



Université 8 Mai 1945 - Guelma

Département de Génie Civil et d'Hydraulique

# Géotechnique Routière

Masters 1 : VOA

Dr. Bouteldja F.

# Organisation de l'enseignement

**Unité d'Enseignement : Découverte**

**Coefficient : 2**

**Nombre de crédit : 2**

**Nombre d'heures d'enseignement :**

**1h30 Cours**

**1h30 TD**

**Mode d'évaluation :**

**Examen : 60%**

**Contrôle continu : 40%**

# Contenu de la matière

## **1. Définition**

## **2. Généralités**

## **3. Classifications des matériaux selon le GTR**

3.1. Principe du GTR

3.2. Tableaux de classification

## **4. Application du GTR**

4.1. Utilisation des matériaux en remblai

4.2. Utilisation des matériaux en couche de forme

## **5. Le compactage**

5.1. Notion de qualité de compactage

5.2. Différents types de compacteurs

5.3. Utilisation des tableaux de compactage

5.4. Contrôle de compactage

# 1. Définition 1/1

**La géotechnique** est une discipline qui étudie le comportement des terrains (sols, roches). Elle s'inscrit dans une démarche de science expérimentale dont la connaissance s'appuie sur l'observation et la mesure (la géologie, la géophysique, la mécanique des sols et mécanique des roches, l'hydrologie et l'hydrogéologie).

**La géotechnique routière** est l'application de la géotechnique au domaine routier (travaux de terrassement, les soutènements et stabilisation de talus, les fondations des ouvrages d'art,...).



## 2. Généralités 1/4

Construction d'une route conduit à plusieurs **travaux de terrassements**.

### ➤ **Travaux préparatoires du chantier**

Abattages d'arbres, démolitions divers, déplacements éventuels de réseaux existants, Fouilles archéologiques, installation du chantier, piquetage général.

### ➤ **Décapage de la terre végétale**

Enlever la couche superficielle du terrain sur une épaisseur de 15 à 30 cm.

- Enlever les débris d'arbres (racines, branches, feuilles) et le sol végétal superficiel.
- Stockage de la terre végétale pour la reprendre en fin de chantier afin d'établir les divers aménagements végétales (talus, aire de repos, terre plein central, giratoires,...)

### ➤ **Exécution des terrassements**

Exécution des déblais et des remblais.

- Modeler le terrain naturel en fonction des conditions géométriques définies dans les plans d'exécution du projet (tracé en plan, profil en long, profils en travers).



## 2. Généralités 2/4

### ➤ Travaux de terrassement

Déplacement de sols vers :

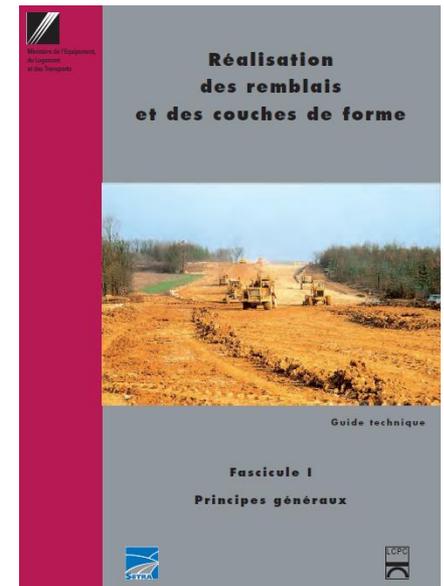
- zone de dépôt ?
- zone de réutilisation en remblais ?



Le Guide des terrassements routiers (GTR, SETRA 1992) permet d'évaluer les possibilités de **réemplois** des sols de déblais et leur mise en œuvre :

- en remblai
- en couche de forme

Le GTR permet de déduire de comportement du sol en prenant en compte l'état et la nature des sols in situ. Il est la référence de tous les terrassements routiers.



## 2. Généralités 3/4

### ➤ Terrassements – économie

Les choix concernant le **réemploi ou non** des matériaux des déblais auront des conséquences majeures sur l'économie du projet :

- lorsque les matériaux disponibles à coté du chantier sont **adaptés** cela conduit à faire des économies remarquables dans le cout global du projet.
- en revanche, lorsque les matériaux du voisinage sont **inadaptés** cela conduit à des surcoûts importants dus à la nécessité de rechercher un nouveau gisement, transporter et/ou traiter les matériaux, dépassement des délais...

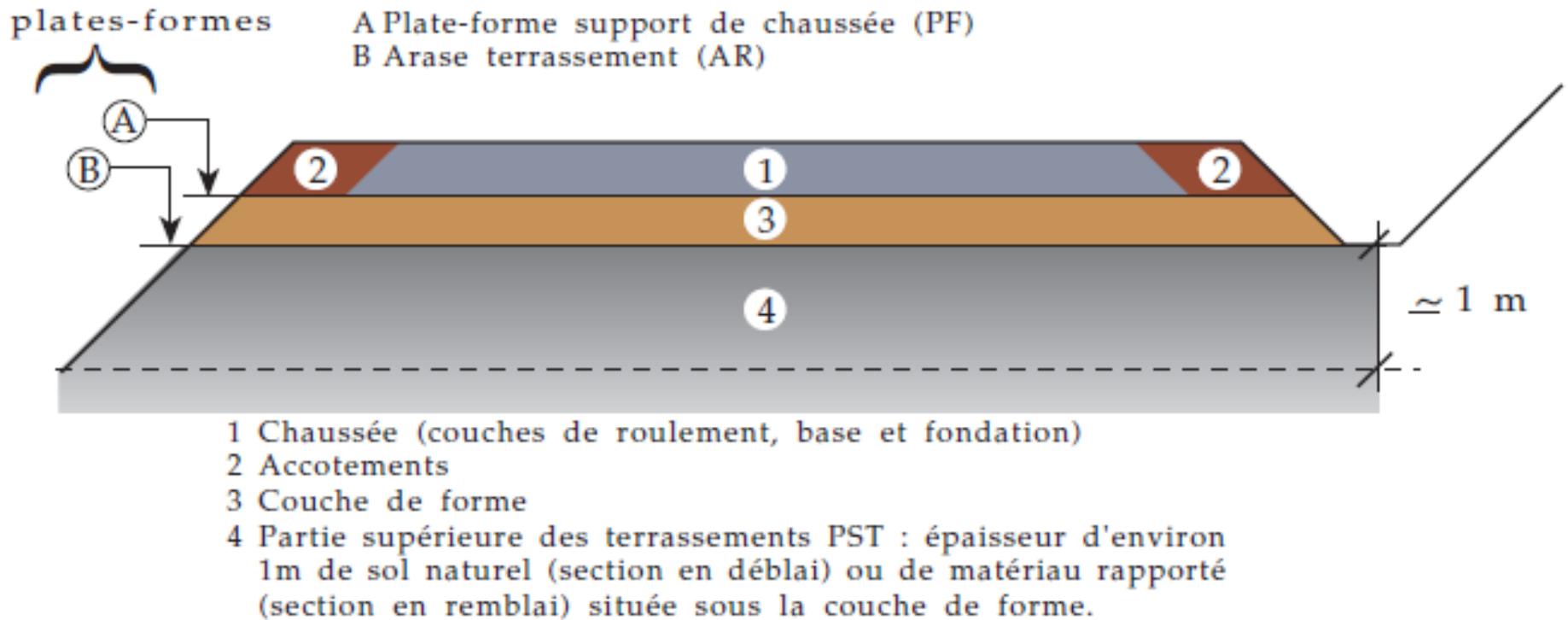
Généralement, les terrassements représentent **20 à 30%** du coût global d'un projet routier.

Il convient de minimiser au maximum **l'aléa** géotechnique afin d'éviter les dépassements des coûts (surcoût) liées aux travaux de terrassements.

**Règle** : au plus on réduit le montant des études par rapport au coût global du projet, au plus le surcoût est important.

## 2. Généralités 4/4

### ➤ Terminologie



# 3. Classification selon le GTR 1/5

## 3.1. Principe du GTR

Le GTR propose une classification des matériaux basée sur les résultats de plusieurs types d'essais à savoir :

- **Les essais d'identification ou de nature** (granulométrie, limites d'Atterberg, VBS)
- **Les essais de comportement mécanique** (Los Angeles, micro Deval, friabilité)
- **Les essais d'état** (teneur en eau naturelle, Proctor, limites d'Atterberg)

**Nb:** Ces essais seront choisis en fonction de la classe du matériau.

Cette classification comporte **3 niveaux** :

**Niveau 1** : Classification selon la **nature** du matériau.

**Niveau 2** : Classification selon la **nature** du matériau à **l'intérieur** de chaque classe.

**Niveau 3** : Classification selon **l'état hydrique** et/ou le **comportement** du matériau.

# 3. Classification selon le GTR 2/5

## 3.2. Classification des matériaux

**Niveau 1** : Classification selon la **nature** du matériau

On distingue 6 classes de matériaux :

**Classe A** : sols fins

**Classe B** : sols de dimension réduite (sable ou grave) avec fines

**Classe C** : sols de granulométrie très étalée (fines et gros éléments)

**Classe D** : sols insensibles à l'eau (la proportion de fines est suffisamment faible pour avoir peu d'effet sur le comportement du matériau)

**Classe R** : matériaux rocheux

**Classe F** : sols organiques et les sous-produits industriels

# 3. Classification selon le GTR 3/5

## 3.2. Classification des matériaux

**Niveau 2** : Classification selon la **nature** du sols à l'intérieur de chaque classe

On distingue des sous-classes de matériaux (classe i) :

**Sous-classes  $A_1, A_2, A_3, A_4$**  : en fonction du **VBS** ou  $I_p$ .

**Sous-classes  $B_1, B_2, B_3, B_4, B_5, B_6$**  : en fonction du **VBS** ou  $I_p$ , **granulo**, **ES**.

**Sous-classes  $C_1A_i, C_2A_i, C_1B_i, C_2B_i$**  : en fonction de la **sous-classe** de la fraction **0/50**, **granulo**, **angularité** des grains (concassés, roulés).

