



Université Mentouri Constantine1  
Faculté des Sciences de la technologie  
Département Génie des Transports



Cours M1 ITL

# Géométrie des tracés, conception et entretien des chaussées

Partie 1/3

Pr. M.S. BOULAHLIB

Constantine 2012

# **Géotechnique routière**

# 1. Introduction

La **géotechnique routière** est une science qui étudie les propriétés :

- physiques,
- mécaniques

des roches et des sols qui vont servir d'assise pour la structure de chaussée.

Elle étudie les problèmes d'équilibre et de formation des masses de terre de différentes natures soumises à l'effet des efforts extérieurs et intérieurs.

La reconnaissance géotechnique du sol support est réalisée au moyen de puits creusés à l'aide de pelles mécaniques.

## 2. Géotechnique applicable aux terrassements

### 2.1. Rappel

**Un sol** est le produit de décomposition mécanique ou **physico-chimique de roches**.

Il peut être classé en :

- Sols organiques (compressible et faible capacité portante);
- Sols granulaires (sable et gravier ou mélange de deux (2)), sols perméables, tassements rapides, remontée capillaire pour sable fin;
- Sols cohérents et plastiques comme les argiles (sols imperméables, compressibles et tassement à long terme);
- Silts (intermédiaire entre sable fin et argile), sol érodable, gélif, généralement faible capacité portante, remontée capillaire, drainage difficile, saturé liquéfaction;
- Mélange des sols précédents (tills).
- Remblai

C'est le mélange :

- d'une fraction **granulaire** plus ou moins importante :

L'identification d'un sol granulaire

- blocs,
- cailloux,
- gravier,
- sable,



Elle doit être conforme à leur granulométrie.

Il est important de bien noter la grosseur maximale des particules observées dans une tranchée ou une coupe.

Dans les forages, la grosseur maximale des particules est limitée par la dimension de l'échantillonneur.

Un sol granulaire peut contenir un pourcentage appréciable de sol à grains fins, ce qui lui confère certaines des caractéristiques propres à ce groupe.

La portion de sol à grain fin doit être indiquée en utilisant les adjectifs appropriés.

- d'une fraction **argileuse** plus ou moins importante. Terre ayant la consistance de l'argile, visqueuse et imperméable.

Ainsi, en géotechnique, où l'on s'intéresse avant tout au comportement mécanique des sols, on désigne par argile les matériaux de granulométrie inférieure à  $4\ \mu\text{m}$  (entre 4 et  $50\ \mu\text{m}$ , on parle de limon).



Un sol est composé de **trois** éléments différents:

- **le gaz** : contenu dans les vides entre les particules, est souvent :
  - a) de l'**air** lorsque le sol est sec
  - b) un mélange d'**air** et de **vapeur d'eau** lorsque le sol est humide.
  - c) Lorsque tous les vides sont remplis d'eau, le sol est dit **saturé**.
- **l'eau** : on distingue plusieurs catégories d'eau dans le sol.
  - L'eau libre peut circuler entre les grains,
  - l'eau adsorbée constitue un film autour de chaque grain. Elle joue le rôle de lubrifiant entre les grains.
- **le squelette solide** : Il est composé de particules issues de décomposition physique et chimique de roches mères.

Les grains peuvent :

  - a) être de taille très fine
  - b) être recristallisés.

L'assemblage des différentes tailles de grains déterminera pour partie le comportement du sol.

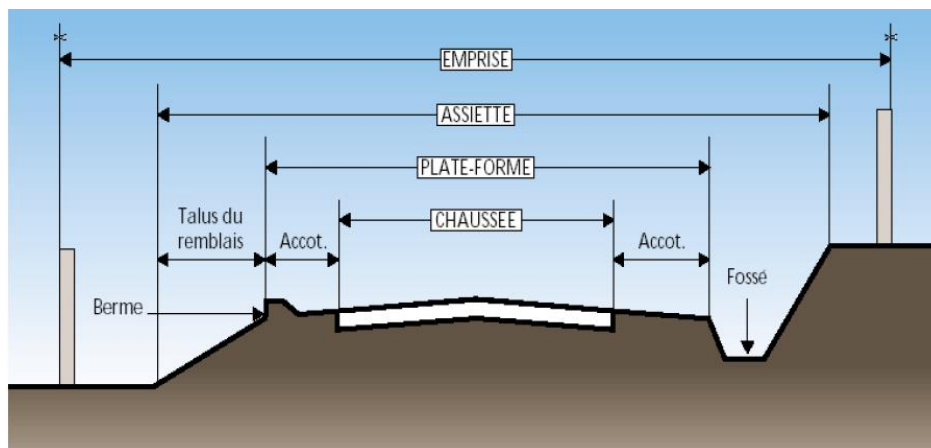
Ce sol se déforme par glissement des particules qui le composent.

Il résiste par frottement et/ou par attraction inter-particulaire (c'est la cohésion).

Ainsi l'action de terrasser consiste à manipuler des sols et à les utiliser comme matériaux.

## 4.1.2 Profil en travers (route)

En conception routière, le **profil en travers** d'une route est représenté par une coupe perpendiculaire à l'axe de la route de la surface définie par l'ensemble des points représentatifs de cette surface.



Profil en travers routier

Le profil en travers peut se rapporter soit au terrain naturel, soit au projet.

En général on représente sur le même document à la fois terrain naturel et projet, ce qui permet de bien percevoir l'intégration du projet dans le milieu naturel.

