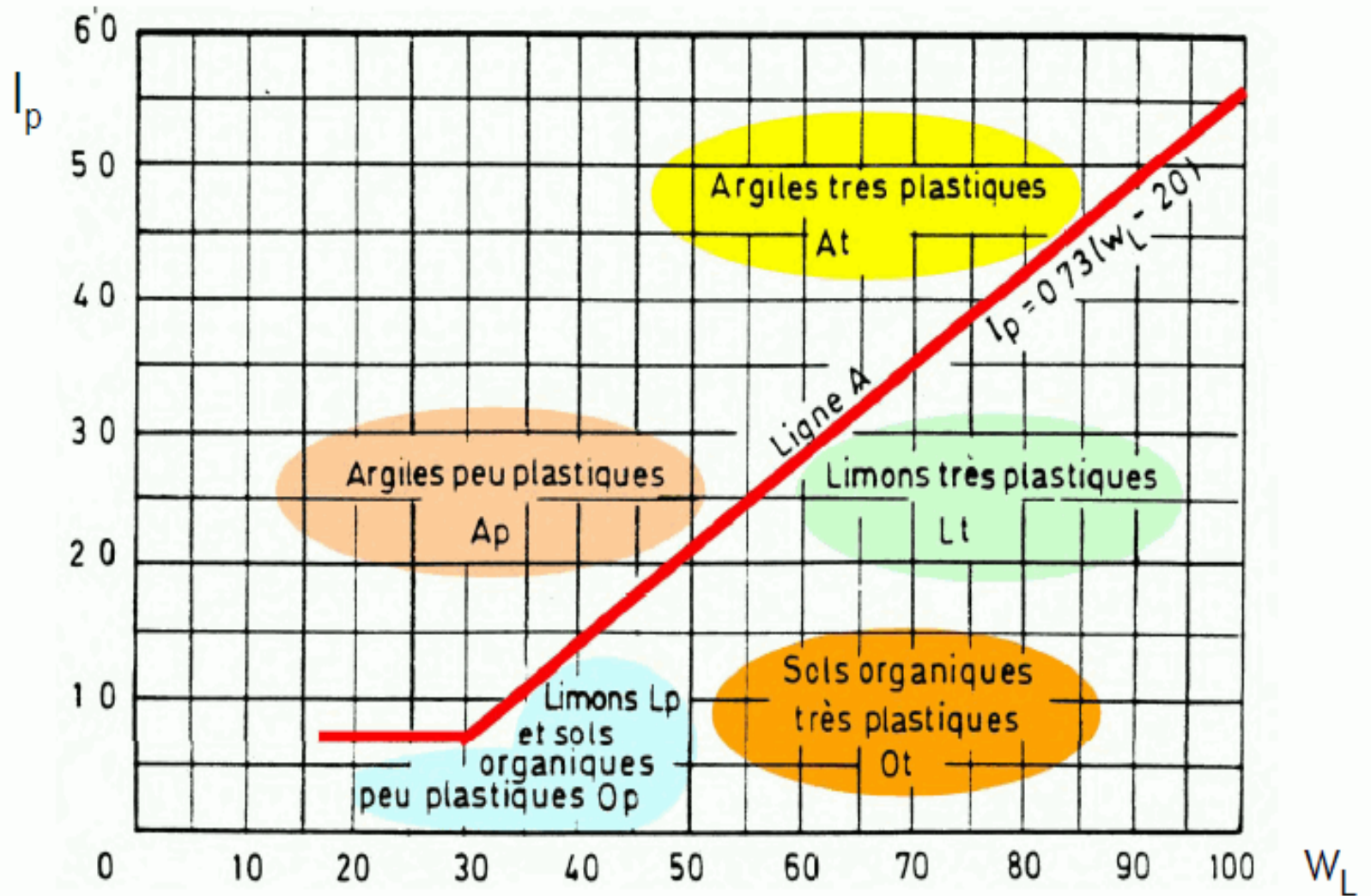
2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement



2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement

Définitions		Symboles	Conditions	Désignation géotechnique
GRAVES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre > 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ (*) et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	grave propre bien graduée
			Une des conditions de Gb non satisfaite	grave propre mal graduée
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A (fig. 2)	grave limoneuse
			Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	grave argileuse
SABLES	Plus de 50 % des éléments > 0,08 mm ont un diamètre < 2 mm	moins de 5 % d'éléments < 0,08 mm	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ et $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ compris entre 1 et 3	sable propre bien gradué
			Une des conditions de Sb non satisfaite	sable propre mal gradué
		plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Limite d'Atterberg au-dessous de la ligne A	sable limoneux
			Limite d'Atterberg au-dessus de la ligne A	sable argileux

2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement

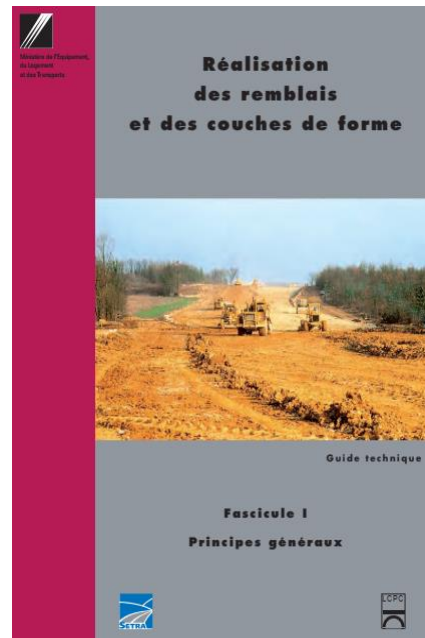


2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement

Cependant , cette classification a montré ses limites et on a basculé au début vers la classification RTR (Recommandations pour les Terrassements Routiers) vers 1976.

Puis depuis 1992 le RTR a été remplacé par « le guide de réalisation des remblais et des couches de forme » communément appelé GTR.

Le GMTR étant largement inspiré sur GTR, la classification GMTR est donc en grande partie celle du GTR (à quelques modifications près).



2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement

La classification GMTR a retenu les classes ::

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

Elle est complétée par l'introduction de :

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

2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement

Les paramètres de classification des sols meubles

Les paramètres de nature : qui se rapportent aux caractéristiques intrinsèques des sols. Ces caractéristiques ne varient pas au cours des différentes manipulations que subit le sol.

Ces paramètres retenus concernent la granularité et l'argilosité. En ce qui concerne l'argilosité, les paramètres sont : l'indice de plasticité (IP) et la valeur de bleu de méthylène (VBS). La V.B.S caractérise mieux les sols les moins argileux, l'indice de plasticité (IP) caractérise mieux les sols moyennement à très argileux.

2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement

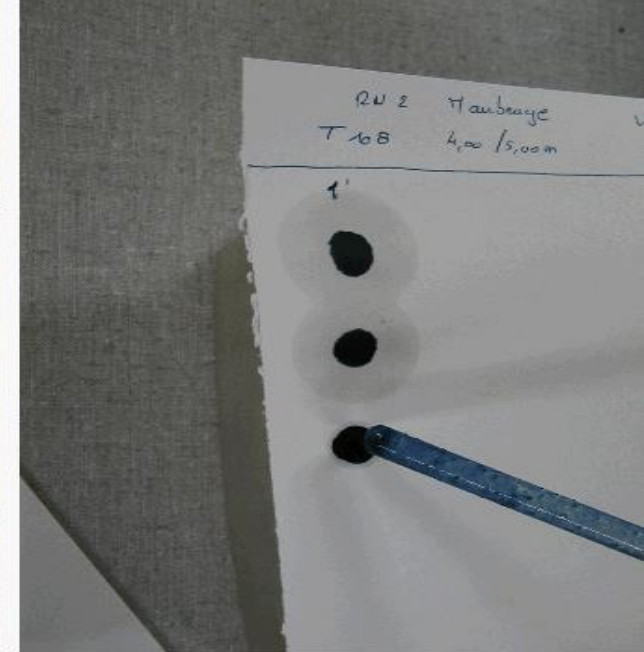




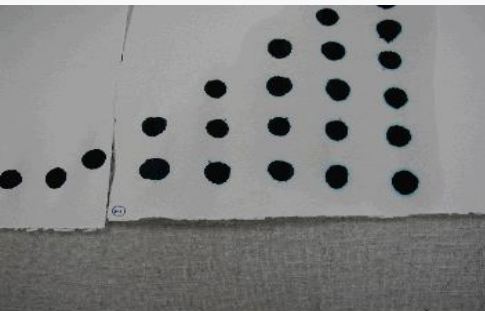
**Ajouts successifs
de bleu**



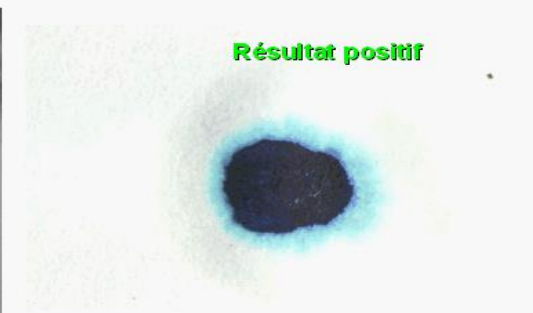
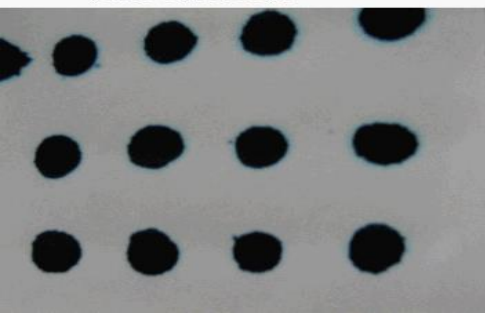
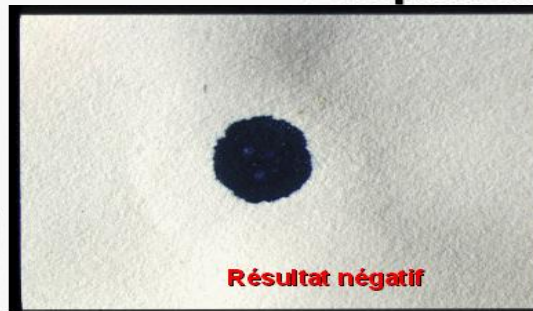
**Prélèvement
d'une goutte de
suspension**



**Dépôt sur papier
filtre**



Tests successifs



2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement

Les paramètres de classification des sols meubles

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

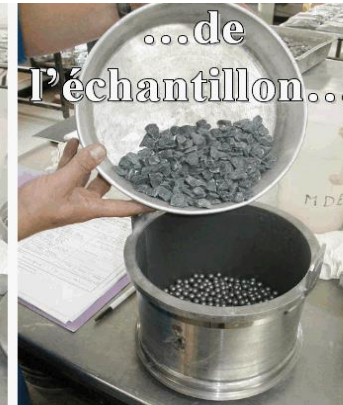
Mise en place
du granulat....



.... et des boulets



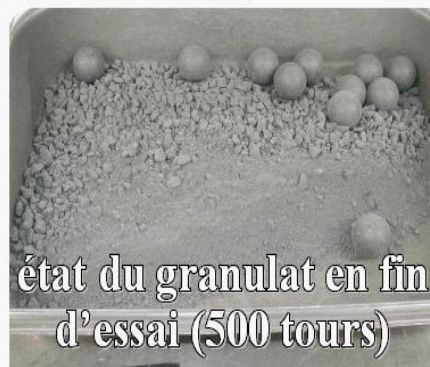
Mise en place
de la charge
abrasive....