**Sous-classes  $D_1, D_2, D_3$**  : en fonction de la **granulométrie**.

**Sous-classes  $R_1, R_2, R_3, R_4, R_5, R_6$**  : en fonction de la **nature** de la roche (sédimentaire, magmatique, métamorphique).

**Sous-classes  $F_1, F_2, \dots, F_9$**  : en fonction de la **famille** de matériaux.

# 3. Classification selon le GTR 4/5

## 3.2. Classification des matériaux

**Niveau 3** : Classification selon l'état hydrique et/ou le comportement du sol

On ajoute ensuite des indices aux sous-classes (classe **ijk**) : (j : comportement, k : hydrique)

**Aik** : en fonction de  $w_n$  ou IPI

**Bijk** : en fonction du VBS ou  $I_p$ , de MDE, LA et FS

**C<sub>1</sub>Aik, C<sub>2</sub>Aik, C<sub>1</sub>Bijk, C<sub>2</sub>Bijk** : ajout de l'indice de la sous-classe de la fraction 0/50

**Dij** : en fonction de LA, MDE, FS

**Rijk** : en fonction de  $w_n$ ,  $\rho_d$ , IPI, MDE, LA, FR, DG

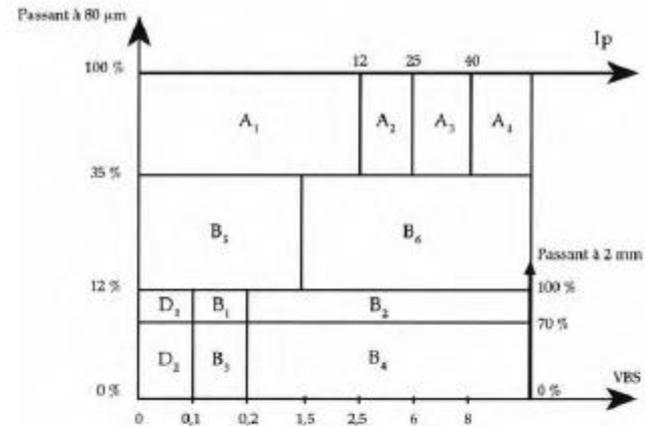
**Fijk** : en fonction de %NaCl,  $d_{50}$ ,  $w_n$ ...

**Remarque** :

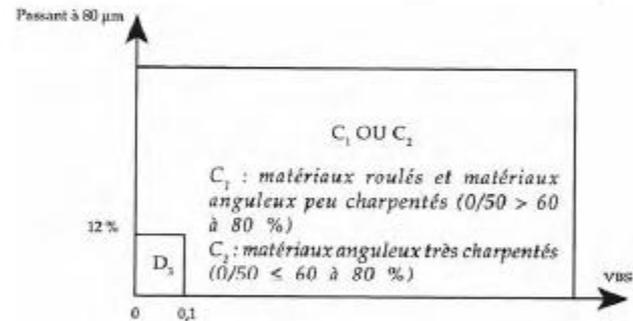
états hydriques : th → très humide, h → humide, m → moyen, s → sec, ts → très sec

# 3. Classification selon le GTR 5/5

Sols  
D<sub>max</sub> ≤ 50 mm



Sols  
D<sub>max</sub> > 50 mm



Matériaux rocheux

Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R <sub>1</sub>
		Calcaires	R <sub>2</sub>
	Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites ...	R <sub>3</sub>
	Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches ...	R <sub>4</sub>
	Roches salines	Sel gemme, gypse	R <sub>5</sub>
Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites, gneiss, schistes métamorphiques et ardoisiers ...		R <sub>6</sub>

Matériaux particuliers

Sols organiques et sous-produits industriels	F
--	---

# 4. Application du GTR 1/16

## 4.1. Utilisation des matériaux en remblai

Les matériaux sont utilisables en remblai sous **des conditions** définies selon le GTR. Ces dernières sont synthétisées sous forme de tableaux (fascicule II – Annexe 2).

La connaissance de **la classe et la sous classe** du matériau ainsi que **la situation météorologique** permet de définir ces conditions.

Sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en remblai	Code
Classe, sous classe et état du matériau au moment de son extraction.	Complément de commentaires sur le comportement du matériau.	Différentes situations météorologiques envisagées lors de l'extraction et de la mise en œuvre du remblai: <b>++ : pluie forte</b> <b>+ : pluie faible</b> <b>= : ni pluie ni évaporation importante</b> <b>- : évaporation importante (vent, canicule)</b>  NB: situation qualifiable par le chef de chantier en fonction de son expérience.	<b>Conditions à respecter lors de l'exécution des travaux (7 rubriques).</b>	Codification utilisable en cas de logiciel.

# 4. Application du GTR 2/16

## 4.1. Utilisation des matériaux en remblai

Les conditions d'utilisation en remblai présentées dans les tableaux du GTR se groupent en 7 rubriques symbolisées par une lettre :

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 E : Extraction**

*En couches* (10 à 30 cm : buteur, scraper) → favorable pour un sol d'humidité « h » en période de forte évaporation (pour diminuer la teneur en eau).

*Frontale* (pelle hydraulique) → favorable pour un sol d'humidité « m » en période humide (pour conserver au mieux la teneur).



# 4. Application du GTR 3/16

## 4.1. Utilisation des matériaux en remblai

### Rubrique G : Granularité

- l'élimination des éléments > 800 mm (limite maximum des blocs admissibles dans le corps d'un remblai) pour des raisons liées à la compatibilité avec les compacteurs,
- l'élimination des éléments > 250 mm (dimension maximale des blocs permettant un malaxage du sol avec un agent de traitement),
- la fragmentation complémentaire après extraction (matériaux rocheux).

Les moyens utilisables pour agir sur la granularité sont variés : **crible**, **pétardage** (explosif), **concassage**, utilisation d'engins spéciaux tels que **rouleaux à pieds dameurs**, **chenillage avec de gros boteurs**, fragmentation à l'aide de **marTEaux ou burins hydrauliques**, etc.



# 4. Application du GTR 4/16

## 4.1. Utilisation des matériaux en remblai

### Rubrique W : Teneur en eau

C'est la difficulté majeure des chantiers de terrassement. **La réduction** de la teneur en eau se fait par aération ou **essorage** en constituant des dépôts provisoires. **L'augmentation** de la teneur en eau se fait par **arrosage** au moment de la mise en œuvre.

### Rubrique T : Traitement

Avec des réactifs comme la chaux (pour diminuer la teneur en eau des sols sensibles à l'eau), le ciment ou autres liants hydrauliques.

### Rubrique R : Régalage

Mise en œuvre en couches élémentaires : minces (20 à 30 cm), moyenne (30 à 50 cm) ou épaisse.

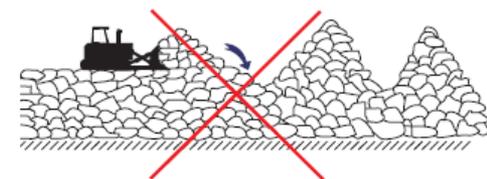


Bouteur lourd  
déchargement des matériaux sur la couche  
en cours de régalinge



BON

Bouteur léger  
déchargement des matériaux sur la couche  
préalablement régalinge et compactée



MAUVAIS



# 4. Application du GTR 5/16

## 4.1. Utilisation des matériaux en remblai

### Rubrique C : Compactage

Trois niveaux de compactage sont envisagés : **intense** pour les sols secs, **moyen** ou **faible** pour les sols humides. Ces niveaux sont donnés à titre **qualitative**, les valeurs **quantitatives** sont calculés à partir de l'annexe 4 du GTR.

### Rubrique H : Hauteur de remblai

Le GTR limite les remblais à des hauteurs : Faible (< 5m), moyenne (5 à 10 m).

Lorsqu'il ne précise pas de limite, on peut envisager des hauteurs de remblai > 10 m à condition d'effectuer une étude géotechnique de stabilité.