#### 4.1.2 Comportements des sols

Le comportement des sols varie en fonction de ses composants:

##### 1 - Cas des sols régis par les fractions granulaires

$$0\% < Q \text{ matériaux inf à } 80\mu\text{m} < 12\%$$

Ces matériaux résistent au cisaillement suivant la loi suivante:

$$\tau = \sigma \operatorname{tg}(\Phi)$$

avec

- $\sigma$  = contrainte normale admissible
- $\operatorname{tg}(\Phi)$  = coefficient de frottement interne

$\Phi$  est fonction de la granularité, de la distribution granulaire et de la compacité.

$\Phi$  peut varier de 30 à 60°

La pente des talus devra être inférieure à cette valeur.

Ces matériaux sont :

- plutôt perméables,
- en général non gélif,
- ils n'ont aucune résistance en traction,
- plus ou moins traficables,
- leur portance est élevée,
- ils sont plus ou moins érodables.

## 2 - Cas des sols régis par leur fraction argileuse

Q matériaux inf à 80  $\mu\text{m}$  > 12%

Ces matériaux se caractérisent par leur cohésion.

L'argile y joue le rôle de «ciment».

Leur résistance au cisaillement s'exprime ainsi:

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg}(\Phi)$$

avec  $C$  : valeur représentant la cohésion argileuse.

$\Phi$  : varie de 0 à 20°.

$C$  est fonction de :

- l'état hydrique,
- la compacité,
- nature minéralogique de l'argile.

Cette nature minéralogique dépend de la roche mère à partir de laquelle l'argile s'est formée et de sa structure cristalline à l'origine.

Elle se présente sous forme de feuillets ou plaquettes.

Chaque feuillet résulte de la superposition:

- de couches tétraédriques de silice
- de couches octaédriques d'alumine.

$C$  peut varier de quelques Pa à plusieurs Mpa.

La portance et la traficabilité de ces matériaux dépend de leur teneur en eau.

Ils sont quasiment imperméables.

Leur gélivité dépend de leur teneur en argile.

Ainsi très peu de sols se présentent sous la forme d'une seule fraction granulaire (grave alluvionnaire, argile des Flandres ...).

La plupart sont des mélanges de deux fractions. Leur comportement est donc complexe.

Le but des essais d'identification est d'analyser la part relative des deux fractions pour préjuger du comportement du sol dans sa globalité.

Il est parfois nécessaire de réaliser des essais de comportement.

#### 4.1.3 Paramètres physiques caractéristiques des sols.

Les sols sont composés :

- de grains solides,
- d'eau,
- d'air.

On distingue:

- |   |   |
|---|---|
| - la masse volumique des grains solides | $\gamma_s = \text{masse grains} / \text{volume grains}$ |
| - la masse volumique du sol humide      | $\gamma = \text{masse totale} / \text{volume total}$    |
| - la masse volumique du sol sec         | $\gamma_d = \text{masse sol sec} / \text{volume total}$ |
| - la porosité                           | $n = \text{volume air + eau} / \text{volume total}$     |
| - indice des vides                      | $e = \text{volume air + eau} / \text{volume grains}$    |
| - % des vides d'air                     | $n_a = \text{volume d'air} / \text{volume total}$       |
| - degré de saturation                   | $S_r = \text{volume d'eau} / \text{volume air + eau}$   |
| - teneur en eau pondérale               | $w = \text{volume d'eau} / \text{volume des grains}$    |
| - teneur en eau volumique               | $w_v = \text{volume d'eau} / \text{volume totale}$      |

#### 4.1.4 Essais d'identification des sols remaniés

Des essais caractérisent la nature des sols.

- La granulométrie est réalisée par :
  - analyse granulométrique par tamisage pour  $D > 100 \mu\text{m}$
  - sédimentométrie pour  $D < 100 \mu\text{m}$ .
- L'argilosité est réalisée soit par la mesure des **limites d'Atterberg** par :
  - la mesure de l'**équivalent de sable**,
  - l'essai au bleu de **méthylène**.

Des essais caractérisent l'état des matériaux.

La mesure de la teneur en eau par comparaison avec des critères spécifiques au matériau permet de définir la quantité d'eau correspondant à la résistance maximum.



Des essais caractérisent le comportement du sol au compactage.

On recourt le plus souvent à l'essai **Proctor** normal ou modifié.

Les essais Proctor déterminent le comportement mécanique du sol sous le trafic :

- l'essai CBR (immédiat et après immersion),
- l'essai à la plaque,
- l'essai à la dynaplaque
- l'essai de déflexion sous jumelage.

Des essais caractérisent le comportement vis à vis des **agressions mécaniques**.

Il s'agit principalement de la mesure de la fragmentabilité:

- l'essai micro-deval
- l'essai Los Angelès.

Des essais caractérisent le comportement vis à vis des **agressions physico-chimiques**.

- l'essai d'altérabilité.

Des essais caractérisent le comportement vis à vis **du gel**. 10/04/2014.PPPPP

- l'essai de gonflement au gel
- l'essai de gélifraction.

Des essais caractérisent le comportement du sol vis à vis de **l'eau**.

Il s'agit plus particulièrement de mesurer les phénomènes :

- de circulation,
- d'emprisonnement de l'eau à l'intérieur du sol.

**L'essai de succion** met en évidence cette caractéristique. Nous traiterons au paragraphe suivant l'incidence de l'eau dans les sols.

#### 4.1.4. 1. Analyse granulométrique

C'est l'opération consistant à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques :

- poids,
- taille,
- ....

C'est un essai qui a pour objet de la détermination de la répartition des différents grains (taille) d'un échantillon de sol (matériau), suivant leurs dimensions :

- cailloux,
- gravier,
- gros sable,
- sable fin,
- limon,
- argile.