...de
l'échantillon...



et de l'eau



état du granulat en fin
d'essai (500 tours)



2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement

Les paramètres de classification des sols meubles

Les paramètres d'état : qui caractérisent l'état hydrique d'un sol. Les paramètres généralement retenus sont :

- ❑ La valeur de la teneur en eau naturelle par rapport à celle mesurée à l'optimum Proctor
- ❑ L'indice portant Immédiat (IPI), ce dernier est réalisé sans surcharge, ni immersion sur une éprouvette de sol compacté à l'énergie Proctor Normal et à sa teneur en eau naturelle. Il caractérise la traficabilité du sol pendant les travaux de mise en œuvre.
- ❑ L'indice de consistance I_c :

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

où :

W_l : limite de liquidité

W_n : teneur en eau naturelle du sol

IP : indice de plasticité

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

2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement

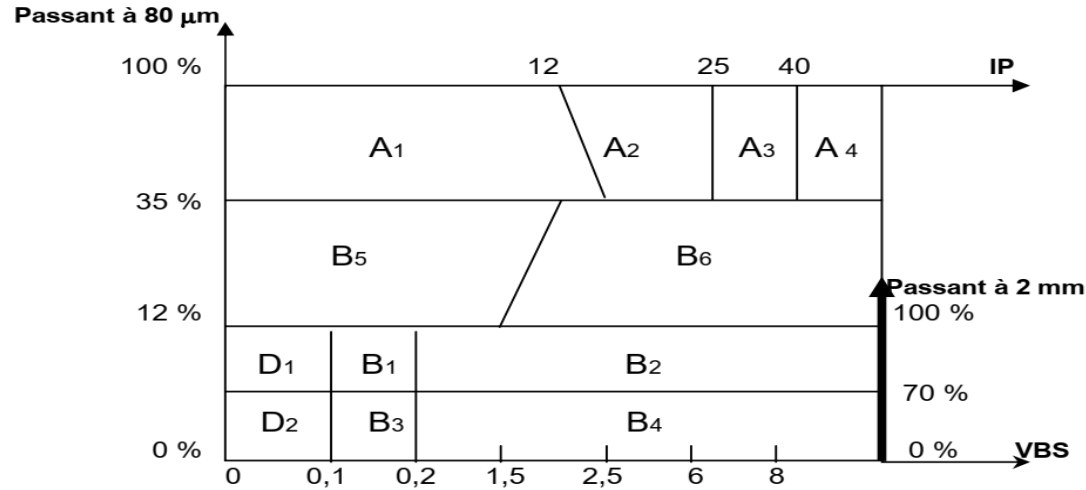
La sensibilité à l'eau:

C'est une notion très cruciale dans l'étude des sols meubles. Elle caractérise la manière dont la portance d'un sol est affectée par la variation de sa teneur en eau.

Pour les sols peu plastiques : la sensibilité à l'eau est plus importante puisque la chute de portance est presque immédiate. L'essai IPI permet d'évaluer leur portance immédiate en chantier.

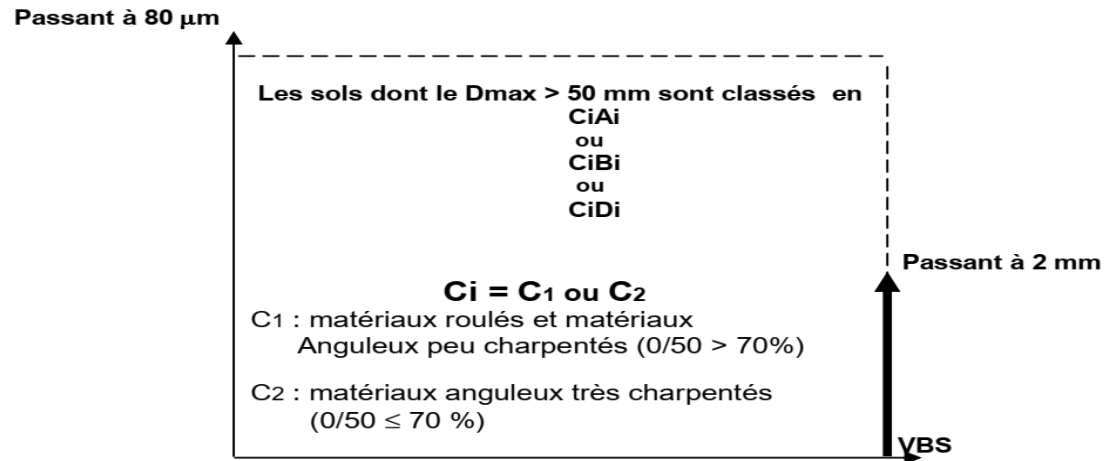
Pour les sols très plastiques : la variation de portance est lente, mais avec des impacts très graves. Leur portance est évaluée par l'essai CBR après immersion.

CLASSIFICATION GMTR DES SOLS MEUBLES



- Les A_i et/ou B_i peuvent être parfois :
 - \Rightarrow des tufs fortement carbonatés TcA_i ou TcB_i si $CaCo_3 > 70\%$
 - \Rightarrow des tufs faiblement carbonatés TfA_i ou TfB_i si $50\% \leq CaCo_3 \leq 70\%$
- Les A_3 et les A_4 peuvent être parfois :
 - \Rightarrow des tirsés dont : $WI - Wr > 42$ avec $WI > 53$ et $Wr < 13$

Classification détaillée



2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement

Sols triseux:

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

- L'indice d'instabilité volumétrique : $WI - W_r > 42$ avec

WI (limite de liquidité) > 53

W_r (limite de retrait) < 13

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

TxA3 : pour les sols avec $I_p \leq 40$

TxA4 : pour les sols avec $I_p > 40$

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



2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement

Sols tuffacés:

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

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

L'élément prédominant qui caractérise ce comportement est le taux de carbonate de calcium (CaCO_3).

La classification se fera sur la bases du taux de CaCO_3 :

Si $50 \% < \text{CaCO}_3 < 70 \%$: tuf faiblement carbonaté Tf

Si $\text{CaCO}_3 > 70 \%$: tuf fortement carbonaté Tc

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

Soit : TfAi ou TfBi

Soit : TcAi ou TcBi

Selon que le sol est classé en Ai ou Bi

2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement

La classifications des roches

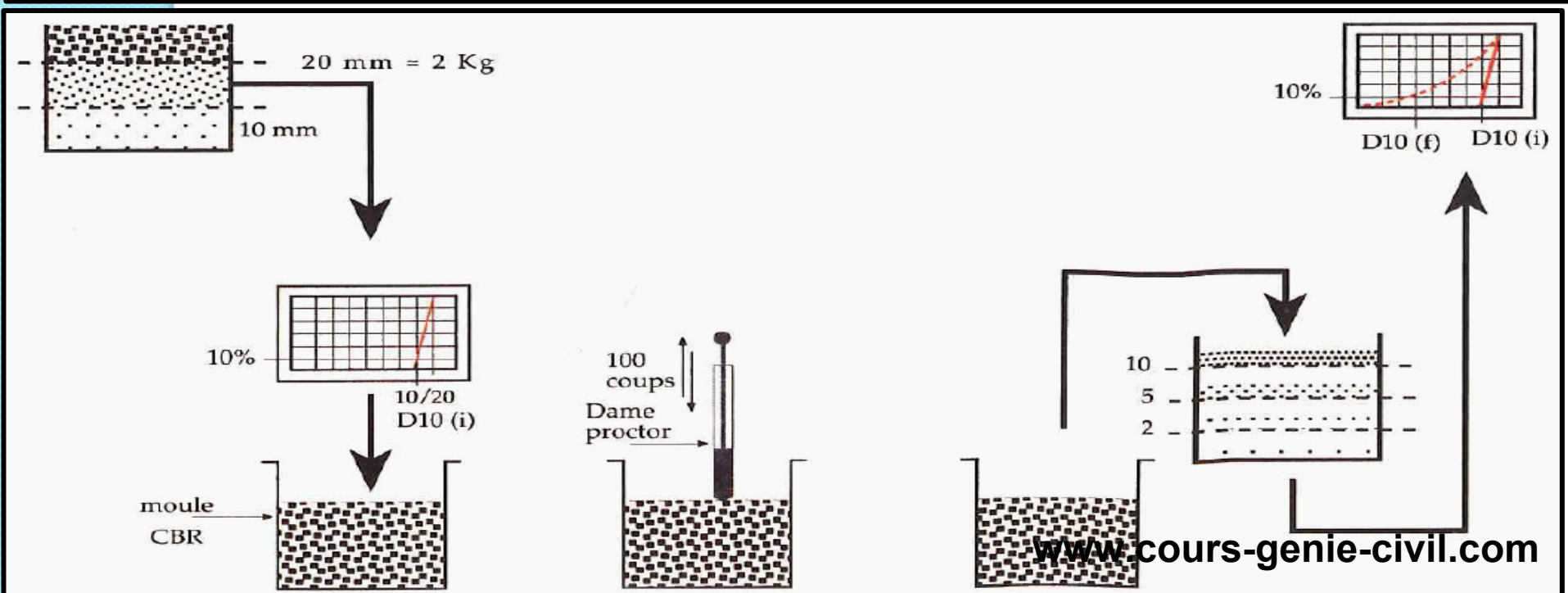
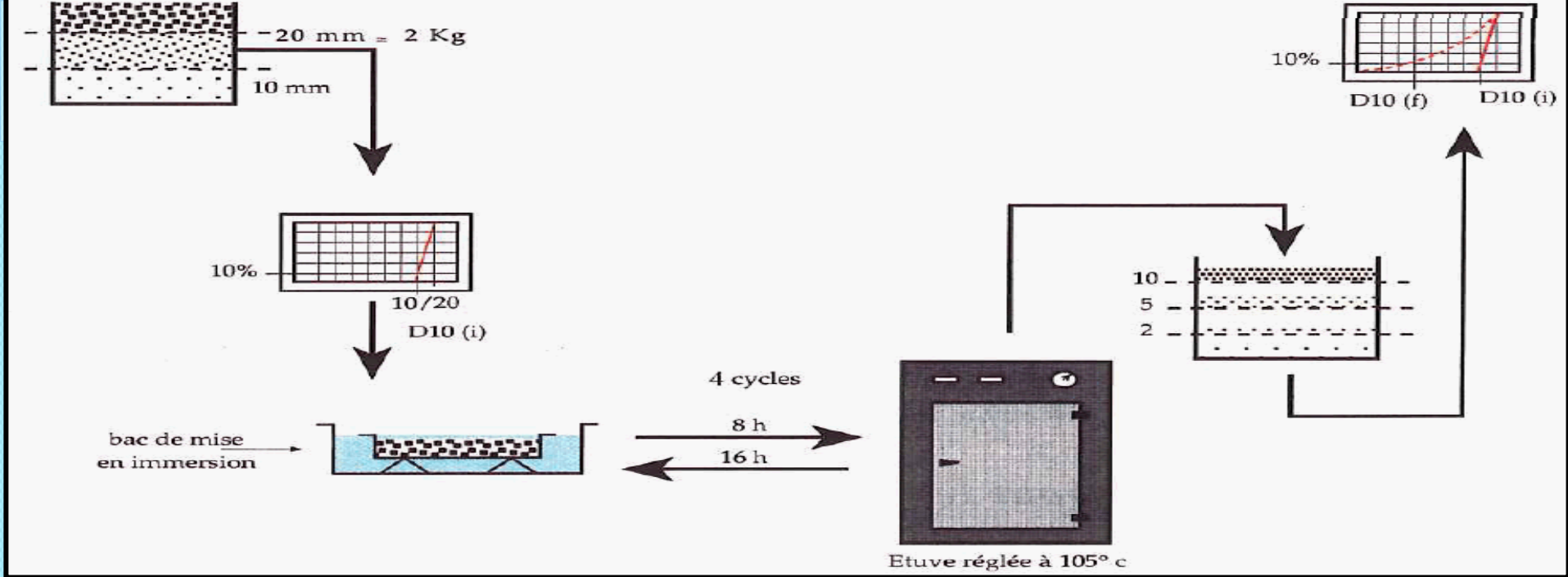
La classification des roches, dans le cas général, se fera de la manière suivante :

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

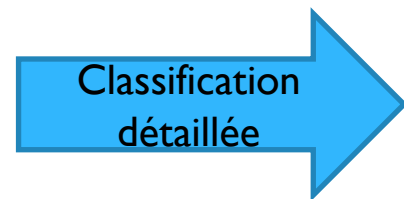
La nature pétrographique permet de distinguer deux classes de matériaux rocheux :