# 4. Application du GTR 6/16

## 4.1. Utilisation des matériaux en remblai

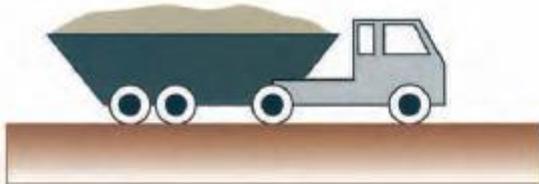
**Tableau récapitulatif des conditions d'utilisation en remblai**

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)

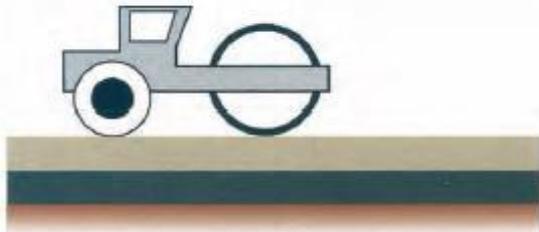
# 4. Application du GTR 7/16

## 4.2. Utilisation des matériaux en couche de forme

### a) Fonction 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.



**À COURT TERME**

# 4. Application du GTR 8/16

## 4.2. Utilisation des matériaux en couche de forme

### a) Fonction de la couche de forme

- l'homogénéisation de la portance du sol support pour concevoir des chaussées d'épaisseurs constante
- maintien dans le temps, en dépit des fluctuations hydriques des sols supports sensibles à l'eau, d'une portance minimale
- amélioration de la portance de la plate-forme pour optimiser le coût de l'ensemble couche de forme-chaussée
- contribution au drainage de la chaussée
- protection thermique des sols gélifs



**À LONG TERME**

# 4. Application du GTR 9/16

## 4.2. Utilisation des matériaux en couche de forme

### b) Conditions d'utilisation

Les conditions sont répertoriées et codifiées dans les tableau du GTR. La connaissance de **la classe et la sous classe** du matériau ainsi que **la situation météorologique** permet de définir ces conditions.

Sol	Observations générales	Situation météorologique	Conditions d'utilisation en remblai	Code	Epaisseur de la couche de forme et classe de PF de la plate-forme support de chaussée
Classe, sous classe et état du matériau au moment de son extraction.	Complément de commentaires sur le comportement du matériau.	Différentes situations météorologiques envisagées lors de l'extraction et de la mise en couche de forme : <b>++ : pluie forte</b> <b>+ : pluie faible</b> <b>= : ni pluie ni évaporation importante</b> <b>- : évaporation importante (vent, canicule)</b>	<b>Conditions à respecter lors de l'exécution des travaux (4 rubriques).</b>	Codification utilisable en cas de de logiciel.	À partir des valeurs de <b>PST</b> et <b>Ari</b> (voir annexe 2 du GTR) on obtient l' <b>épaisseur minimale</b> de la couche de forme et la classe de la plate-forme <b>Pfi</b> correspondante à la <b>portance à long terme.</b>

# 4. Application du GTR 10/16

## 4.2. Utilisation des matériaux en couche de forme

Les conditions d'utilisation en couche de forme présentées dans les tableaux du GTR se groupent en **4 rubriques** symbolisées par une lettre :

### **Rubrique G : Granularité**

- L'élimination de la fraction fine sensible à l'eau (0/10 ou 0/20) par criblage risque de nuire à la portance,
- L'élimination de la fraction grossière empêchera le malaxage du sol avec les produits de traitement, ou le réglage de la plate-forme,
- La fragmentation de la fraction grossière pour produire une certaine quantité d'éléments fins, afin d'obtenir l'enrobage des blocs en cas de traitement avec un liant hydraulique.

### **Rubrique W : Teneur en eau**

Humidification ou réduction de la teneur en eau pour atteindre l'Optimum Proctor Normal.

### **Rubrique T : Traitement**

Le traitement se fait soit avec la chaux ou autres liants hydrauliques (ciment, cendre volante, laitier...), soit avec des correcteurs granulométriques pour conférer au matériau des performances mécaniques supérieurs (durabilité à long terme).

# 4. Application du GTR 11/16

## 4.2. Utilisation des matériaux en couche de forme

### **Rubrique S : Protection Superficielle**

Les matériaux non traités utilisables en couche de forme ont besoin souvent d'une protection de surface pour leur donner une résistance suffisante aux efforts dus à la circulation des engins de chantier.

Dans le cas des matériaux traités, cette protection permettra aussi de maintenir leur état hydrique relativement constant durant la période de prise et de durcissement.

Cette protection est souvent assurée par :

- un enduit de cure gravillonné ou clouté,
- une couche de fin réglage qui peut être une couche de sable relativement grossier.

*Protection superficielle des plates-formes de couches de forme en sols fins traités par un enduit de cure clouté.*



*Après épandage des gravillons de cloutage.*



*Répandage de l'émulsion.*

# 4. Application du GTR 12/16

## 4.2. Utilisation des matériaux en couche de forme

**Tableau récapitulatif des conditions d'utilisation en couche de forme**

Rubrique	Code	Technique 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
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

# 4. Application du GTR 13/16

## 4.2. Utilisation des matériaux en couche de forme

### c) Dimensionnement de la couche de forme

L'épaisseur de la couche de forme est déterminée selon la **classification** géotechnique des sols et les **conditions hydriques** de la Partie Supérieure des Terrassements (**PST**). On distingue **7 cas** présentés dans le tableau ci-après.

A chaque PST est associée **une ou deux classe(s)** de portance à long terme de **l'arase de terrassement** notée(s) ARi.

Pour chaque cas de PST et pour les différents matériaux de couche de forme, il est alors **préconisé une épaisseur** de couche de forme fournie dans les tableaux du GTR.

# 4. Application du GTR 14/16

## 4.2. Utilisation des matériaux en couche de forme

### c) Dimensionnement de la couche de forme

Cas de P.S.T	Schéma	Description	Classe de l'arase	Commentaires
P.S.T. n°0		<p><b>Sols</b> A, B<sub>2</sub>, B<sub>4</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub>, C<sub>1</sub> se trouvant dans un état hydrique (th).</p> <p><b>Contexte</b> Zones tourbeuses, marécageuses ou inondables. PST dont la portance risque d'être quasi nulle au moment de la réalisation de la chaussée ou au cours de la vie de l'ouvrage.</p>	<b>AR0</b>	La solution de franchissement de ces zones doit être recherchée par une opération de terrassement (purge, substitution) et/ou de drainage (fossés profonds, rabattement de la nappe...) de manière à pouvoir reclasser le nouveau support obtenu au moins en classe AR1.
P.S.T. n°1		<p><b>Sols</b> Matériaux des classes A, B<sub>2</sub>, B<sub>4</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub>, C<sub>1</sub>, R<sub>12</sub>, R<sub>13</sub>, R<sub>34</sub> et certains matériaux C<sub>2</sub>, R<sub>43</sub> et R<sub>63</sub> dans un état hydrique (h).</p> <p><b>Contexte.</b> PST en matériaux sensibles de mauvaise portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A) et sans possibilité d'amélioration à long terme (B).</p>	<b>AR1</b>	<p>Dans ce cas de PST, il convient :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- soit de procéder à une amélioration du matériau jusqu'à 0,5 m d'épaisseur par un traitement principalement à la chaux vive et selon une technique remblai. On est ramené au cas de PST 2, 3 ou 4 selon le contexte</li> <li>- soit d'exécuter une couche de forme en matériau granulaire insensible à l'eau de forte épaisseur (en admettant une légère réduction si l'on intercale un géotextile anticontaminant à l'interface PST - couche de forme).</li> </ul>

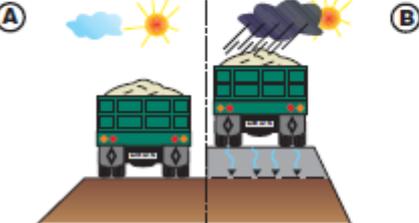
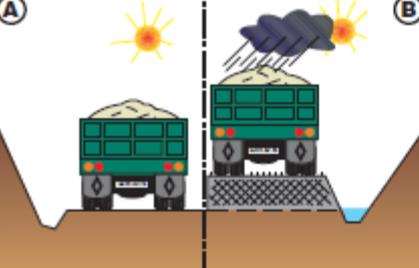
(A) Comportement de la PST à la mise en œuvre de la couche de forme

(B) Situation pendant la "phase de construction" de la chaussée.