L'essai consiste à classer les différents grains constituant l'échantillon d'un matériau en plusieurs **classes de tailles décroissantes** en utilisant une série des **tamis**, emboîtées les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas, et reposants sur un fond.

Les **résultats** de l'analyse granulométrique sont donnés sous la forme d'une courbe dite **courbe granulométrique** et construite en portant sur un graphique.

Le matériau étudié est placé en partie supérieur des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis.



Tamiseuse avec ses tamis

## Domaine d'utilisation

La granulométrie est utilisée pour la classification des sols en vue de leur utilisation dans la chaussée.

On appelle **granulat** un ensemble de grains minéraux, de dimensions comprises entre:

**0 et 125 mm**

De provenance naturelle ou artificielle, destinés à la confection :

- des mortiers, des bétons,
- des couches de fondation, des couches de base et de roulement des chaussées,
- des assises et des ballasts de voies ferrées.

Les granulats suivant leurs dimensions, sont appelés :

- fillers,
- sablons,
- sables,
- gravillons,
- graves,
- ballast.

## CLASSES GRANULAIRES :

- Un granulat est caractérisé du point de vue granulaire par sa classe d/D.
- Le premier désigne le diamètre minimum des grains d et le deuxième le diamètre maximum D.
- Lorsque d est inférieur à 0,5 mm, le granulat est désigné 0/D.
- Si un seul chiffre est donné, c'est celui du diamètre maximum D exprimé en mm

| Appellation                 |        | Dimension de la maille des tamis en (mm) |
|-----------------------------|--------|--|
| Pierres cassées et cailloux | Gros   | 50 à 80                                  |
|                             | moyens | 31.5 à 50                                |
|                             | petits | 20 à 31.5                                |
| Gravillons                  | Gros   | 12.5 à 20                                |
|                             | moyens | 8 à 12.5                                 |
|                             | petits | 5 à 8                                    |
| Sable                       | Gros   | 1.25 à 5                                 |
|                             | moyens | 0.31 à 1.25                              |
|                             | petits | 0.08 à 0.31                              |
| Fines, farines et fillers   |        | Inferieur à 0.08                         |

Les sols sont classés en fonction de leur granularité.

- les sols dont le **Dmax** est **inférieur à 50 mm** sont considérés comme **sols fins** et graveleux et sont notés **A** ou **B**
- les sols dont le Dmax est supérieur à 50 mm sont considérés comme grossiers et blocailleux et sont notés **C** et **D**
- si la fraction de matériaux inférieurs à 80  $\mu\text{m}$  est supérieure à 35% les sols sont considérés comme fins et sont notés **A**
- si la fraction de matériaux inférieurs à 80  $\mu\text{m}$  est comprise entre 12% et 35% les sols sont considérés comme fins et sont notés **B**
- si la fraction de matériaux inférieurs à 80  $\mu\text{m}$  est inférieure à 12% les sols sont considérés comme granulaires et sont notés **D** et **C1**.

| N | Fraction de matériaux | Dmax               | Classificaton            | Notification |
|---|-----------------------|--------------------|--------------------------|--------------|
| 1 | < 12%                 | < 80 $\mu\text{m}$ | granulaires              | D et C1      |
| 2 | entre 12% et 35%      | < 80 $\mu\text{m}$ | fins                     | B            |
| 3 | > 35%                 | < 80 $\mu\text{m}$ | fins                     | A            |
| 4 |                       | < 50 mm            | Sols fins et graveleux   | A et B       |
| 5 |                       | > 50 mm            | grossiers et blocailleux | C et D       |

#### 4.1.4. 2. Limites d'Atterberg

**Albert Atterberg Mauritz** (19 Mars 1846 - 4 Avril 1916) est un chimiste **suédois** et scientifique agricole qui a créé les limites d'Atterberg qui sont communément appelés par les ingénieurs géotechniques.

En Suède, il est également connu pour la création de l'échelle de la taille des grains Atterberg, qui reste celle de l'utilisation.

Atterberg a obtenu son doctorat en chimie de l'Université d'Uppsala en 1872 et y est resté comme un maître de conférences en chimie analytique jusqu'en 1877, période pendant laquelle il a visité la Suède et à l'étranger pour étudier les derniers développements dans la chimie organique.



En géotechnique, les limites d'Atterberg définissent à la fois un indicateur qualifiant :

- la plasticité d'un sol,
- l'essai qui permet de définir ces indicateurs.

Cet essai a été établi par l'agronome suédois Albert Atterberg (en).

Cet essai permet de caractériser l'**argilosité** du sol, pour cela on utilise deux paramètres :

- **Limite de plasticité ( $W_p$ )** : Caractérisant le passage du sol de l'état solide à l'état plasticité.

Elle varie de 0% à 100%, mais elle demeure généralement inférieure à 40%.

- **Limite de liquidité ( $W_L$ )** : Caractérisant le passage du sol de l'état plastique à l'état liquide

$$W_L = w (N/25)^{0.121}$$

- **w** : teneur en eau au moment de l'essai donnant n coups
- **N**: nombre de coups

La détermination de  $W_L$  et  $W_P$  nous donnent une idée approximative des propriétés du matériau étudié, elles permettent de le classer grâce à l'abaque de plasticité de Casagrande.

### **But de l'essai**

Cet essai permet de prévoir le comportement des sols pendant les opérations de terrassement, en particulier sous l'action de la teneur en eau, il se fait uniquement sur les éléments fins du sol (caractériser les sols fins).