- Les roches sédimentaires
- Les roches magmatiques et métamorphiques

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



Roches Sédimentaires	Roches carbonatées	- Craies	R ₁
		- Grès calcaire - Calcarénite - Encroûtements calcaires - Calcaires marneux - Calcschistes - Calcaires durs - Calcaires dolomitiques	R ₂
	Roches argileuses	- Marnes - Schistes sédimentaires - Flyschs marneux - Argilites - Pelites	R ₃
	Roches siliceuses	- Grès argileux - Grès siliceux - Poudings - Brèches	R ₄
	Roches salines	- Gypse - Gypse marneux - Sel gemme	R ₅
Roches Magmatiques et Métamorphiques	<ul style="list-style-type: none"> - Granite - Basalte - Diorite - Quartzite Autres roches éruptives et métamorphiques dures		R ₆



2. Classification des sols et des roches pour travaux de terrassement

La classifications des sols organiques et sous-produits industriels :

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

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

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

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

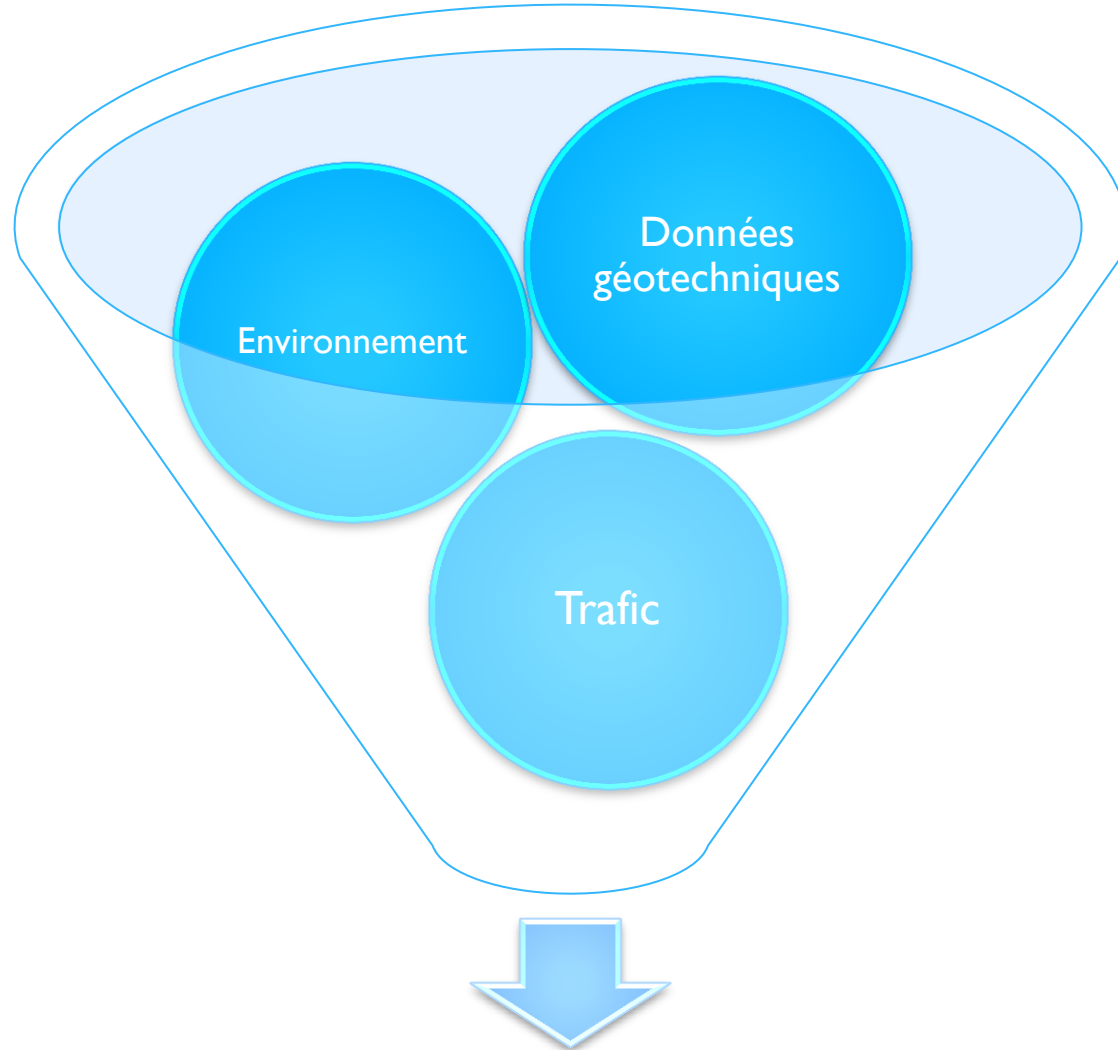
F3 : sous-classe relative aux déchets de phosphates.

F4 : sous-classe relative aux pouzzolanes.

F5 : sous-classe relative aux matériaux de démolition.

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

3. L'étude géotechnique routière



Structure de chaussée+ dispositions constructives (pentes des talus, mise en œuvre , propriétés des matériaux...)

3. L'étude géotechnique routière

Déroulement de l'étude géotechnique :

Trafic :

À partir des données de comptage publiées par le MEE on dégage le nombre de PL >8T et on calcule l'agressivité du trafic.

Le résultat final de cette étape est le NEEC (I3T) qui nous renseigne sur la classe de trafic :TPL1 à TPL6

Géotechnique :

Des sondages sont effectués pour permettre la reconnaissance de la PST.

Les essais d'identifications permettent la classification GMTR du sol.

Ensuite on peut établir une estimation de la classe de portance du sol : PI à P4 , sinon la détermination de la portance exacte est obtenu par l'essai CBR.

Environnement:

On doit avoir des données sur la zone climatique du projet (H, h, a ,d), sur la stabilité géotechnique de la zone et sur la qualité des dispositifs de drainage.

3. L'étude géotechnique routière

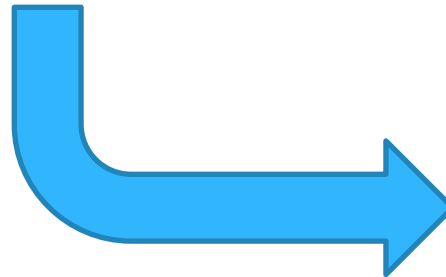
Déroulement de l'étude géotechnique :

Structure de chaussée :

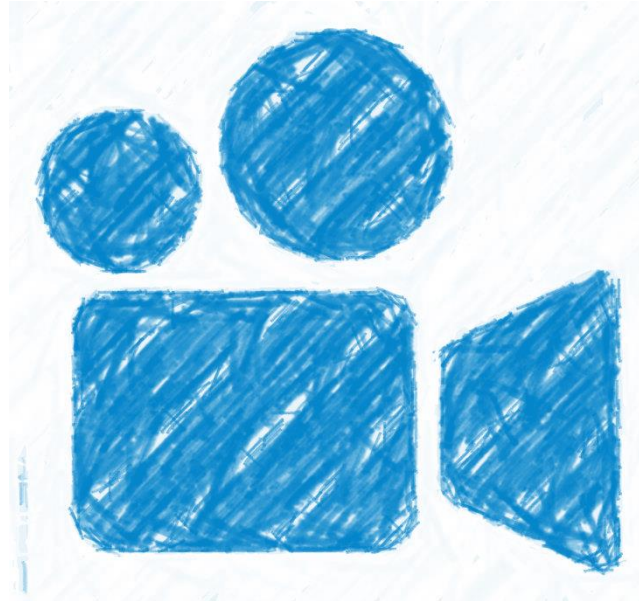
En se basant sur les données mentionnées ci-avant, le catalogue nous propose plusieurs variantes de corps de chaussée qui nécessitent l'utilisation de plusieurs types de matériaux.

Le choix définitif de la structure à utiliser est effectué sur la base des données économiques du projet et de la disponibilité des matériaux.

Exemple d'application



Les engins de terrassement:



4. Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai

4.1 : Remblais courants

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

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

- Viser **le niveau de qualité technique, juste nécessaire** compte tenu des **possibilités des matériels et techniques d'exécution dans le contexte marocain**.

- Etablir des solutions conformes au contexte technico-économique national.

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

4. Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai

4.1 : Remblais courants

Conditions générales :

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

Sols utilisables sans restriction:

- Les sols rocheux non évolutifs;
- Les sols fins A1 et A2;
- Tous les sols tuffacés Tc et Tf sauf ceux de type B1 , B2(VBS<1.5) et A4;
- Les sols grenus : B, D, CA, CB sauf :
 - D1, B1, CA3, CA4 et CB1;
 - B2 et CB2 lorsque leur VBS < 1.5

4. Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai

4.1 : Remblais courants

Sols utilisables avec restriction:

- Limitation de la hauteur de remblai à 8 m:
 - A3 et CA3;
- Couverture de protection anti-érosive d'épaisseur > 15 cm:
 - B1, B2 (VBS $< 1,5$), CB1, CB2, D1;
 - Tc et Tf de type B1 et B2 (VBS $< 1,5$).
- Traitement ou protection à définir par une étude spéciale de laboratoire pour :
 - Les roches évolutives;
 - Les sols tirseux .

4. Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai

4.1 : Remblais courants

Sols utilisables avec restriction:

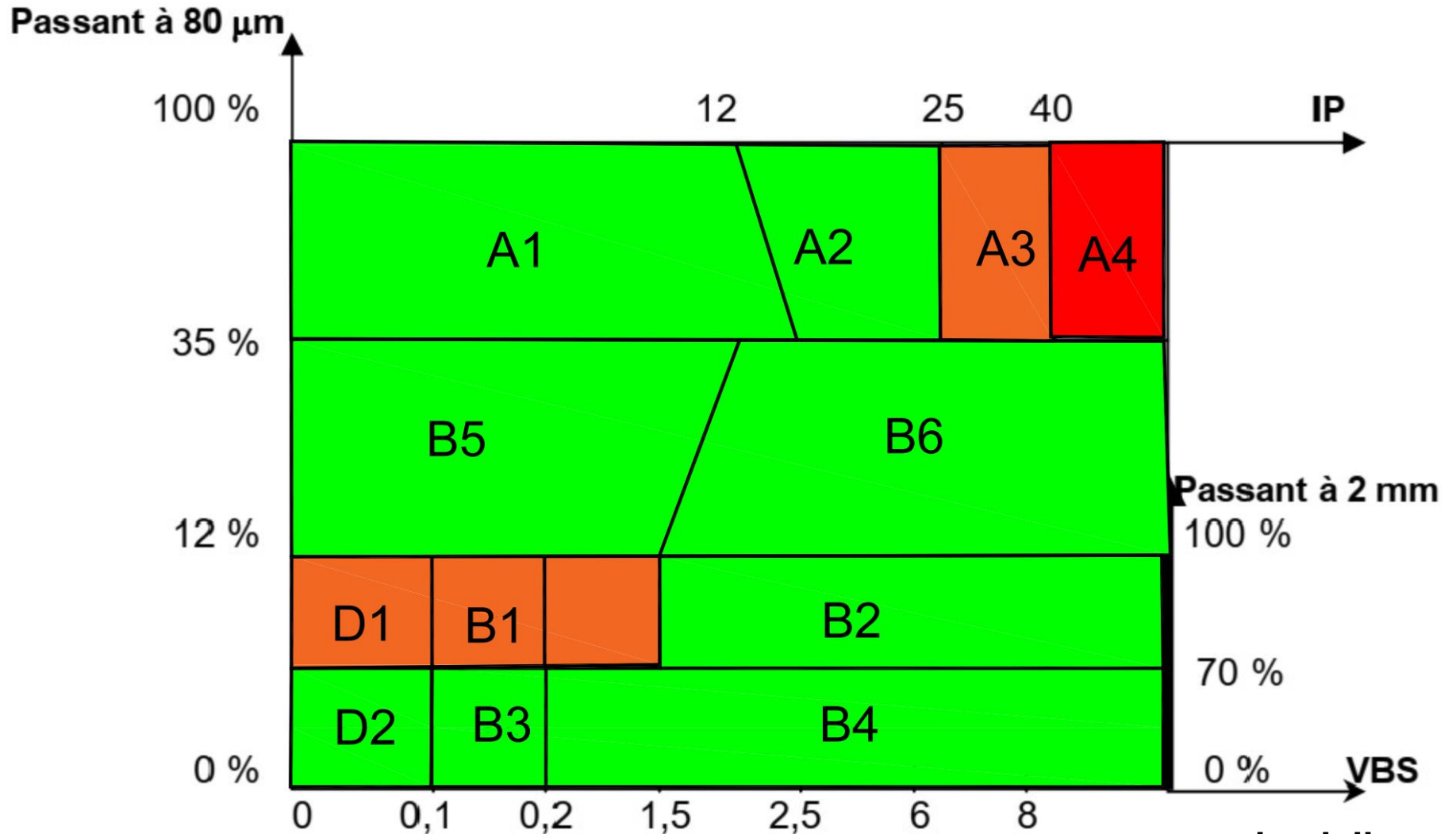
- Traitement à la chaux des sols trop humides au moment des travaux:
 - Si l'indice portant immédiat (IPI) ≤ 5 pour : A1, A2, A3, B2, B6;
 - Si l'IPI ≤ 12 pour B4 , B5 , CA1 , CA2 , CA3 , CB2, CB4, CB5 et CB6