# 4. Application du GTR 15/16

## 4.2. Utilisation des matériaux en couche de forme

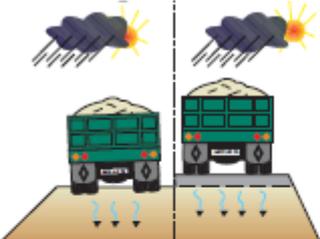
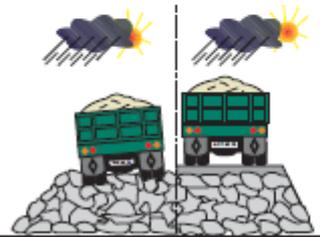
### c) Dimensionnement de la couche de forme

<p>P.S.T. n°2</p>		<p><b>Sols</b> Matériaux des classes A, B<sub>2</sub>, B<sub>4</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub>, C<sub>1</sub>, R<sub>12</sub>, R<sub>13</sub>, R<sub>34</sub> et certains matériaux C<sub>2</sub>, R<sub>43</sub> et R<sub>63</sub> dans un état hydrique (m).</p> <p><b>Contexte</b> PST en matériaux sensibles à l'eau de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A). Cette portance peut cependant chuter à long terme sous l'action des infiltrations des eaux pluviales et d'une remontée de la nappe (B).</p>	<p><b>AR1</b></p> <p>Bien que les exigences requises à court terme pour la plate-forme support puissent être éventuellement obtenues au niveau de l'arase, il est cependant quasiment toujours nécessaire de prévoir la réalisation d'une couche de forme.</p> <p>Si l'on peut réaliser un rabattement de la nappe à une profondeur suffisante, on est ramené au cas de PST 3.</p>
<p>P.S.T. n°3</p>		<p><b>Sols</b> Mêmes matériaux que dans le cas de PST 2.</p> <p><b>Contexte</b> PST en matériaux sensibles à l'eau, de bonne portance au moment de la mise en œuvre de la couche de forme (A) mais pouvant chuter à long terme sous l'action de l'infiltration des eaux pluviales (B).</p>	<p><b>AR1</b></p> <p>En l'absence de mesures de drainage à la base de la chaussée et d'imperméabilisation de l'arase, même situation que celle décrite dans le cas PST 2</p> <p><b>AR2</b></p> <p>Classement en AR2 si des dispositions constructives de drainage à la base de la chaussée et d'imperméabilisation de l'arase permettent d'évacuer les eaux et d'éviter leur infiltration dans la PST.</p>
<p>P.S.T. n°4</p>		<p><b>Sols</b> Mêmes matériaux qu'en PST 1 sous réserve que la granularité permette leur traitement.</p> <p><b>Contexte</b> PST en matériaux sensibles à l'eau (en remblai ou rapportés en fond de déblai hors nappe) améliorés à la chaux ou aux liants hydrauliques selon une technique "remblai" et sur une épaisseur de 0,30 à 0,50 m. L'action du traitement est cependant durable.</p>	<p><b>AR2</b></p> <p>La portance de l'arase peut être localement élevée mais la dispersion n'autorise pas un classement supérieur.</p> <p>La décision de réalisation d'une couche de forme sur cette PST dépend du projet et des valeurs de portance de l'arase mesurées à court terme (après prise du liant).</p>

# 4. Application du GTR 16/16

## 4.2. Utilisation des matériaux en couche de forme

### c) Dimensionnement de la couche de forme

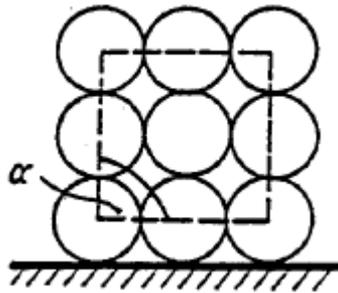
<p>P.S.T. n°5</p>	 <p>Diagram A shows a truck on a thin layer of material with rain falling on it. Diagram B shows a truck on a thicker layer of material with rain falling on it.</p>	<p><b>Sols</b> B<sub>1</sub> et D<sub>1</sub> et certains matériaux rocheux de la classe R<sub>43</sub>.</p> <p><b>Contexte</b> PST en matériaux sableux fins insensibles à l'eau, hors nappe, posant des problèmes de traficabilité.</p>	<p><b>AR2</b></p> <p><b>AR3</b></p> <p>La portance de l'arase de cette PST dépend beaucoup de la nature des matériaux. Classement en AR3 si le module EV2 de l'arase est supérieur à 120 MPa. Les valeurs de portance à long terme peuvent être assimilées aux valeurs mesurées à court terme. La nécessité d'une couche de forme sur cette PST ne s'impose que pour satisfaire les exigences de traficabilité.</p>
<p>P.S.T. n°6</p>	 <p>Diagram A shows a truck on a layer of material with rain falling on it. Diagram B shows a truck on a thicker layer of material with rain falling on it.</p>	<p><b>Sols</b> Matériaux des classes D<sub>3</sub>, R<sub>11</sub>, R<sub>21</sub>, R<sub>22</sub>, R<sub>32</sub>, R<sub>33</sub>, R<sub>41</sub>, R<sub>42</sub>, R<sub>52</sub> ainsi que certains matériaux C<sub>2</sub>, R<sub>23</sub>, R<sub>43</sub> et R<sub>53</sub>.</p> <p><b>Contexte</b> PST en matériaux graveleux ou rocheux insensibles à l'eau mais posant des problèmes de réglage et/ou de traficabilité.</p>	<p><b>AR3</b></p> <p><b>AR4</b></p> <p>Classement en AR3 si EV2 ≥ 120 MPa et en AR4 si EV2 ≥ 200 MPa. Les valeurs de portance à long terme peuvent être assimilées aux valeurs mesurées à court terme. La nécessité d'une couche de forme ne s'impose que pour les exigences à court terme (nivellement et traficabilité) et peut donc se réduire à une couche de fin réglage.</p>

# 5. Le compactage 1/8

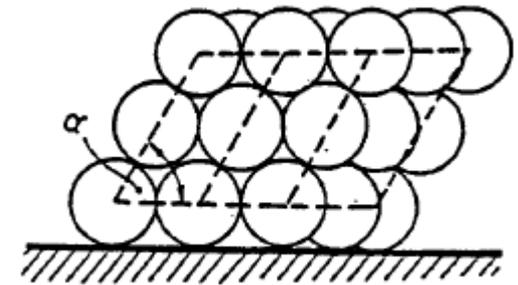
## 5.1. Notion de qualité de compactage

Le compactage se traduit par un rapprochement des particules du sol entre eux et l'expulsion d'air. Il consiste à augmenter la densité sèche «  $\gamma_d$  » (poids volumique sec) du sol par des moyens mécaniques.

État le moins compact



État le plus compact



La densification du sol par le compactage n'est pas un but en soi. Elle est recherchée parce qu'elle entraîne d'autres conséquences :

- Amélioration des caractéristiques mécaniques pour augmenter la traficabilité de la couche de forme ou de remblai (Portance et module de déformation, résistance à la compression et au poinçonnement, résistance au cisaillement...)
- Limitation des tassements des corps de remblai et assurer leur stabilité
- Diminution de la perméabilité (s'opposer à l'écoulement de l'eau) afin de protéger les couches d'assises contre l'agression de l'eau

# 5. Le compactage 2/8

## 5.1. Notion de qualité de compactage

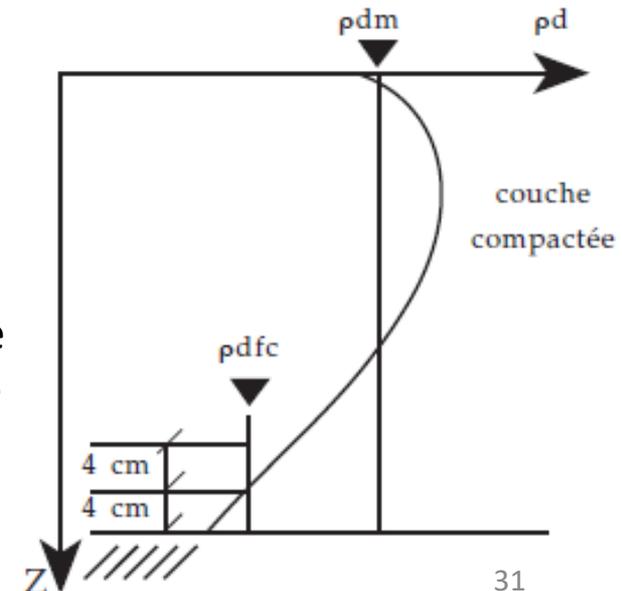
### ➤ *Nécessité du compactage par couches*

C'est la diffusion rapide des contraintes dans le sol qui impose un compactage par couches. En effet, on observe une variation de la densité sèche sur la hauteur de la couche compactée qui chute en fonction de l'augmentation de l'épaisseur de la couche mise en œuvre, quelque soit le nombre de passes. La rigidité du support (couche inférieure) de la couche compactée est à l'origine de ce résultat. Le compactage sera meilleur si le support est rigide (compacté) que si il est déformable (foisonnée).