La teneur en eau d'un sol peut en effet beaucoup varier au cours des opérations de terrassements.

Pour la fraction fine (graviers exclus), la cohésion tient à la présence d'eau :

- a) Parfaitement sec, le matériau serait **cohérent**.
- b) Au-dessus d'une certaine teneur (**limite de plasticité**), on peut le pétrir en forme de boudin, de boulette ou de fil.
- c) Pour une teneur plus forte (**limite de liquidité**), il forme un liquide, visqueux, qui ne conserve pas la forme qu'on lui a donnée.

La détermination, soigneusement normalisée, de ces deux teneurs caractéristiques appelées limites d'Atterberg, est un élément important d'identification, et permet déjà de prévoir certaines propriétés.

### **Consistance d'un sol**

La consistance d'un sol fin ou cohérent peut être appréciée par un essai de résistance mécanique ;

- essai de rupture en compression simple,
- essai de poinçonnement ou de pénétration.

Cette consistance varie considérablement avec la teneur en eau du sol.

En faisant décroître progressivement la teneur en eau d'un échantillon de sol on constate que le sol passe successivement par plusieurs états:

#### **a) Etat liquide à teneur en eau élevée.**

Le sol se comporte comme un liquide. Sa résistance au cisaillement est nulle et il se répand lorsqu'on le déverse.

Les grains du sol sont pratiquement séparés par l'eau.

## b) Etat plastique

Le sol est stable naturellement mais, dès qu'un effort lui est appliqué, il est le siège de déformations importantes, en grande partie non réversibles sans variation notable de volume et sans apparition de fissures.

Par trituration il perd sa consistance.

Certains sols, dits **thixotropes**, ont la propriété de récupérer avec le temps une partie de leur résistance.

## c) Etat solide

Le sol a le comportement d'un solide, l'application d'un effort n'entraîne que de faibles déformations.

Le passage à l'état solide s'effectue au départ avec réduction du volume ou retrait, puis à volume constant donc sans retrait.

## Indicateurs

### Limite de liquidité

La **limite de liquidité** « $W_L$ » caractérise la **transition** entre un **état plastique** et un **état liquide**.

C'est la **teneur en eau pondérale**, exprimée en pourcentage, au-dessus de laquelle le **sol s'écoule** comme un **liquide visqueux** sous l'influence de son **propre poids**.

Formule de la teneur en eau pondérale:

$$\frac{\text{Masse d'eau (g)}}{\text{Masse de sol sec (g)}}$$

## Limite de plasticité

La limite de plasticité « $W_p$ » caractérise la transition entre un état solide et un état plastique.

Cette limite indique la teneur en eau pondérale, en pourcentage, maximale pour travailler un sol et éviter la compaction.

En dessous de cette limite, le sol est friable ou facilement travaillable d'un point de vue agronomique.

La limite de plasticité est déterminée par le modelage d'un petit fil avec la partie fine d'un sol sur une surface plane, non poreuse.

La procédure est définie dans la norme ASTM D 4318.

Si le sol est plastique, ce petit fil conserve sa forme jusqu'à un diamètre très étroit.

L'échantillon peut alors être reformulé et l'essai est répété.

Comme la teneur en humidité diminue à cause de l'évaporation, le fil commence à se briser à grands diamètres.

La limite de plasticité est définie comme étant la teneur en eau, où le fil se casse à un diamètre de

**3 mm.**

Un sol est considéré comme non-plastique, si un fil ne peut pas rouler jusqu'à 3 mm, quel que soit le taux d'humidité de la partie fine du sol.

## Indice de liquidité

$$I_l = \frac{W - W_p}{I_p}$$

## Indice de densité

$$I_d = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$



### Indice de plasticité ( $I_p$ ),

Il mesure l'étendue de la plage de teneur en eau dans laquelle le sol se trouve à l'état plastique.

$$I_P = W_L - W_P$$

Suivant la valeur de leur indice de plasticité.

Les sols peuvent se classer comme suit :

| Indice de plasticité | Degré de plasticité  |
|----------------------|--|
| $0 < I_p < 5$        | Non plastique (l'essai perd sa signification dans cette zone de valeurs) |
| $5 < I_p < 15$       | Moyennement plastique  |
| $15 < I_p < 40$      | Plastique  |
| $I_p > 40$           | Très plastique   |

La plasticité est une propriété caractéristique des éléments très fins ou argileux du sol, en relation avec l'existence de couches d'eau adsorbée avec ou sans électrolytes dissociés.

On conçoit donc que les limites d'Atterberg et l'indice de plasticité d'un sol varient non seulement avec l'importance de sa fraction argileuse mais également avec la nature des minéraux argileux et des cations adsorbés.

À titre d'exemple, les valeurs les plus fortes de cet indice sont obtenues avec les montmorillonites et plus particulièrement celles chargées du cation sodium ( $\text{Na}^+$ ).

Les sols sont classés en fonction de leur argilosité.

Le seuil de plasticité est utilisé pour caractériser l'argilosité des sols.

Son interprétation est d'autant plus fiable que la proportion pondérale de la fraction  $0/400 \mu\text{m}$  (fraction utilisée pour l'essai) contenue dans le sol étudié est importante et que l'argilosité de cette fraction est grande.

Au delà d'une proportion de 50% de cette fraction et d'une valeur de 12, l'interprétation de l' $I_p$  est simple, mais elle devient quasiment impossible lorsque cette proportion chute en dessous de 35 % et la valeur de l' $I_p$  en dessous de 7.