Sols non utilisables:

- Les sols tireux sans traitement adéquat à définir (TxA3 et TxA4);
- Les sols de classe A4 ou CA4 sans traitement adéquat

4. Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai

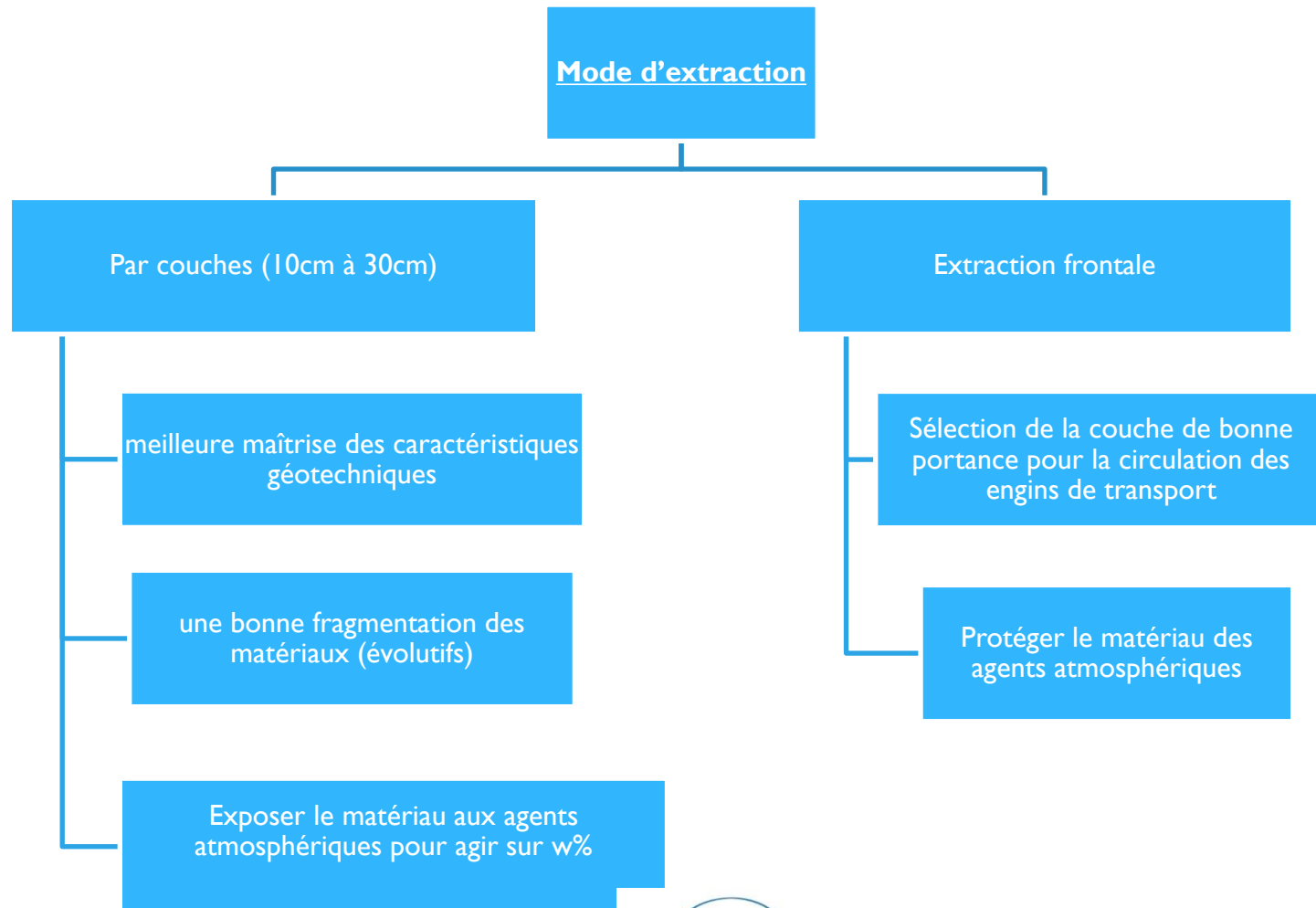
4.1 : Remblais courants



4. Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai

4.1 : Remblais courants

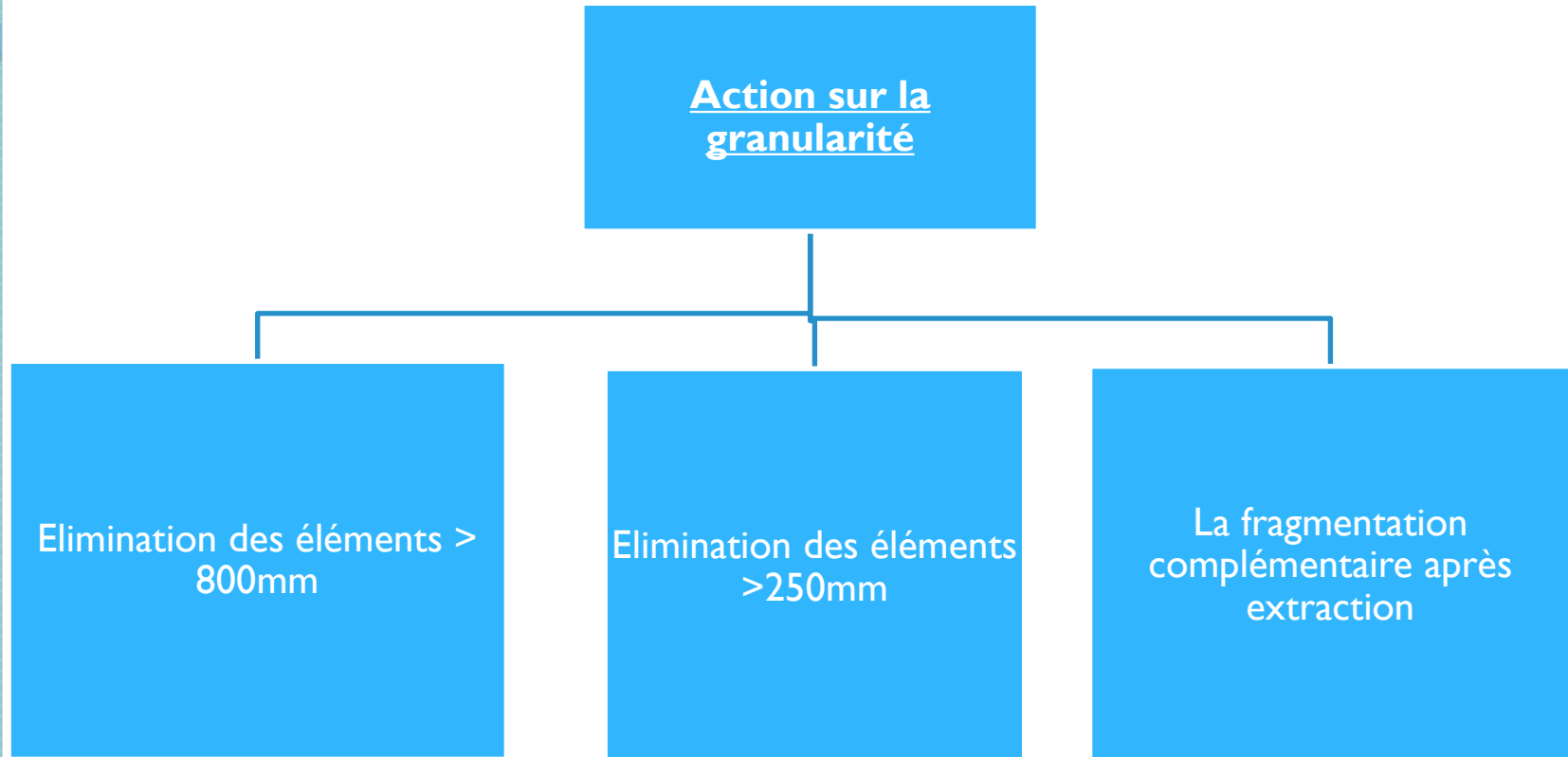
Les types de conditions d'utilisation:



4. Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai

4.1 : Remblais courants

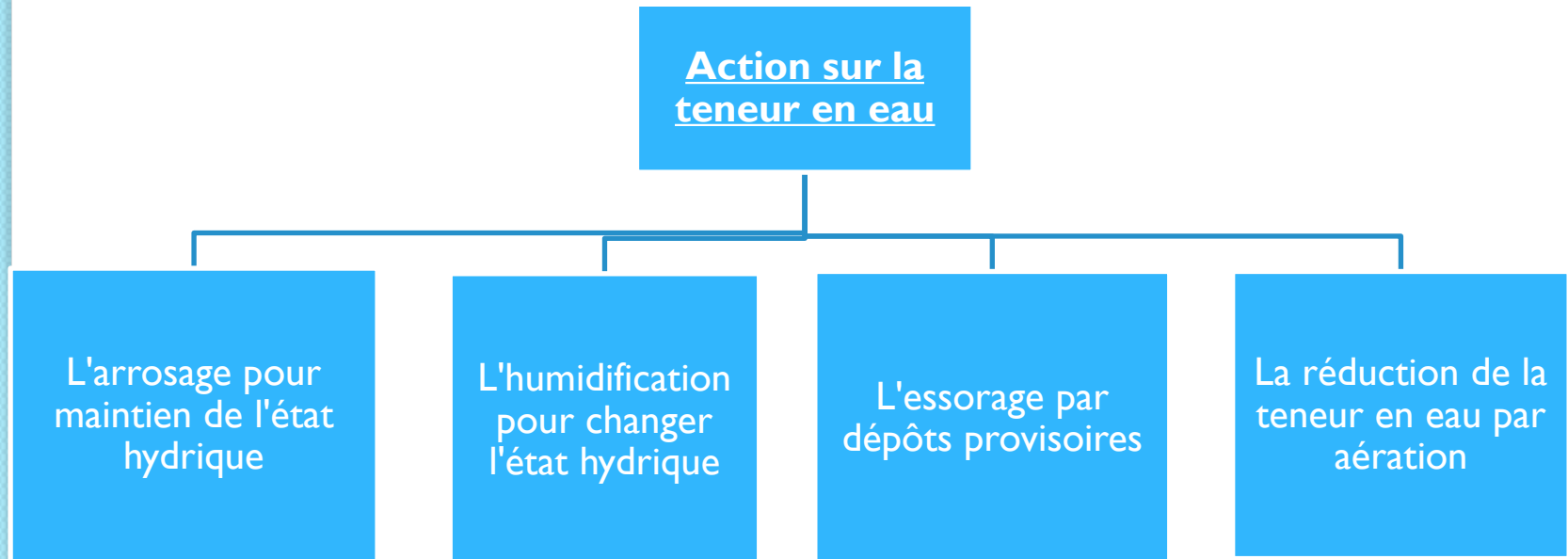
Les types de conditions d'utilisation:



4. Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai

4.1 : Remblais courants

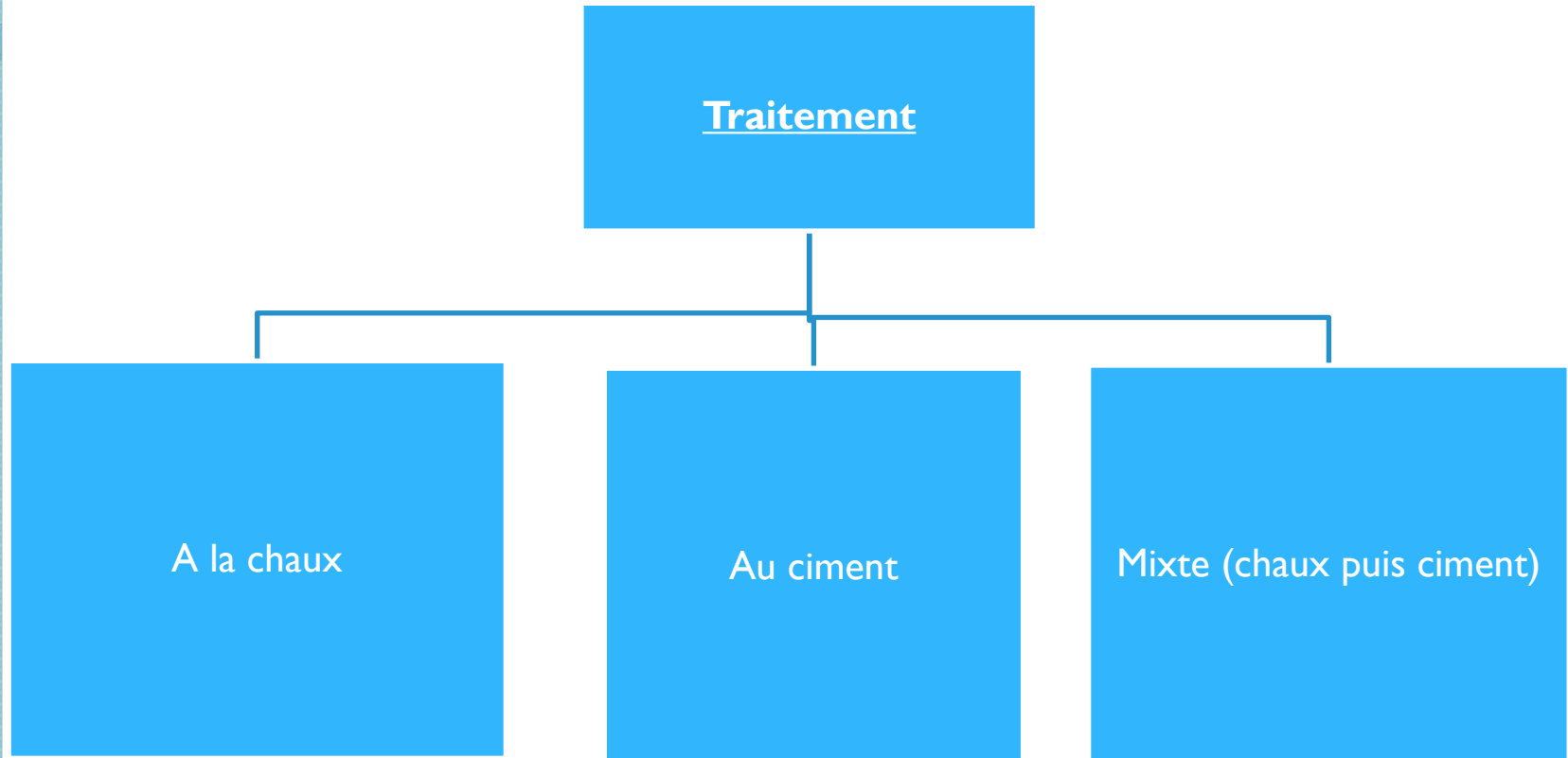
Les types de conditions d'utilisation:



4. Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai

4.1 : Remblais courants

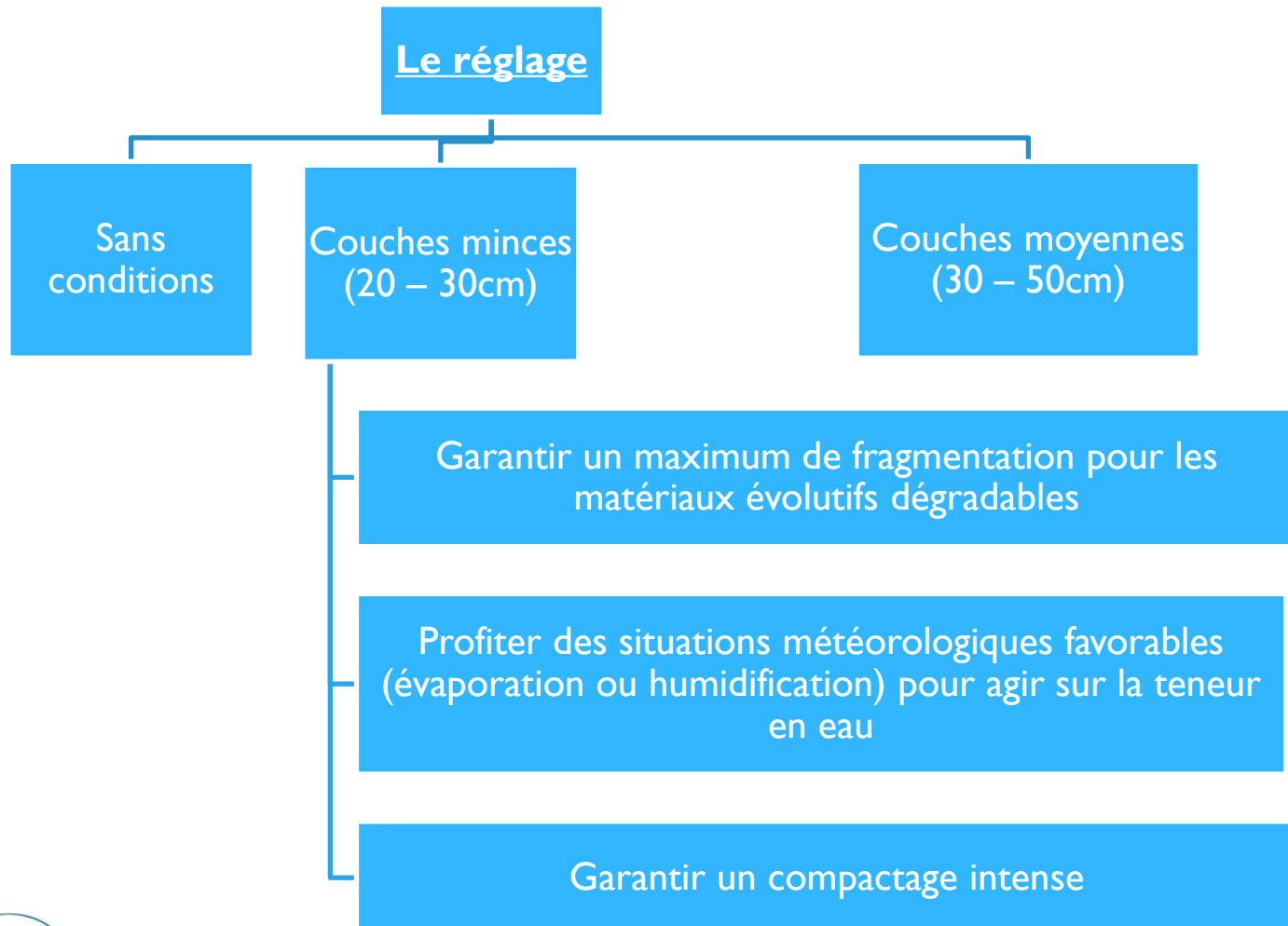
Les types de conditions d'utilisation:



4. Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai

4.1 : Remblais courants

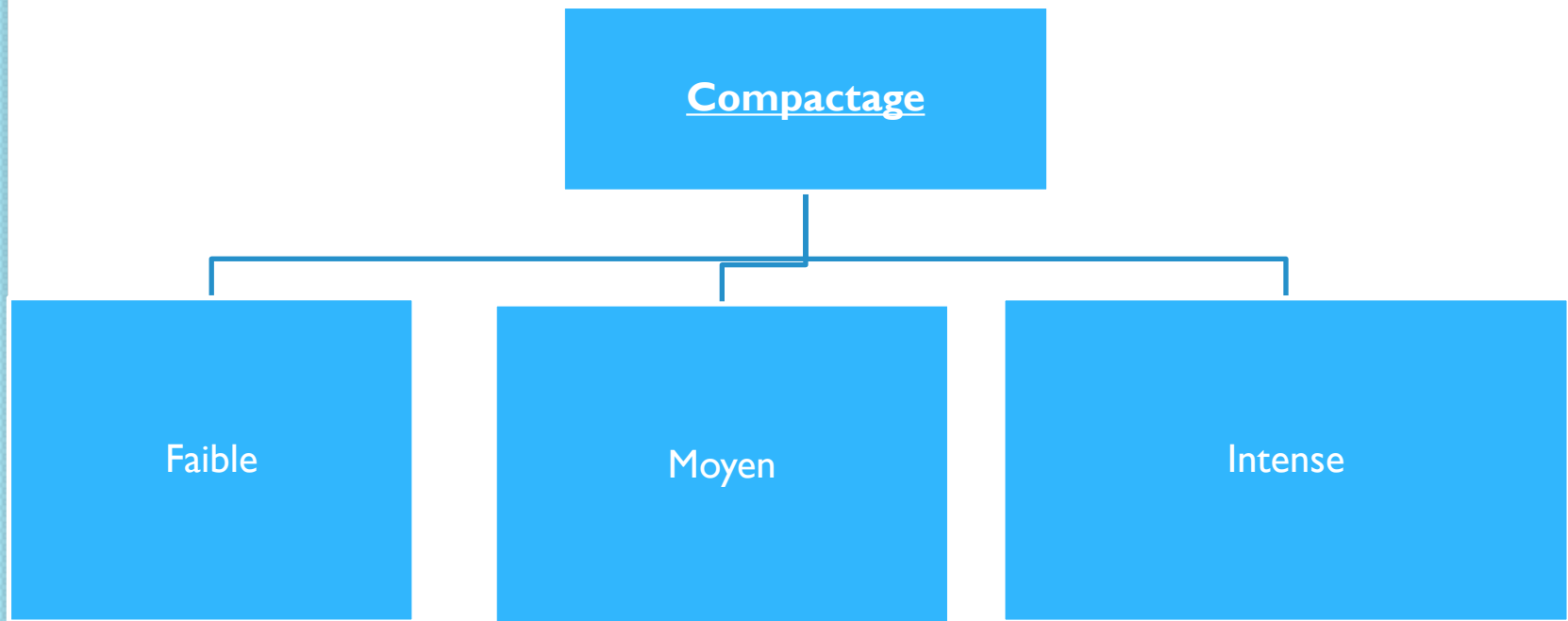
Les types de conditions d'utilisation:



4. Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai

4.1 : Remblais courants

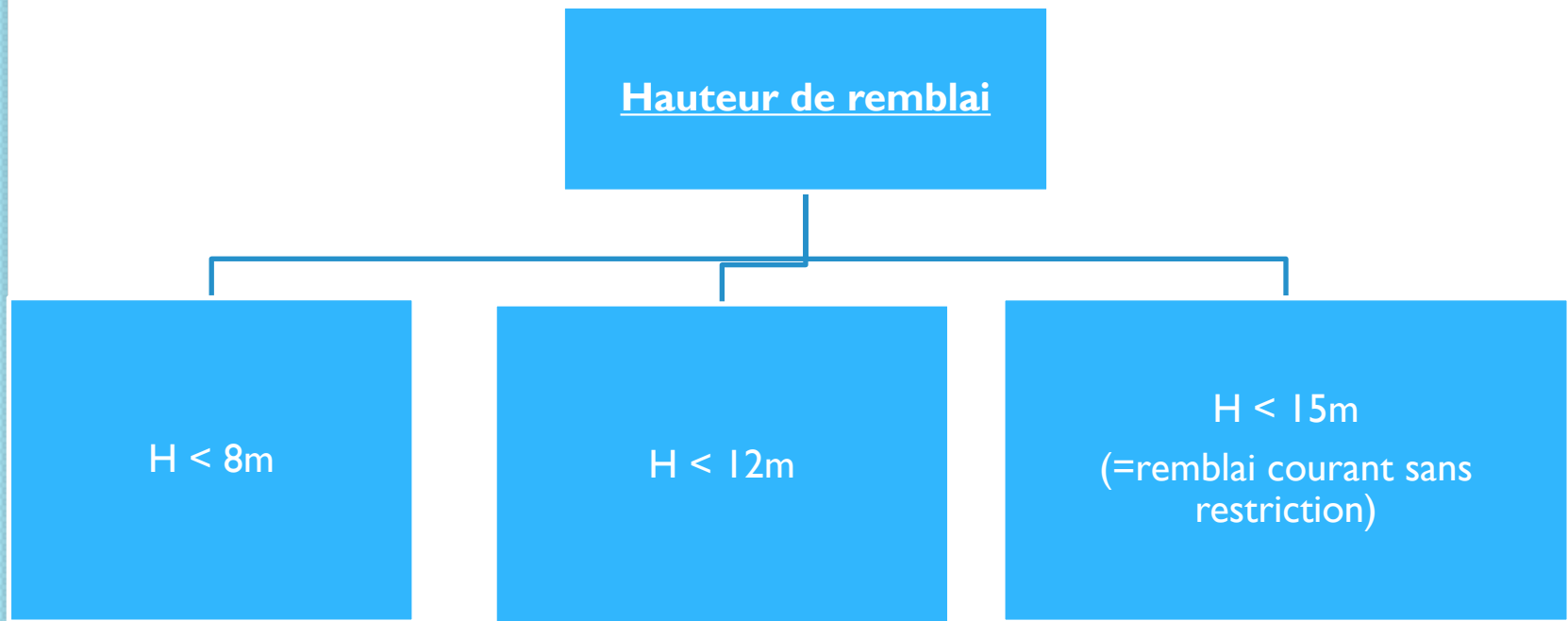
Les types de conditions d'utilisation:



4. Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai

4.1 : Remblais courants

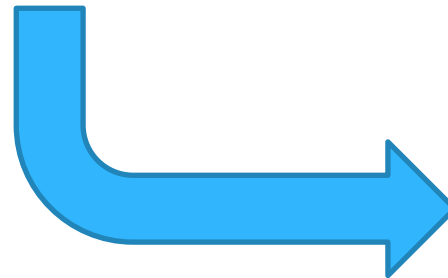
Les types de conditions d'utilisation:



Rubrique	Code	Conditions d'utilisations
E Extraction	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Extraction en couches (0,1 à 0,3 m)
	2	Extraction frontale .
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Elimination des éléments > 800 mm
	2	Elimination des éléments > 250 mm (ou 200 mm) pour traitement (ou utilisation en arase).
	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 (par brassage)
	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 ciment ou un traitement mixte.
	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(mais la hauteur ne dépasse pas 15 m).
	1	Remblai de hauteur faible (≤ 8 m)
	2	Remblai de hauteur moyenne (≤ 12 m)

Sol	Observations Générales	Situation Météorologique		Conditions d'utilisation en remblai	Code E G W T R C H
A_{3m} C_{1A_{3m}} C_{2A_{3m}}	La plasticité de ces sols entraîne pour les remblais des risques de glissement d'autant plus grands que les remblais sont élevés, même dans les meilleures conditions (w, météo de mise en œuvre).	++	Pluie forte	Situation ne permettant pas la mise en remblai avec des garanties de qualité suffisantes	NON
		+	Pluie faible	C : compactage moyen H : remblai de hauteur faible (≤ 8 m)	0 0 0 0 2 1
		=	Ni pluie ni évaporation importante	C : compactage moyen H : remblai de hauteur faible (≤ 8 m)	0 0 0 0 2 1
		-	Evaporation importante	W : arrosage superficiel pour maintien de l'état R : couches minces C : compactage moyen H : remblai de hauteur ≤ 8 m	0 0 3 0 1 2 1

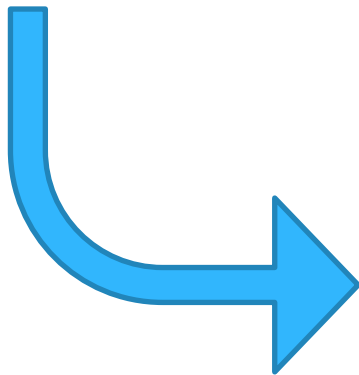
Fiches détaillées



4. Les conditions d'utilisation des matériaux en remblai

4.2 : Remblais particuliers

- Remblais en zone inondable;
- Remblais contigus aux ouvrages d'art;
- Remblais de grande hauteur.



*Des conditions et dispositions spéciales
qui seront traitées plus tard dans le cours.*

5. Les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme

La couche de forme est définie comme la structure d'adaptation réalisant l'interface entre la partie supérieure des terrassements PST (zone correspondant environ au mètre supérieur) et le corps de la chaussée.

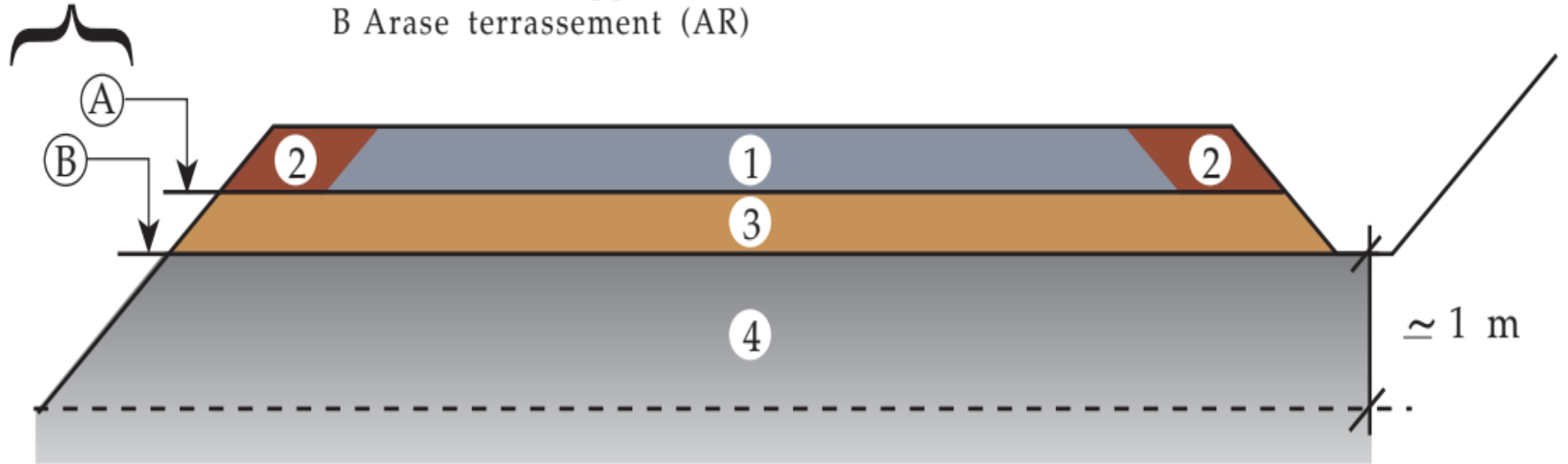
Sa conception résulte d'une réflexion renouvelée à chaque chantier pour prendre en compte ses spécificités. Les fonctions qu'elle doit remplir sont des fonctions à court terme et des fonctions à long terme.

5. Les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme

plates-formes

A Plate-forme support de chaussée (PF)

B Arase terrassement (AR)



1 Chaussée (couches de roulement, base et fondation)

2 Accotements

3 Couche de forme

4 Partie supérieure des terrassements PST : épaisseur d'environ 1m de sol naturel (section en déblai) ou de matériau rapporté (section en remblai) située sous la couche de forme.



5. Les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme

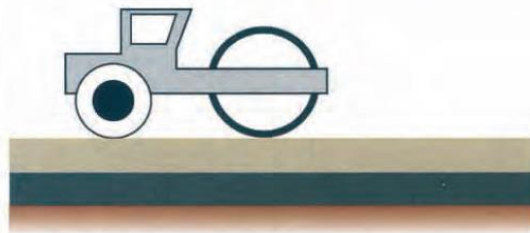
Les fonctions à court terme ont pour objectif d'assurer la mise en œuvre des couches de chaussée, selon les exigences de qualité requises. Ces exigences sont :

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

Les fonctions "à court terme" de la couche de forme



Assurer la **traficabilité** quasi tout temps des engins approvisionnant les matériaux de la couche de fondation.



Permettre le **compactage** efficace de la couche de fondation



PST en matériaux grossiers



PST en sol mou

Satisfaire les exigences de **nivellement** de la plate-forme support de chaussée.



Assurer la **protection** de l'arase terrassement vis à vis des agents climatiques dans l'attente de la réalisation de la chaussée.

5. Les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme

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

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

5. Les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme

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

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

5. Les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme

Matériaux utilisables en couche de forme:

Matériaux sans traitement	Trafic	Matériaux
	TPL6	<ul style="list-style-type: none"> • Les matériaux rocheux durs et non évolutifs de classes : R21, R41, R61. • Sols graveleux suivants : B31, D21, CD11, CD21, CB31. • Les sols B41, CB41 et CB51 avec $VBS < 0,25$
	TPL4/TPL5	<ul style="list-style-type: none"> • Les matériaux rocheux non évolutifs durs des classes : R21, R41, R61 • sols suivants: B31, D21, CD11, CD21, CB11, CB31 bien gradués. • Les sols B41, CB41, CB21, CB51, et TcB , avec $IP < 10$ ou $VBS < 0,5$
	< TPL3	<ul style="list-style-type: none"> • Les matériaux rocheux moyennement durs des classes R22, R42, R62 • Les sols : B32, Tfb3 , D22, CD12, CD22, B11, B12, CB12, CB32 • Les sols : TcA, Tfb4, B21, B22, B42, CB22, CB42, CB52 avec $IP < 10$ ou $VBS < 0,5$ • Les sols avec $CBR (95 OPM - 4jrs) > 20$

5. Les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme

Matériaux utilisables en couche de forme:

Matériaux traités à la chaux	Trafic	Matériaux
	\leq TPL5	Les sols A2 , A3 , CA2 et CA3

5. Les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme

Matériaux utilisables en couche de forme:

Matériaux traités aux liants hydrauliques	Trafic	Matériaux
	Tous trafics	<ul style="list-style-type: none">• Les sols de classes suivantes : A1, B1, B3, B5, D1, D2, CDI , TcA, TcB, TfA, TfB;• Les matériaux rocheux tendres non gypseux de classes R23, R24, R43, R63 qui présentent une VBS < 0,5

5. Les conditions d'utilisation des matériaux en couche de forme

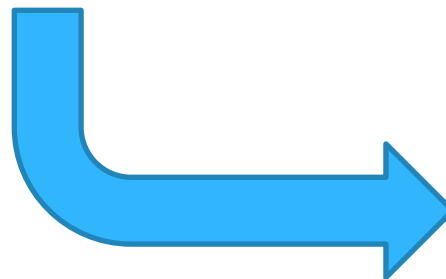
Matériaux utilisables en couche de forme:

Matériaux avec traitement mixte : chaux+ciment	Trafic	Matériaux
	Tous trafics	<ul style="list-style-type: none">• Les sols de classes suivantes : A1, A2, A3, B2, B4, B5, B6, les TcA, TfA, TcB, TfB correspondants, CA1 et CB;• Les matériaux rocheux tendres non gypseux qui présentent une VBS > 0.5 et de classes : R23, R24, R43, R63