Pour s'assurer d'un compactage correct, ceci conduit à considérer les deux indicateurs suivants :

**pdm** : masse volumique sèche moyenne sur toute l'épaisseur de la couche compactée.

**pdfc** : 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.

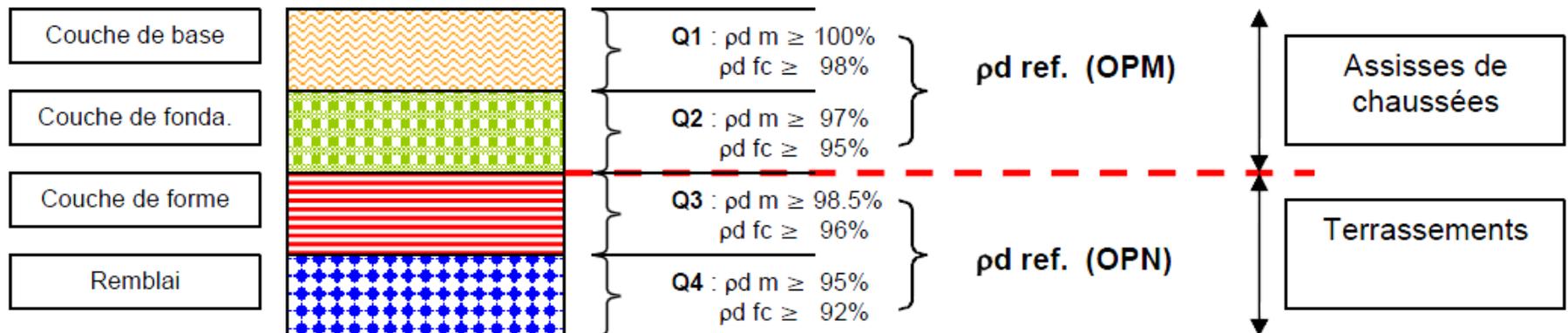


# 5. Le compactage 3/8

## 5.1. Notion de qualité de compactage

### ➤ Niveaux de qualité de compactage

Le niveau de qualité de compactage se traduit par une valeur de la densité sèche à atteindre pour réaliser des assises ou terrassements de manière à garantir la tenue dans le temps de l'ouvrage.



- Plus on se rapproche de la surface de la chaussée, plus les exigences sur la qualité de compactage sont sévères.
- Ces valeurs sont à considérer comme des repères mais ne doivent pas être retenues comme prescriptions de compactage (non pertinence de la référence Proctor pour certains matériaux...)

# 5. Le compactage 4/8

## 5.2. Différents types de compacteurs

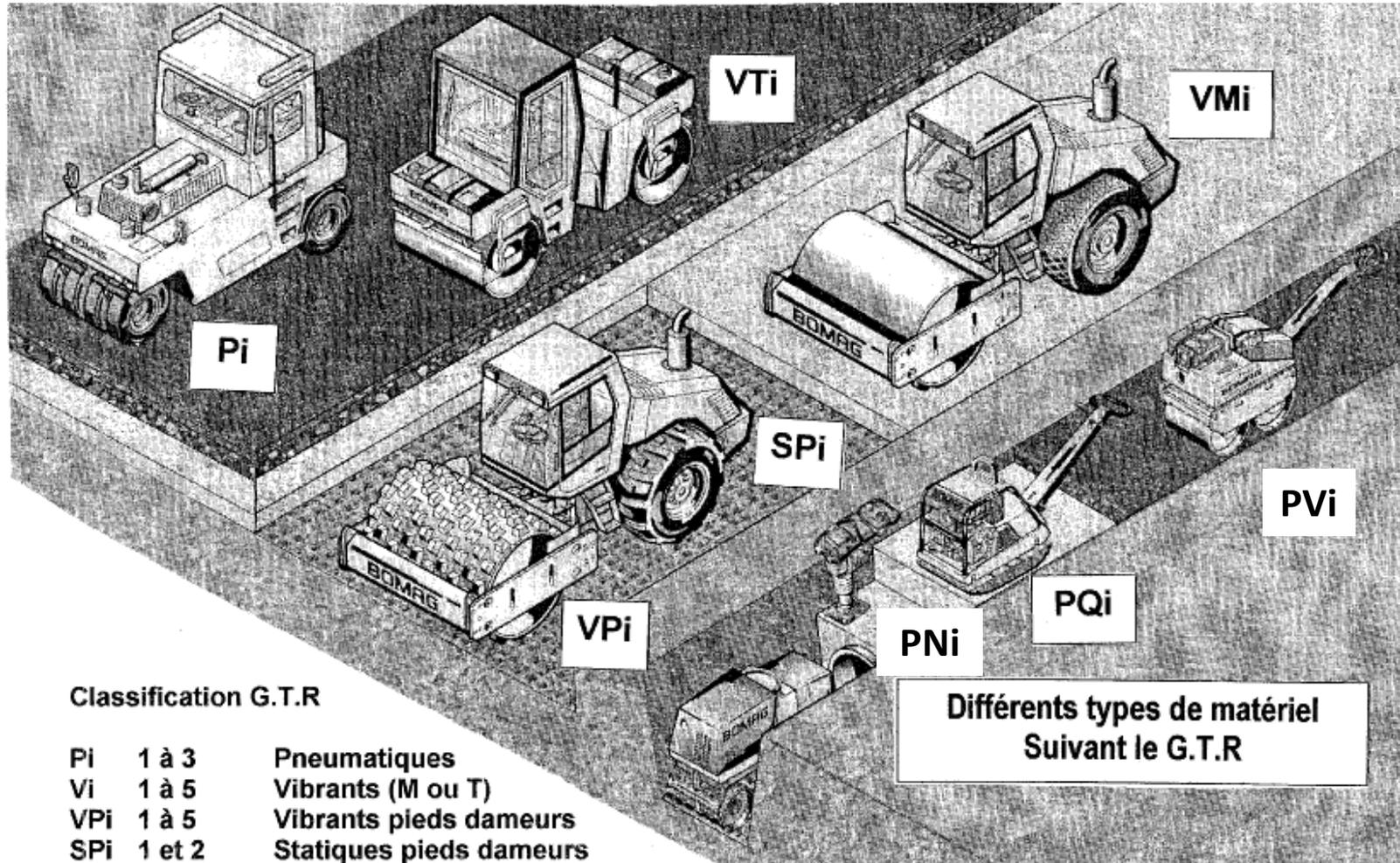
Les différentes familles d'engins de compactage sont :

- Les compacteurs à pneus : **Pi** (i varie de 1 à 3)
  - Les compacteurs vibrants :
    - à cylindres lisses : **VMi** et **VTi** (i varie de 1 à 5)
    - à pieds dameurs : **VPi** (i varie de 1 à 5)
  - Les compacteurs statiques à pieds dameurs : **SPi** (i varie de 1 à 2)
  - Les pilonneuses à percussion : **PPi** (i varie de 1 à 2)
  - Les pilonneuses vibrantes : **PNi** (i varie de 0 à 3)
  - Les plaques vibrantes : **PQi** (i varie de 1 à 4)
  - Les rouleaux vibrants : **PVi** (i varie de 1 à 4)
- } ⇒ **Zones exigües (tranchées,...)**

**Nb** : i est le numéro de la classe (varie du moins puissant au plus puissant : 1, 2, 3,...)

# 5. Le compactage 5/8

## 5.2. Différents types de compacteurs



### Classification G.T.R

Pi	1 à 3	Pneumatiques
Vi	1 à 5	Vibrants (M ou T)
VPi	1 à 5	Vibrants pieds dameurs
SPi	1 et 2	Statiques pieds dameurs
PQi	3 et 4	Plaques vibrantes
PNi	0 à 3	Piloneuses vibrantes
PVi	1 à 4	Rouleaux vibrants

Différents types de matériel  
Suivant le G.T.R

# 5. Le compactage 6/8

## 5.3. Utilisation des tableaux de compactage

Les tableaux de compactage du GTR sont établis pour un matériau **moyen** à l'intérieur de la classe et la sous-classe correspondantes. Par contre, ils correspondent à l'emploi d'un compacteur situé à la **frontière basse** de la classe d'efficacité considérée.

Les paramètres définissant les modalités de compactage sont :

- L'épaisseur unitaire de compactage « Q/S » : (m)

Q est le volume de sol compacté pendant un temps donné (par exemple un jour, ou une heure), et S la surface balayée par le compacteur pendant le même temps.

- L'épaisseur compactée « e » : (m)

La valeur d'épaisseur compactée indiquée est une valeur maximale : l'épaisseur réelle doit lui être inférieure ou égale. Elle varie entre 0.20 m et 0.80 m selon l'état du sol, la catégorie du compacteur et l'objectif recherché.

- La vitesse de translation « V » : (km/h)

Le compacteur doit rouler à une vitesse constante définit son efficacité. Elle est fixée pour chaque engin quelle que soit l'intensité du compactage demandée. Cette vitesse peut varier entre 2 km/h pour certains compacteurs vibrants et atteindre 8 km/h pour de compacteurs statiques à pieds dameurs.