La valeur de bleu de méthylène VBS permet de caractériser l'argilosité d'un sol.

Ce paramètre représente la quantité de **bleu de méthylène** pouvant s'adsorber sur les surfaces externes et internes des particules de sol.

C'est une grandeur liée à la surface spécifique du sol.

On peut considérer que la valeur au bleu du sol exprime globalement la quantité et la qualité de l'argile contenue dans le sol.

La VBS s'exprime en grammes de bleu pour 100g de sol.

### **Indice de consistance**

Il s'agit d'un indicateur dérivé :

$$I_c = \frac{w_l - w}{I_p}$$

où  $w = w$  normale de l'échantillon

### **Mode opératoire de l'essai**

L'essai s'effectue sur le mortier du sol (fraction inférieure à 400  $\mu\text{m}$ ).

### **Limite de liquidité :**

- Le sol est mélangé à une quantité d'eau.
- La pâte obtenue est placée dans une coupelle de 100 mm de diamètre environ.
- On trace sur la pâte lissée une rainure normalisée avec un outil spécial.
- À l'aide d'une came, on fait subir une série de chocs à la coupelle.
- On observe en fin d'expérience le contact des deux lèvres de la rainure.
- La limite de liquidité est la teneur en eau en % qui correspond à une fermeture en 25 chocs.

### **Limite de plasticité :**

- On mélange l'échantillon avec des quantités variables d'eau; on façonne avec la pâte un rouleau de 6 mm de diamètre pour une centaine de mm de longueur.
- Puis on atteint 3mm de diamètre en le roulant (souvent avec les doigts), après 5 à 10 aller-retour maximum.
- La limite de plasticité est la teneur en eau en % du rouleau qui se fissure et se brise lorsqu'il atteint un diamètre de 3 mm.

La précision de l'essai est de l'ordre du demi-point de teneur en eau pour la détermination de la limite de liquidité et du point de teneur en eau pour la détermination de la limite de plasticité.

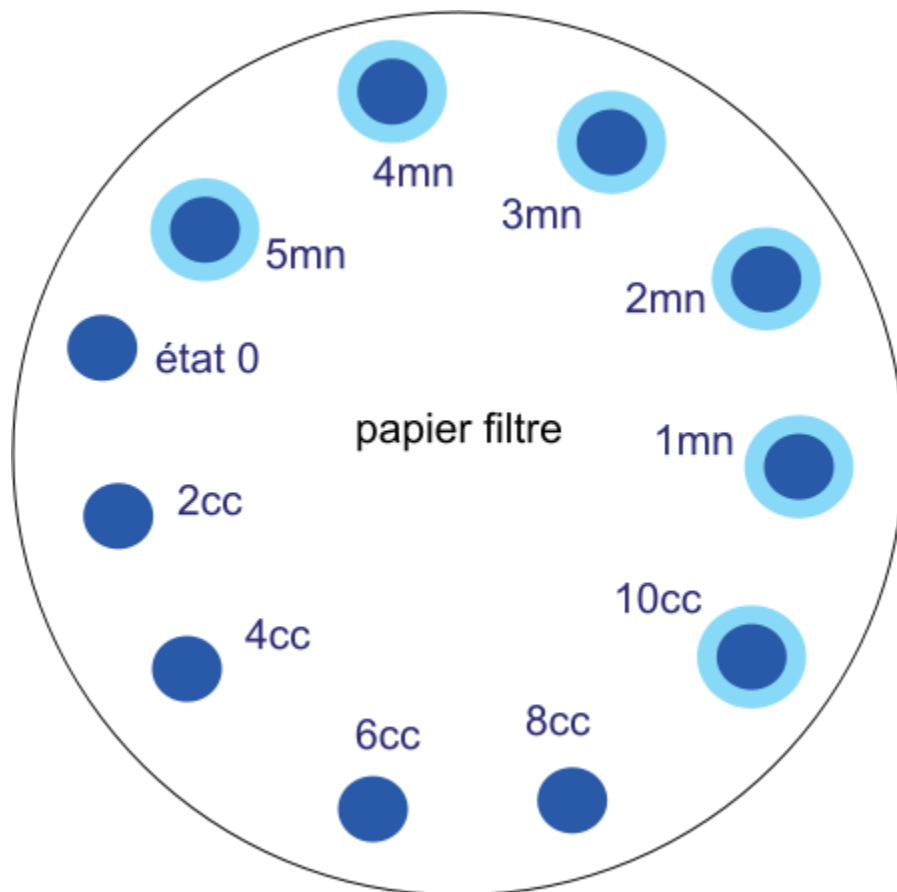
#### **4.1.4.3. Essai au bleu de méthylène**

L'essai au bleu de méthylène, également appelé « essai au bleu », est un essai utilisé en géotechnique pour déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient.

Le bleu de méthylène est en effet adsorbé préférentiellement par les argiles du type montmorillonites (argiles gonflantes) et les matières organiques.

Les autres argiles (Illites et Kaolinites) sont peu sensibles au bleu.

L'essai consiste à mesurer la quantité de colorant (bleu de méthylène) fixée par 100 g de la fraction granulaire analysée.



### Propreté

Lorsque l'on frotte des granulats non lavés dans la main (du sable ou des gravillons), on peut constater des traces de poussière sur les doigts.

Il s'agit de particules argileuses de petites dimensions.

Celles-ci sont susceptibles d'être nuisibles à la qualité du mélange ou de la pâte que l'on veut obtenir à partir du granulat, comme du béton ou un mélange bitumineux.