Rubrique	Code	Techniques de préparation des matériaux
G Action sur la granularité	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Elimination de la fraction 0/d sensible à l'eau
	2	Elimination de la fraction grossière empêchant un malaxage correct du sol
	3	Elimination de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme
	4	Elimination de la fraction 0/d sensible à l'eau et de la fraction grossière empêchant un réglage correct de la plate-forme
	5	Fragmentation de la fraction grossière pour l'obtention d'éléments fins
W Action sur la teneur en eau	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Arrosage pour maintien de l'état hydrique
	2	Humidification pour changer d'état hydrique (très rare)
T Traitement	0	Pas de condition particulière à recommander
	1	Traitement avec un liant hydraulique
	2	Traitement avec un liant hydraulique éventuellement associé à la chaux
	3	Traitement mixte : chaux + liant hydraulique
	4	Traitement à la chaux seule
	5	Traitement avec un liant hydraulique et éventuellement un correcteur granulométrique
	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

Sol	Observations Générales	Situation Météorologique		Conditions d'utilisation en Couche de forme	Code G W T S
B₁	<p>Bien qu'insensibles à l'eau les sols de cette classe, sont néanmoins peu traficables du fait de leur finesse et de leur uniformité granulaire.</p> <p>Ils sont utilisables en l'état pour des trafics $T \leq TPL3$.</p>	++	Pluie forte	Situation météorologique ne garantissant pas une maîtrise suffisante de l'état hydrique du mélange sol + liant	NON
		+	Pluie faible	T : traitement avec un correcteur granulométrique ou utilisation en l'état pour $T \leq TPL3$	0 0 6 0
		= ou -	Pas de pluie	Solution 1 : trafic $T \leq TPL3$ T : traitement avec un correcteur granulométrique ou utilisation en l'état	0 0 6 0
				Solution 2 : Tous trafics W : arrosage pour maintien de l'état hydrique T : traitement avec un liant hydraulique associé éventuellement à un correcteur granulométrique S : application d'un enduit de cure gravillonné éventuellement clouté.	0 1 5 2

Fiches détaillées



6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.1 Objectifs du compactage:

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

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

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

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

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.1 Objectifs du compactage:

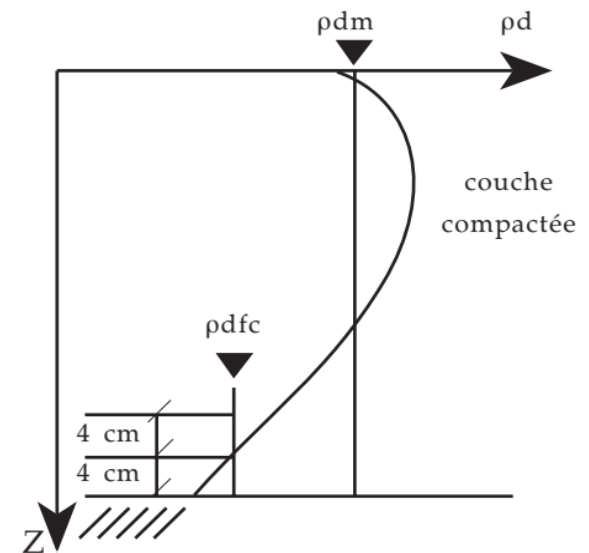
Sur chantier, l'expérience montre que :

- Le profil de la masse volumique ρ_d varie au sein de la couche compactée suivant la loi décrite par la figure ci-après : $\rho_d = f(Z)$

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

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

Variation de la masse volumique sèche sur la hauteur de la couche compactée.

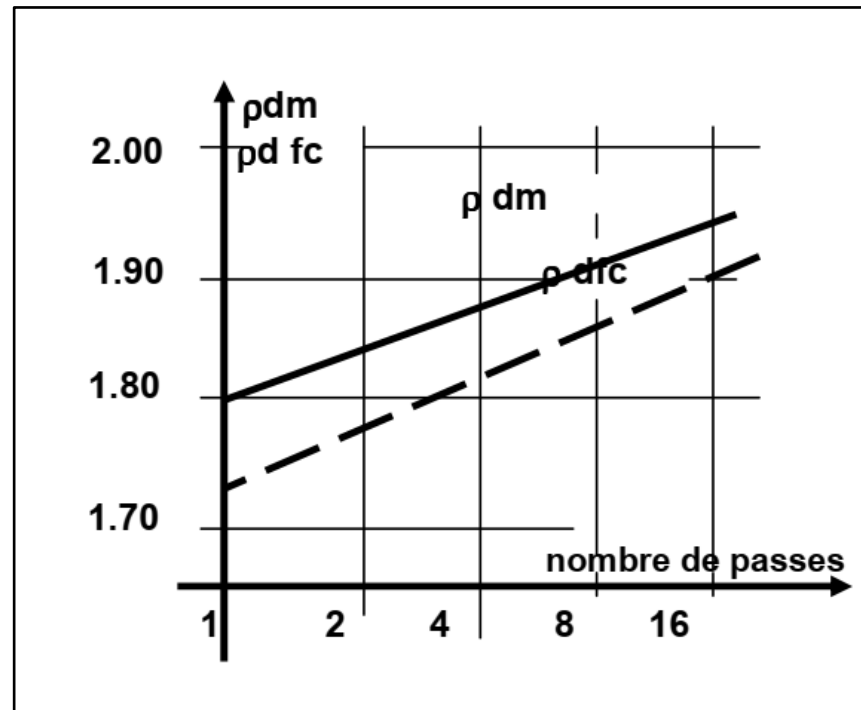


6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.1 Objectifs du compactage:

Sur chantier, l'expérience montre que :

- La masse volumique varie aussi en fonction du nombre de passes d'un compacteur suivant la loi du Logarithme : $\rho_d = A \cdot \log(n) + B$



6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.1 Objectifs du compactage:

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

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

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

- Pour les remblais (q4) :
 - ❖ $\rho_{dm} \geq 95 \% \text{ OPN}$
 - ❖ $\rho_{dfc} \geq 92 \% \text{ OPN}$
- Pour les couches de forme (q3) :
 - ❖ $\rho_{dm} \geq 98,5 \% \text{ OPN}$
 - ❖ $\rho_{dfc} \geq 96 \% \text{ OPN}$

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.1 Objectifs du compactage:

Ces prescriptions ont été fixées à partir de nombreuses planches expérimentales accompagnées de mesures précises et répétées de la masse volumique en place, de l'observation du comportement d'ouvrages et d'un modèle mathématique calé sur ces données.

Ce travail de rationalisation entrepris depuis la recommandation de 1976 a amené à réviser certaines exigences suite en particulier à des constatations répétées d'insuffisances marquées de compactage en fond de couche.

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.2 Engins de compactage :

Les différentes classes d'engins de compactage sont (Largeur ≥ 1.30 m) :

- Les rouleaux à pneus : Pi
- Les rouleaux vibrants à cylindres lisses : Vi
- Les rouleaux vibrants à pieds dameurs : VPi
- Les rouleaux statiques à pieds dameurs : SPi
- Les plaques vibrantes : Pqi
- Les rouleaux mixtes : Vmi-Pj

i est le n° de la classe ; il croît avec l'efficacité du compacteur à l'intérieur de chaque famille.

6. Le compactage des remblais et des couches de forme
6.2 Engins de compactage :



6. Le compactage des remblais et des couches de forme
6.2 Engins de compactage :



6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.2 Engins de compactage :



6. Le compactage des remblais et des couches de forme
6.2 Engins de compactage :



6. Le compactage des remblais et des couches de forme
6.2 Engins de compactage :



6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.2 Engins de compactage :



6. Le compactage des remblais et des couches de forme
6.2 Engins de compactage :



6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.2 Engins de compactage :

Rouleaux à pneus :

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

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

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.2 Engins de compactage :

Rouleaux vibrants à cylindres lisses :

Soit :

M_1 : La masse totale appliquée à la génératrice d'un cylindre (Kg)

L : Longueur de la génératrice d'un cylindre (cm)

A_0 : est l'amplitude théorique à vide (mm)

Le classement est effectué à partir du paramètre $\frac{M_1}{L} * \sqrt{A_0}$ et d'une valeur minimale pour A_0 .

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.2 Engins de compactage :

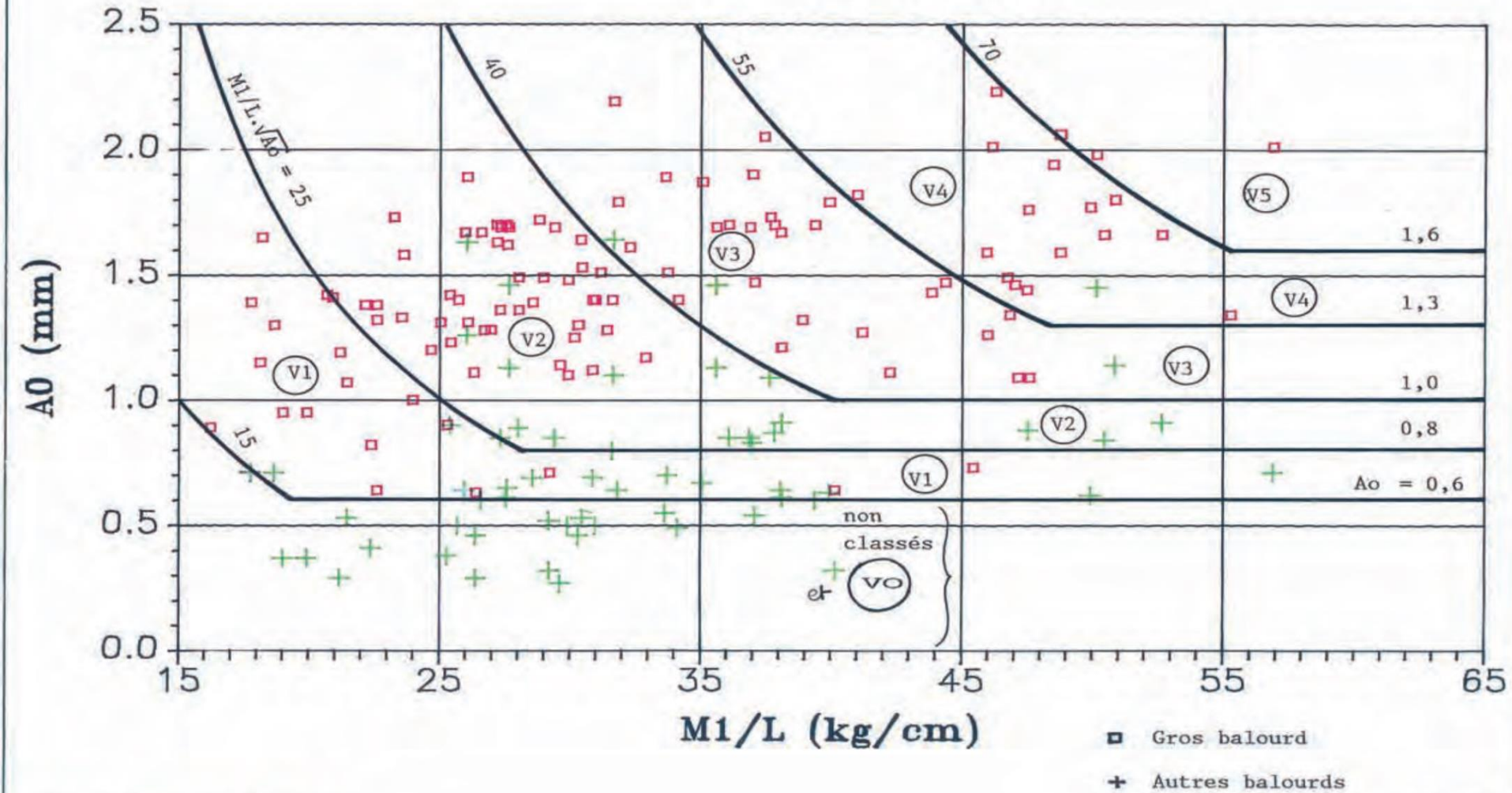
Rouleaux vibrants à cylindres lisses :

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

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.2 Engins de compactage :