# 5. Le compactage 7/8

## 5.3. Utilisation des tableaux de compactage

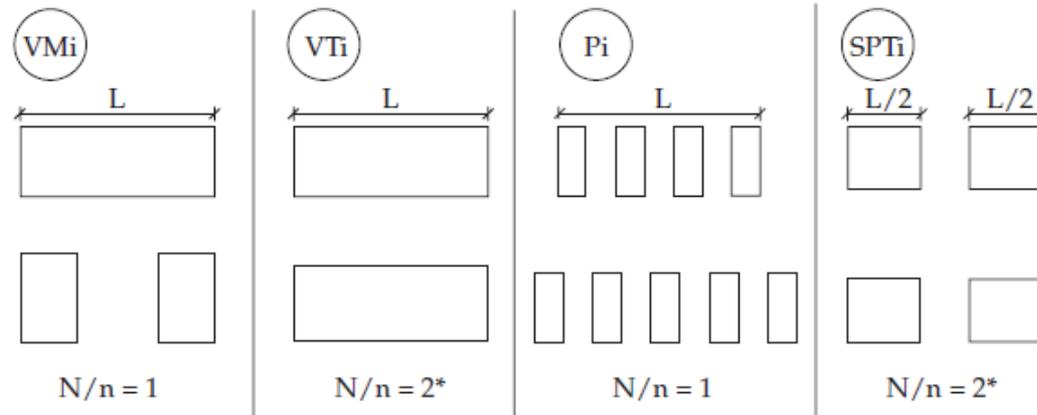
• Le nombre de passes  $n$  et le nombre d'applications de charge  $N$  :

Une passe est par définition un aller **ou** un retour de compacteur. La valeur  $N$  indiquée dans les tableaux est le nombre d'applications de charge.  $N$  et  $n$  coïncident pour les compacteurs monocylindres et les compacteurs à pneus. Pour un tandem longitudinal, le nombre de passes à considérer est la moitié de  $N$ , par le fait qu'une passe constitue deux applications de charge.

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

$$N = e \text{ réelle compactée} / (Q/S).$$

$N$  est arrondi à l'entier supérieur.



\*Le recouvrement doit être total entre essieux AV et AR..

# 5. Le compactage 8/8

## 5.3. Utilisation des tableaux de compactage

- Le débit par unité de largeur de compactage  $Q/L$  : (m<sup>3</sup>/h)

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

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

Elle permet de prévoir **le débit pratique** attendu pour un compacteur donné par :

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

Le coefficient de rendement « **k** » peut être estimé entre **0,5 et 0,75** suivant les chantiers. il représente le rapport entre le temps utile de compactage (le temps durant lequel le matériel est effectivement utilisé sur la zone à compacter avec des paramètres de fonctionnement corrects : vitesse de translation, fréquence, moment des excentriques pour un rouleau vibrant) et le temps de présence du compacteur sur chantier.

# 5. Le compactage

## 5.4. Contrôle de compactage

Le contrôle de compactage vise à s'assurer que :

- l'épaisseur des couches compactées est conforme aux épaisseurs définies,
- le compactage réalisé est conforme à la qualité de compactage désirée.

Il existe plusieurs moyens de contrôle de compactage :

- Dynaplaque

- L'essai à la plaque

**Mesures d'état de surface**

- Densitomètre à sable (10 à 20 cm)

- Densitomètre à membrane (10 à 20 cm)

- Gammadensimètre à profondeur variable (40 cm)

- La double sonde gamma (2m)

**Mesures directes** (couche par couche)

- Pénétromètres dynamiques à énergie constante

- Pénétromètres dynamiques à énergie variable

**Mesures indirectes**

# 5. Le compactage

## 5.4. Contrôle de compactage



Dynaplaque



L'essai à la plaque



Densitomètre à membrane



Densitomètre à sable



Gammadensimètre

# Pénétromètres Dynamiques 1/7

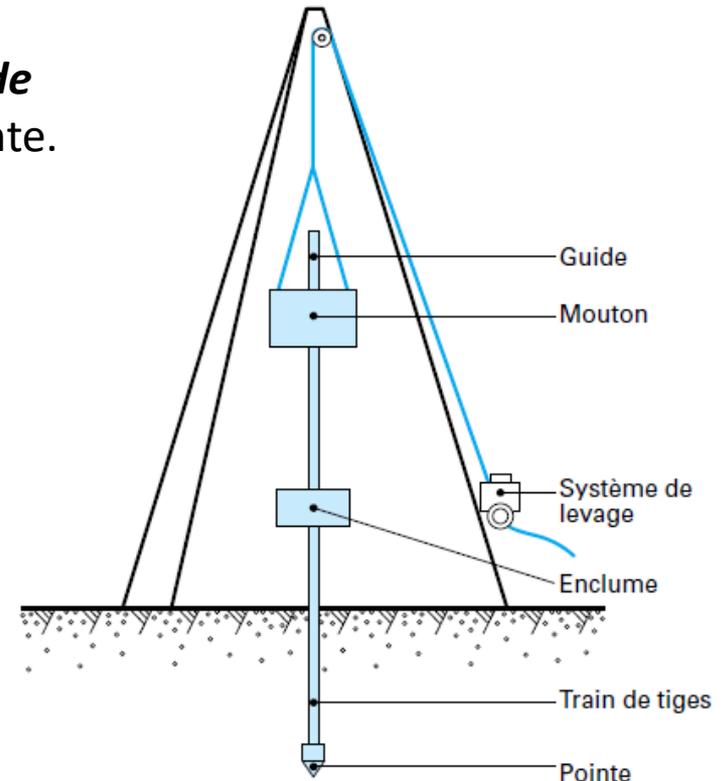
## ➤ Principe de l'essai

L'**essai de pénétration dynamique** consiste à enfoncer dans le sol, **par battage** sous l'action de chocs répétés, un train de tiges muni, en partie inférieure, d'une **pointe conique débordante** permettant de créer un espace annulaire entre le train de tiges et le sol.

Les chocs répétés de battage sont exercés sur la tête du train de tiges (**enclume**) par une masse (**le mouton de battage**) tombant en chute libre d'une hauteur constante.

On a essentiellement **trois** types de pénétromètres dynamiques normalisés :

- Les pénétromètres de type A « PDA » [NF P 94-114]
- Les pénétromètre de type B « PDB » [NF P 94-115]
- Le pénétromètre dynamique léger à énergie variable « PANDA » [XP P 94-105]

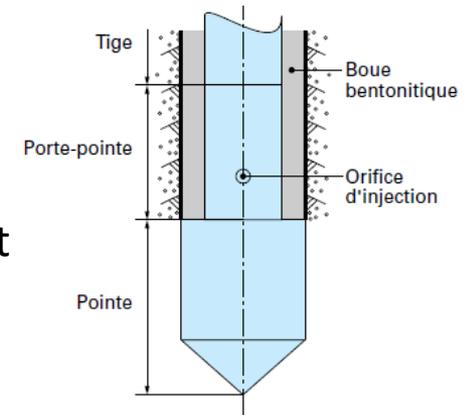


# Pénétromètres Dynamiques 2/7

## ➤ Différents types

### 1/ Les pénétromètres de type A

Les PDA ont pour particularité de comporter un dispositif qui permet d'injecter une boue bentonitique dans l'espace annulaire entre le train de tiges et le sol au fur et à mesure de la pénétration dans le terrain, évitant ainsi le frottement, le resserrement ou l'éboulement du sol sur les tiges. Les PDA peuvent être réalisés dans tous les sols fins et grenus dont la dimension moyenne des éléments  $< 60$  mm. L'essai est limité à une profondeur de 30 m.



### 2/ Les pénétromètres de type B

Les PDB sont en tous points identiques aux PDA, à l'exception du fait qu'ils ne comportent pas de dispositif d'injection de bentonite. Cela fait qu'une partie de l'énergie de battage peut être mobilisée par le frottement latéral parasite qui se manifeste entre le sol et le train de tiges, notamment en cas de sols fins. Sa capacité de pénétration est plus limitée que celle du PDA (environ 15 m).



# Pénétromètres Dynamiques 3/7

## ➤ Différents types

***Appareil disponible au laboratoire*** : Pénétromètre Dynamique Léger Manuel (8 – 12m)



Mouton de battage : 10 kg  
Hauteur de chute : 50 cm



# Pénétromètres Dynamiques 4/7

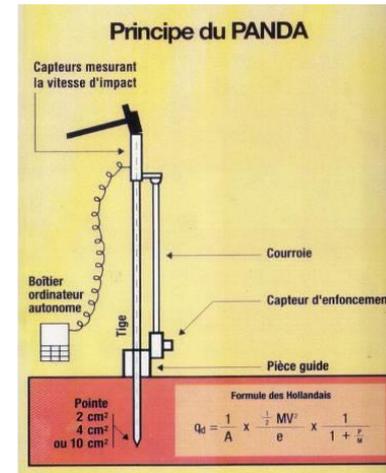
## ➤ Différents types

### 3/ Le pénétromètre dynamique léger à énergie variable

Le Panda *se différencie* des pénétromètres dynamiques classiques par le fait que l'énergie fournie est *manuelle* et *variable*. Ces deux différences font du Panda :

- un appareillage particulièrement adapté aux sites d'accès difficiles (encombrement réduit)
- de pouvoir adapter l'énergie fournie en fonction du terrain rencontré (possibilité d'avoir des mesures fiables même dans des terrains de faible portance et éventuellement saturés)
- de pouvoir réaliser des sondages dans toutes les directions (possibilité de réaliser des sondages horizontaux ou inclinés souvent intéressants dans certains ouvrages tels que les tunnels, canalisation,...)
- une mise en œuvre rapide, la numérisation des résultats et leur visualisation sur place.