D'autres particules peuvent également avoir ce même effet néfaste, comme :

- des scories,
- du charbon,
- des particules de bois,
- des feuilles mortes
- des fragments de racines.

Dans le **domaine du béton**, ces particules perturbent l'hydratation du ciment et entraînent des défauts d'adhérence entre les granulats et la pâte.

Dans les **mélanges bitumineux**, comme les enrobés bitumineux ou les enduits superficiels, un défaut de propreté peut conduire également à une perte d'adhérence du granulat avec le liant et donc à un désenrobage.

La propreté des sables est évaluée par deux essais complémentaires.

- L'équivalent de sable (codé SE sur le plan européen)
- L'essai au bleu de méthylène (codé MB).

Tant que cet essai donne de bons résultats ( $SE > 60$ ) c'est que le sable est propre.

Si le résultat est mauvais, cela peut être dû au piégeage accidentel de fines inertes (calcite, quartz) dans le flocculant ou à la présence d'un excès d'argiles.

Pour le savoir on effectue alors, et seulement si le résultat de l'équivalent de sable est mauvais, un essai dit au bleu fondé sur l'adsorption de bleu de méthylène qui ne se fixe que sur certaines argiles.

### Principe

L'essai au bleu de méthylène est pratiqué sur :

- la fraction granulaire 0/2mm des sables courants,
- les fillers (0 / 0,125 mm) contenus dans un sable fillerisé,
- un gravillon ou un tout venant.

Il a pour but :

- de révéler la présence de fines de nature argileuse,
- d'en déterminer la concentration.

a) On appelle valeur de bleu **VB** d'un sable (MB en europe):

*« Quantité en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 1 kg de fraction 0/2mm du sable »*

b) On appelle valeur de bleu des fillers **VBF** ou **MBF** :

*« Quantité en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 1 kg de fraction 0/0,125 mm d'un granulat (fillers, sable fillerisé, tout venant gravillon) ».*

c) On appelle valeur de bleu sols **VBS** ou **MBS**:

« *Quantité en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fraction 0/50mm d'un sol* »

Une solution de bleu de méthylène est ajoutée progressivement par doses successives à une suspension de l'échantillon de granulats dans l'eau.

L'adsorption de la solution colorée par l'échantillon est vérifiée après chaque ajout de solution en effectuant un test à la tache sur du papier filtre pour déceler la présence de colorant libre.

Lorsque la présence de colorant libre est confirmée, la valeur de bleu de méthylène (MB ou MBF) est calculée et exprimée en grammes de colorant adsorbé par kg de la fraction granulaire testée.

### **Réactifs**

Que l'essai soit réalisé sur un sable, un gravillon ou un sol, les réactifs utilisés sont :

« *une solution colorée de bleu de méthylène à 10 g/l, de l'eau déminéralisée ou distillée et de la kaolinite, de valeur de bleu de méthylène connue (MBK)* »

### **Appareillage**

L'appareillage à utiliser est le suivant:

- une burette,
- du papier-filtre,
- une tige de verre,
- un agitateur à ailettes, capable de vitesses de rotation contrôlées variables pouvant atteindre 600 tr/min avec 3 ou 4 ailettes de 75 mm de diamètre,
- une balance,
- un chronomètre,
- un tamis, avec des ouvertures de 2 mm,
- un bécher d'une capacité d'environ 1 l à 2 l,
- une fiole d'une capacité de 1 l,
- une étuve ventilée,
- un thermomètre,
- une spatule,
- un dessiccateur.



**Ajouts successifs  
de bleu**



**Prélèvement  
d'une goutte de  
suspension**



**Dépôt sur papier  
filtre**

Un autre appareil permet, de façon automatique de déterminer la valeur de bleu de façon plus fiable et répétitive car indépendante de l'interprétation humaine.

Il utilise la méthode turbidimétrique et la mesure se fait par un colorimètre.

Cet appareil permet d'analyser les sables sur la fraction granulaire 0/4mm ainsi que sur les fillers ou les sols.



### **Mode opératoire pour un sable ou un gravillon**

#### **Préparation**

Un échantillon de granulat est préparé de telle sorte qu'il contienne au moins 200 g de la fraction 0/2mm.

Il est séché à 110 °C, refroidi à la température ambiante, puis passé au tamis de 2 mm et toutes les particules retenues au tamis de 2 sont éliminées.

L'échantillon résiduel est ensuite pesé (en grammes) (M1).

Pour préparer la suspension, il convient de verser 500 ml d'eau distillée ou d'eau déminéralisée dans le bécher et ajouter l'échantillon séché en remuant bien avec la spatule.

#### 4.1.4.4. Essai Proctor

L'essai Proctor est un essai routier, il s'effectue à l'énergie dite modifiée, il y a aussi l'énergie normale.

Les remblais posent à l'ingénieur routier un certain nombre de problèmes, d'où on peut citer :

- La stabilité des talus.
- La résistance des talus à l'érosion.
- Le tassement.
- Le compactage.

Le « **compactage** » est le procédé le plus économique toujours utilisé dans la construction des remblais pour améliorer la densité sèche du sol ( $\gamma_d$ ).

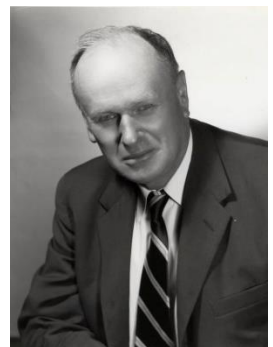
Le « compactage » est une réduction pratiquement instantanée du volume du sol dû à la réduction des vides d'air.