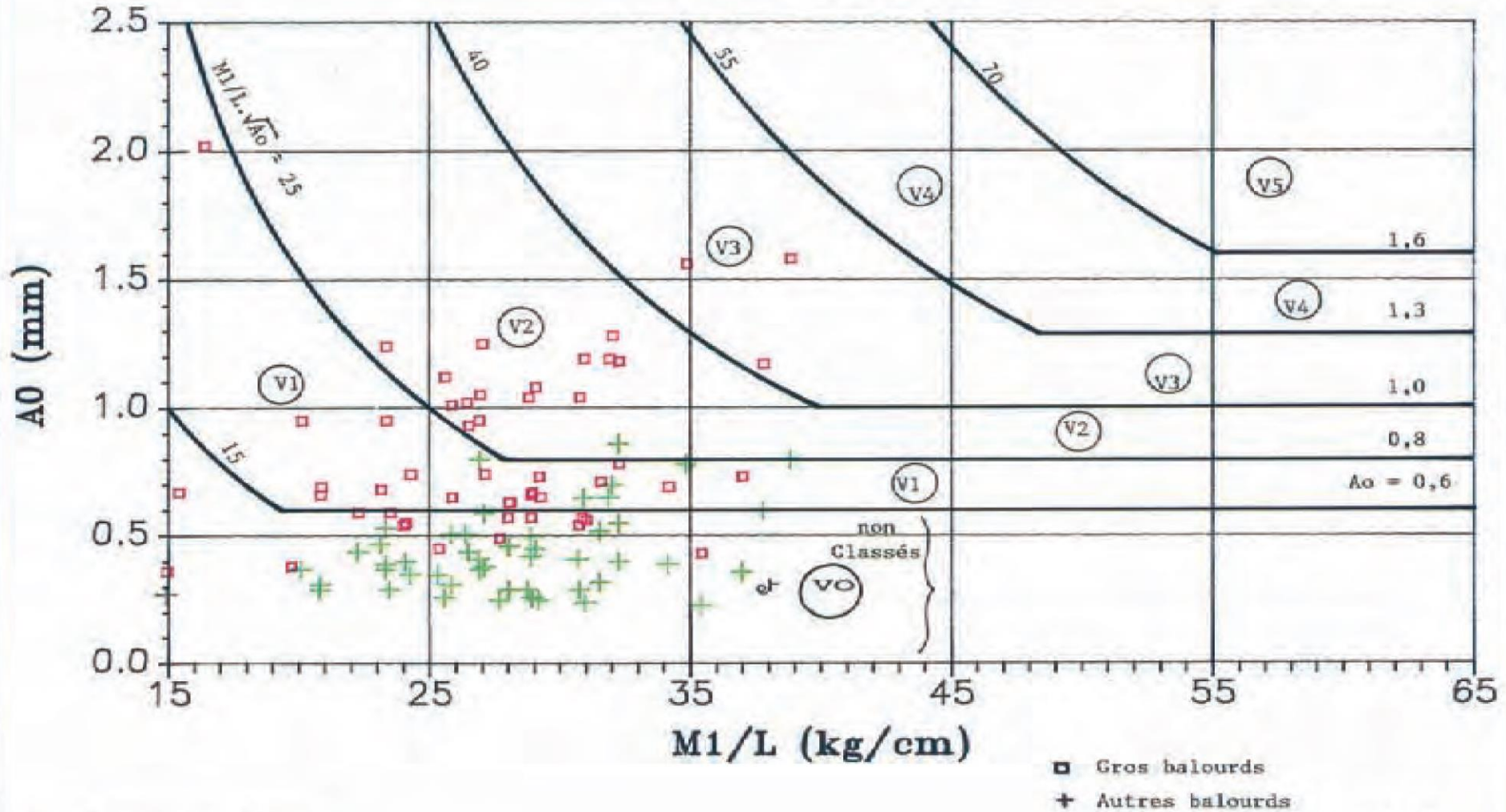
**CLASSEMENT DES COMPACTEURS VIBRANTS :
Monocylindres**



6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.2 Engins de compactage :

CLASSEMENT DES COMPACTEURS VIBRANTS :
Tandems



6. Le compactage des remblais et des couches de forme
6.2 Engins de compactage :



6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.2 Engins de compactage :

Les rouleaux vibrants à pieds dameurs:

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

Les rouleaux statiques à pieds dameurs:

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

- SPI : $30 \leq MI/L \leq 60$ kg/cm
- SP2 : $60 < MI/L < 90$ kg/cm

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.2 Engins de compactage :

Les plaques vibrantes:

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

PQ 3 : $10 \text{ KPa} \leq (M/S) < 15 \text{ KPa}$

PQ 4 : $15 \text{ KPa} < (M/S)$

Rouleaux mixtes:

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

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.3 Modalités du compactage :

○ Pour satisfaire les objectifs de compactage cités précédemment (§6.1), l'exploitation de plusieurs expériences a conduit à établir des fiches qui indiquent pour chaque couple : matériau / matériel , les modalités de compactage à suivre.

Ces modalités concernent , notamment , les paramètres essentiels :

- Q/S (en m^3/m^2)
- Épaisseur max (en m)
- Vitesse (Km/h)

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.3 Modalités du compactage :

Q/S:

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

D'un point de vue pratique, la valeur du paramètre 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** ; à ce titre, elle pourrait être dénommée : "**épaisseur unitaire de compactage**".

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

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

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.3 Modalités du compactage :

Epaisseur e :

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

Vitesse V:

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

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

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.3 Modalités du compactage :

Pour un matériau donné utilisable en remblai ou couche de forme, les tableaux présentent deux entrées :

- le type de compacteur
- les modalités de compactage.

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

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

N : le nombre d'application de la charge

Q/L : le débit par unité de largeur de compactage (en $m^3/h.m$)

Q/S : l'épaisseur unitaire de compactage (en m^3/m^2)

e : l'épaisseur maximale compactée (en m)

V : la vitesse de translation (en Km/h)

n : le nombre de passes avec 1 passe est un aller ou un retour du compacteur.

Notons que $n = N/2$ pour un tandem longitudinal et $n = N$ pour les compacteurs monocylindres et les compacteurs à pneus.

Cette vitesse constitue une moyenne pour un compacteur à pneus et un compacteur statique à pieds dameurs. Pour les compacteurs vibrants $V3$, $V4$ et $V5$ les tableaux donnent deux vitesses permettant d'optimiser le débit de l'atelier en fonction des conditions réelles du chantier.

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.3 Modalités du compactage :

Sols : A1 – C1A1 – TcA1 – TfA1

Compacteur		P1	P2	P3	V1	V2	V3		V4		V5		VP1	VP2	VP3	VP4	VP5	SP1	SP2	PQ3	PQ4
Modalités																					
Energie de compactage moyenne Code 2	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	0,25	0,30	0,40	0,30	0,50	0,30	0,60	0	0,25	0,30	0,30	0,30	0,20	0,30		0
	V	5,0	5,0	5,0		2,0	2,5	2,0	3,5	2,0	4,0	2,0		2,0	2,5	3,5	4,0	8,0	8,0		
	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 Code 1	Q/S		0,035	0,050		0,025	0,040		0,05	0,065			0,025	0,050	0,065	0,085			0,035		
	e		0,20	0,30	0	0,20		0,30	0,30	0,40	0,30	0,45	0	0,20	0,30	0,30	0,30		0,25		0
	V	0	5,0	5,0		2,0		2,0	2,5	2,0	3,0	2,0		2,0	2,0	2,5	3,0		8,0		0
	N		6	6		8		8	6	8	5	7		8	6	5	4		8		
	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 (m³/h.m)
0 compacteur ne convenant pas

(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 (rabottage des centimètres supérieurs, ou emploi d'un autre type de compacteur si celui-ci apporte l'effet souhaité).

D_{max} < 2/3 de l'épaisseur de la couche compactée.

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.4 Les planches d'essais pour remblai

Le recours aux planches d'essai doit rester exceptionnel et concerner principalement les cas suivants :

- compacteurs aux caractéristiques inconnus;
- sols relativement secs.
- matériaux très difficiles à compacter (angularité très élevée, granulométrie discontinue...),
- traitements particuliers,
- sols évolutifs dont le comportement reste mal apprécié,
- sous-produits industriels,

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.4 Les planches d'essais pour remblai

Elles peuvent alors servir à :

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

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

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.4 Les planches d'essais pour remblai

Choix du site :

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

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

- les types des engins de compactage (marque, classe, ...) ;
- le type de matériau (sa classe et autres renseignements) ;
- l'épaisseur de la couche après compactage ;
- les caractéristiques réelles des engins de compactage (fréquence, lestage, pression de gonflage) ;
- plan de balayage adopté pour chaque engin
- scénario des mouvements des engins qui composent l'atelier de compactage.
- Le nombre de passes.

6. Le compactage des remblais et des couches de forme

6.4 Les planches d'essais pour remblai

Les mesures à effectuer concernent :

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

7. Le contrôle de compactage (méthode Q/S)

Les aspects à contrôler sont:

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

7. Le contrôle de compactage (méthode Q/S)

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

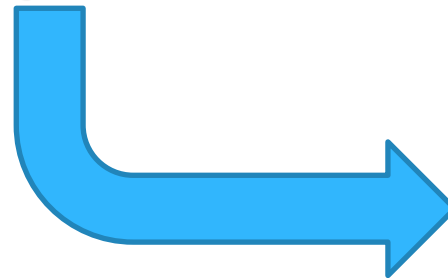
- les matériaux (identification en terme de nature et d'état) ;
- les compacteurs utilisés (leur classification) ;
- l'épaisseur des couches compactées ;
- les volumes de matériaux compactés (par séquence durant lesquelles les conditions de sols et de compactage sont considérées comme constantes) ;
- les surfaces balayées par les compacteurs ;
- les paramètres de fonctionnement des compacteurs (vitesse de translation, fréquence, moment des excentriques) ;
- le plan de balayage (la répartition uniforme du compactage dans le profil en travers notamment) et dans le cas de sols traités au ciment, le délai de maniabilité.

7. Le contrôle de compactage (méthode Q/S)

Spécifications du compactage

Niveau de compactage exigé	e	Q/S
Faible	$e(\text{mesurée}) = e(\text{prescrite}) \pm 15\%$	$Q/S(\text{mesuré}) = Q/S(\text{prescrit}) \pm 20\%$
Intense et moyen	$e(\text{mesurée}) \leq e(\text{prescrite})$	$Q/S(\text{mesuré}) \leq Q/S(\text{prescrit})$

Exemple de fiche Q/S



7. Le contrôle de compactage (méthode Q/S)

Exemple d'application :

- Matériau : CIB5 à l'état s;
- Météo : ni pluie , ni évaporation importante;
- Compacteur :V4;
- Energie de compactage intense;
- Q/S objectif : 0.055 – épaisseur max : 0.40 m – N =8;
- Volume mis en œuvre sur chantier : $e = 0.37$ m $S = 1444$ m²

Donc, la quantité compactée $Q = e \times S = 0.37 \times 1444 = 534.28$ m³

- Surface réellement balayée par le compacteur :

distance parcourue d (donnée par le tachygraphe) = 10,4 Km x Largeur utile du

compacteur = 2 m d'où $S = d \times L = 20800$ m²

- donc Q/S réalisé = $534,28 / 20800 = 0,026$ m

- $\frac{(Q/S)_{objectif}}{(Q/S)_{réalisé}} = 0,055 / 0,026 = 2,11 > 1$ Le compactage est donc conforme.

7. Le contrôle de compactage (méthode Q/S)

Autres méthodes de contrôle de compactage des remblais:

- Par densito-mètre à membrane;
- Par gamma-densimètre.

Ces méthodes présentent l'inconvénient d'être ponctuelles, ce qui ne permet pas de juger le compactage en continu (contrairement à la méthode Q/S).

D'autre part, elles deviennent insignifiantes dans le cas des matériaux « non-Proctorisables » (i.e. : [% > 20mm] dépasse 30%).

Cependant, ces méthodes sont utilisables dans le cadre des petits chantiers ou dans le cadres des planches d'essais.