Le Panda est utilisé spécialement pour les faibles profondeurs < 6m.



# Pénétrromètres Dynamiques 5/7

## ➤ Domaines d'utilisation

Le domaine préférentiel d'utilisation des pénétrromètres dynamiques est la **reconnaissance qualitative** des terrains lors d'une **reconnaissance préliminaire**. Ils sont donc recommandés pour résoudre les problèmes suivants :

- Contrôle de compactage
- Contrôle de l'homogénéité d'un site
- Détermination des épaisseurs des différentes couches de sols
- Localisation des cavités ou autres discontinuités
- Reconnaissance du niveau du toit du rocher
- ...

Les pénétrromètres dynamique peuvent éventuellement fournir des renseignements utiles pour la prévision des conditions de battage des pieux et des palplanches.

# Pénétrromètres Dynamiques 6/7

## ➤ Expression des résultats

Pour les pénétrromètres de type A et B, l'opérateur compte le nombre de coups «  $N_d$  » nécessaires pour enfoncer les tiges dans le sol de 10 cm. On trace ensuite le profil de pénétration en fonction de la profondeur.

Il existe deux modes de représentation d'un **profil de pénétration dynamique** :

- soit on trace en fonction de la profondeur le **nombre de coups  $N_d$**  nécessaire pour obtenir un enfoncement de 10 cm
- soit on trace en fonction de la profondeur **la résistance de pointe dynamique  $q_d$**  calculée à l'aide de **la formule des Hollandais**, qui s'écrit :

$$q_d = \frac{M}{e(M+M')} \frac{MgH}{A}$$

M : masse du mouton, e : enfoncement moyen par coup, g : accélération due à la pesanteur

M' : la masse des parties frappées (enclume + train de tiges + pointe)

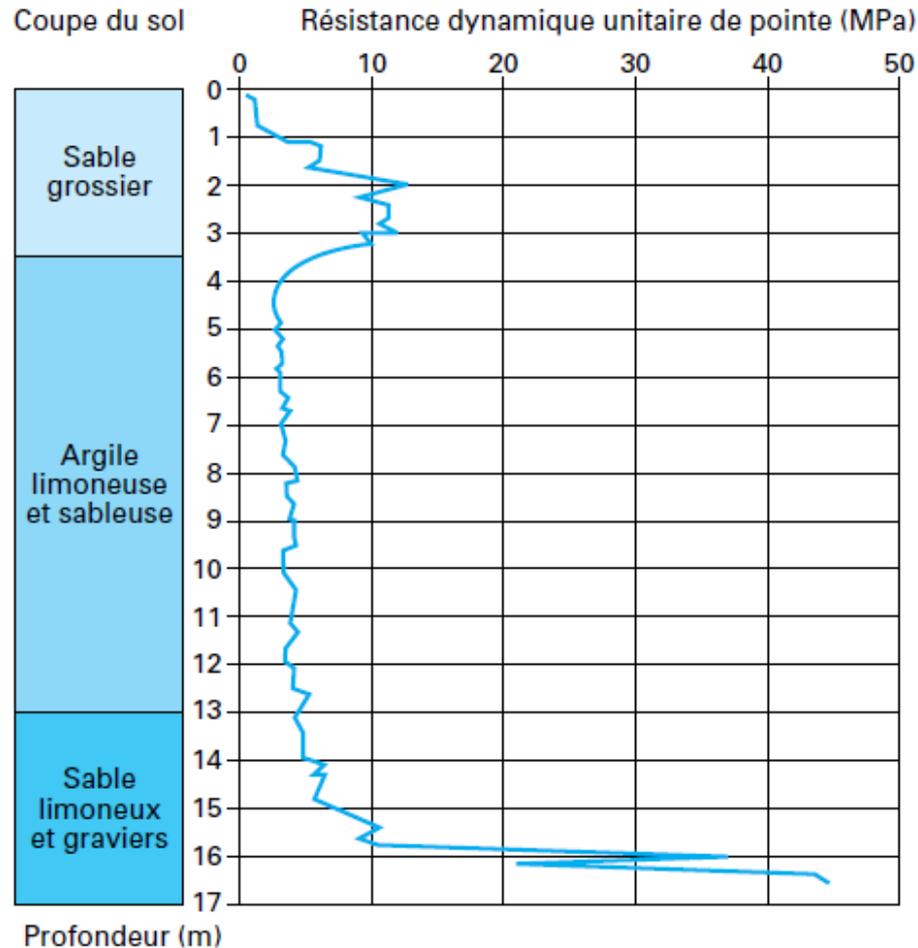
H : hauteur de chute du mouton, A : section droite de la pointe

**Nb** : le pénétrromètre Panda calcul «  $q_d$  » automatiquement pour chaque coup de marteau en utilisant la formule des Hollandais.

# Pénétromètres Dynamiques 7/7

## ➤ Expression des résultats

Exemple de profil de pénétration (pénétrogramme)



# Contrôle de compactage avec les pénétrromètres dynamiques

# 5. Le compactage

## 5.4. Contrôle de compactage

### ➤ Utilisation des pénétromètres pour le contrôle de compactage

Le contrôle de compactage consiste à comparer le pénétrogramme par rapport à deux droites à savoir :

- la droite de **Référence** (noté  $q_R$ ) qui correspond à ce que l'on devrait obtenir en moyenne compte-tenu de l'objectif de compactage, du type de sol et de l'état hydrique,
- la droite de **refus** qui correspond à des tolérances **Limites** (noté  $q_L$ ), en fond de couche, sur le taux de compactage à ne pas dépasser. Elle est obtenue par translation de la droite de référence.

Cette comparaison permettra de vérifier si le résultat du compactage est conforme à celui attendu et, dans le cas contraire, de situer le niveau de gravité de **l'anomalie rencontrée**.

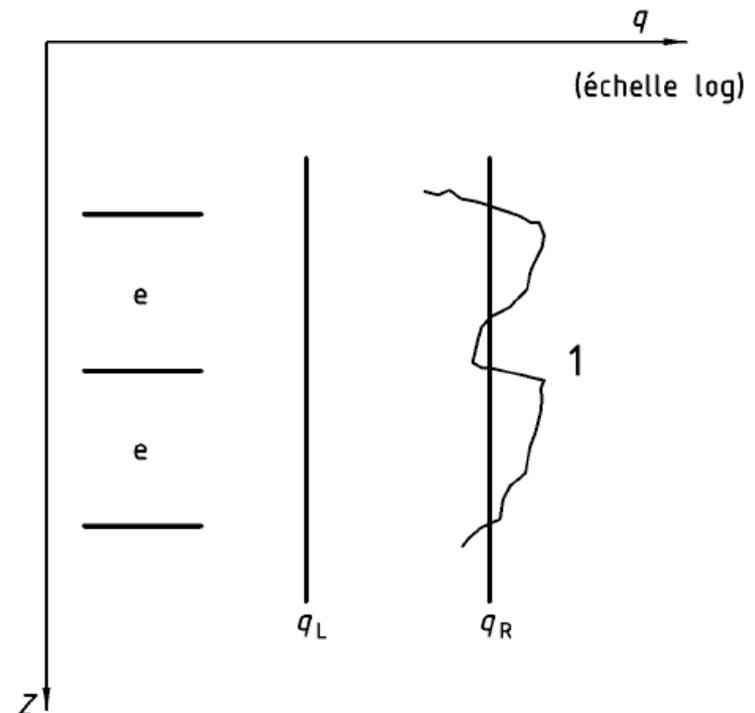
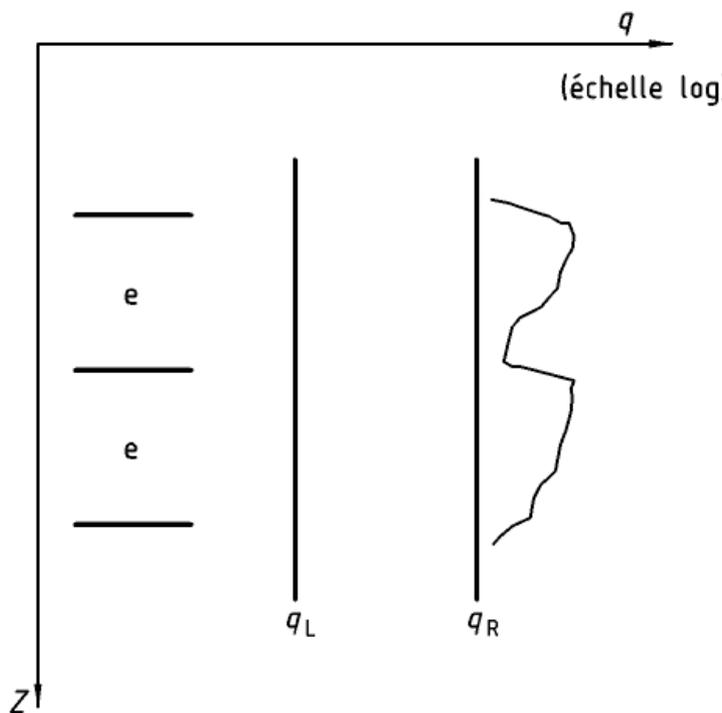
**Quatre types d'anomalies** sont possibles, elles dépendent des positions relatives du pénétrogramme et de  $q_L$  et  $q_R$  (sens croissant du niveau de gravité) :

# 5. Le compactage

## 5.4. Contrôle de compactage

### A) Résultat sans anomalie

- le pénétrogramme se trouve toujours en dépassement de  $q_L$ ,
- les épaisseurs de couche sont conformes aux prescriptions.