Il ne y'a aucune expulsion d'eau ce qui différencie le compactage de la consolidation.

L'étude du compactage s'effectue à l'aide d'un damage normalisé connu sous le nom de :

#### « Essai Proctor »

L'essai Proctor, mis au point par l'ingénieur Ralph R. Proctor (architecte américain, 1933), est un essai géotechnique qui permet de déterminer la teneur en eau nécessaire pour obtenir la densité sèche maximale d'un sol granulaire par compactage à une énergie fixée (dame de poids, nombre de coups et dimensions normés).





Les valeurs obtenues par l'essai sont notées :

- $W_{OPN}$  pour la teneur en eau optimale,
- $\gamma_{OPN}$  pour le masse volumique sèche optimale.

Une autre référence peut être déterminée pour une énergie supérieure (notamment pour des couches de chaussées granulaires), il s'agit de :

### **Optimum Proctor Modifié (OPM)**

#### **Principe**

L'essai Proctor a pour but de déterminer, pour un **compactage d'intensité donnée**, la **teneur en eau** à laquelle doit être compacté un sol pour obtenir la **densité sèche maximum**. La teneur en eau ainsi déterminée est appelée :

#### **«Teneur en eau optimum Proctor »**

Pour bien comprendre le test, il suffit de faire l'expérience sur une plage.

Sur une plage, en allant vers la mer :

- Le sable en amont est très sec.
- On s'enfonce facilement dedans.
- Sa compacité est très faible.

Plus on avance vers la mer :

- plus la teneur en eau augmente,
- et moins on s'enfonce en marchant sur le sable,
- jusqu'à obtenir une compacité optimum.

Le sable est alors très dur sous les pieds (il est proche de la saturation: il n'y a presque plus d'air présent dans le sol).

Ensuite, quand on s'approche encore de la mer, on s'enfonce de nouveau.

Le sable est saturé en eau et sa compacité est amoindrie.

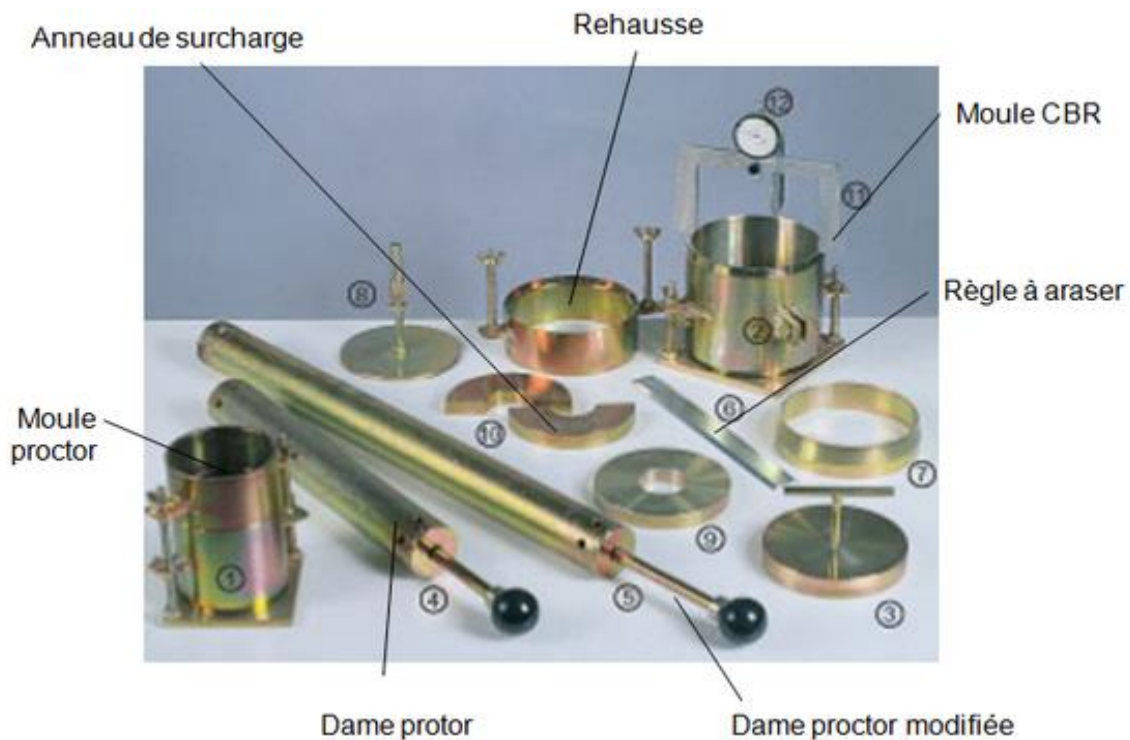
La courbe déterminée par l'essai Proctor diminue alors.

Ce résultat dépend de chaque sol et n'est donc pas théorique mais expérimental.

## Mesure en laboratoire

L'essai Proctor consiste à compacter dans un moule standard, à l'aide d'une dame standard et selon un processus bien déterminé, un échantillon du sol à étudier disposé en trois couches dans un moule Proctor de volume connu et à déterminer le teneur en eau du sol et sa densité sèche après le compactage.

Les grains passants par le tamis de **5 mm** sont compactés dans le **moule Proctor**.