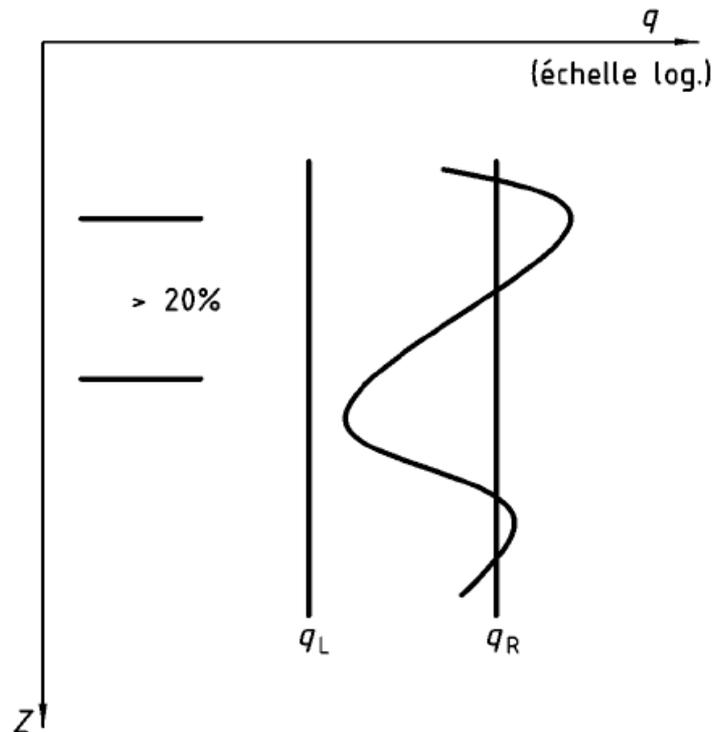


# 5. Le compactage

## 5.4. Contrôle de compactage

### B) Résultat avec anomalie de type 1 (acceptable)

- le pénétrogramme se trouve toujours en dépassement de  $q_L$
- les épaisseurs de couche sont systématiquement supérieures de plus de 20 % aux valeurs prescrites.

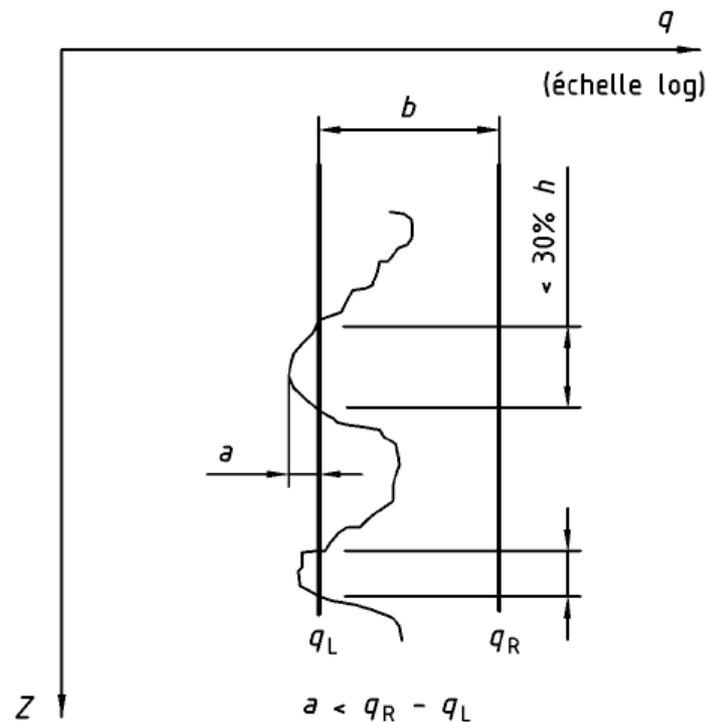


# 5. Le compactage

## 5.4. Contrôle de compactage

### C) Résultat avec anomalie de type 2 (acceptable)

- le pénétrogramme est inférieur à  $q_L$  d'un écart « $a$ » inférieur à la distance « $b$ » entre  $q_L$  et  $q_R$  et au total sur une hauteur de moins de 30 % de la profondeur contrôlée « $h$ ».

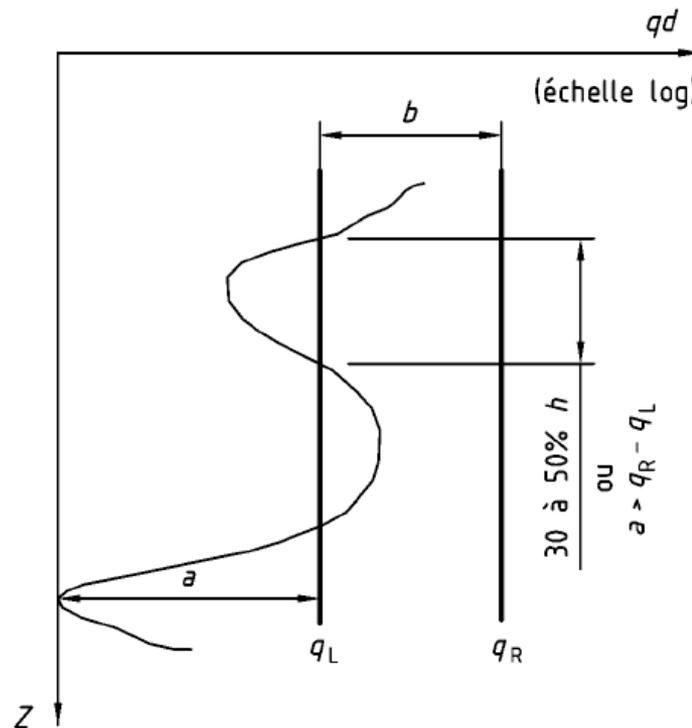


# 5. Le compactage

## 5.4. Contrôle de compactage

### D) Résultat avec anomalie de type 3 (non acceptable)

- le pénétrogramme est inférieur à  $q_L$  d'un écart «a» supérieur à la distance «b» entre  $q_L$  et  $q_R$ , ou au total sur une hauteur de plus de 30 % à 50 % de la profondeur contrôlée «h», quelle que soit l'importance du dépassement.

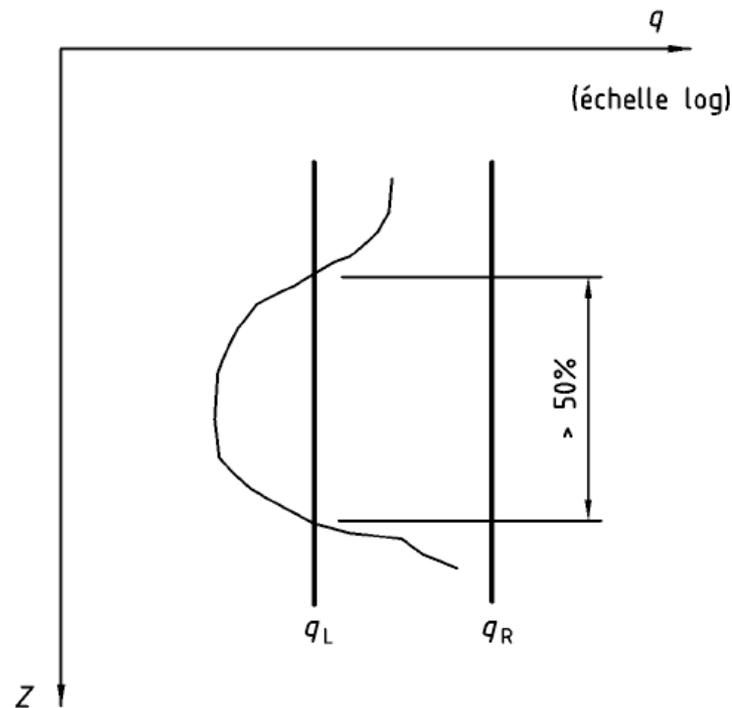


# 5. Le compactage

## 5.4. Contrôle de compactage

### E) Résultat avec anomalie de type 4 (non acceptable)

- le pénétrogramme est inférieur à  $q_L$  sur plus de 50 % de la profondeur contrôlée «h».



Fin