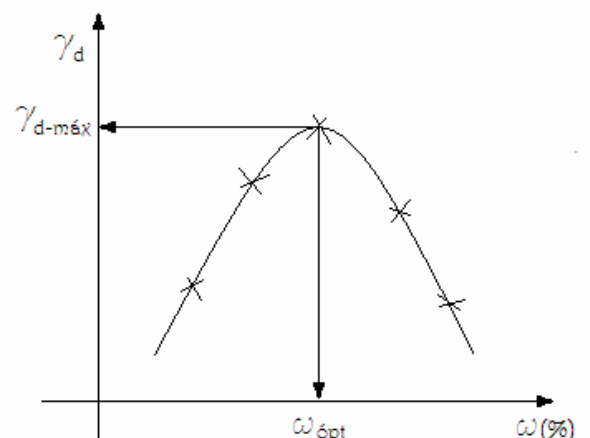


Equipement pour l'essai Proctor

L'essai Proctor est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes (2%, 4%, 6%, 8%, 10%, 12%, 14%, 16%) en fixant l'énergie de compactage.

On détermine ainsi plusieurs points de la courbe représentative des densités sèches en fonction des teneurs en eau.

On trace alors la courbe en interpolant entre les points expérimentaux.



Elle représente un maximum dont :

- l'abscisse est « la teneur en eau optimum Proctor »,
- l'ordonnée « la densité sèche maximum Proctor ».

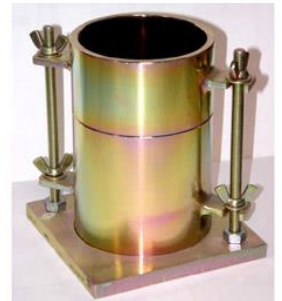
L'essai Proctor s'effectue généralement pour deux compactages d'intensités différentes :

**a) Essai Proctor normal :**

le compactage n'est que moyennement poussé. Il est généralement utilisé pour les études de **remblais en terre** (barrages et digues).

Il s'effectue en trois couches avec « la dame Proctor normal », l'énergie de compactage est de :

- 55 coups de dame par couche dans le **moule C.B.R.** (California Bearing Ratio)
- 25 coups par couche dans le **moule Proctor normal**.



Moule Proctor normal

**b) Proctor modifié :**

Le compactage est beaucoup plus intense; il correspond en principe au compactage maximum que l'on peut obtenir sur chantier avec :

- les rouleaux à pieds de mouton,
- ou les rouleaux à pneus lourds modernes.

C'est ordinairement par l'essai Proctor modifié que l'on détermine les caractéristiques de compactage (teneur en eau optimale, densité sèche maximale) des matériaux destinés à constituer la fondation ou le corps de chaussée des routes et des pistes d'aérodromes.

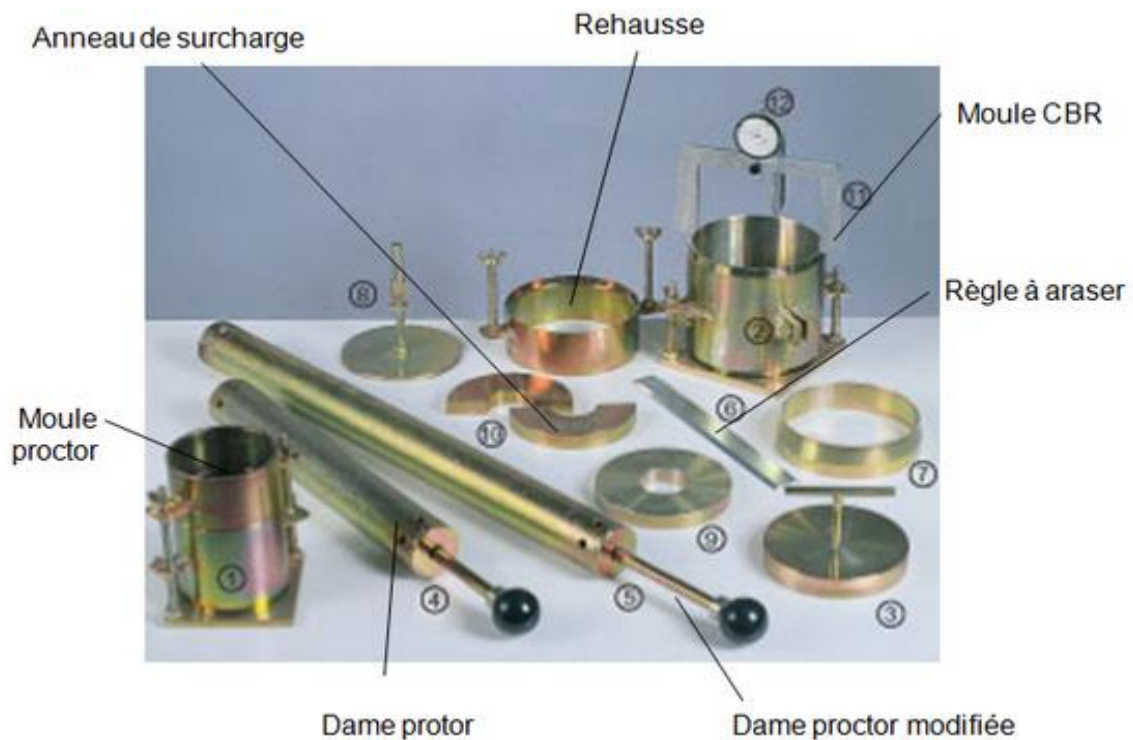
Le compactage dans ce cas se fait en cinq couches successives avec « la dame Proctor modifié » l'énergie de compactage est de :

- 55 coups de dame par couche dans le moule C.B.R.
- 25 coups par couche dans le moule Proctor.

## Appareillage essai Proctor:

Il comprend :

- Le moule Proctor constitué par un tube cylindrique métallique inoxydable de 10,15 cm de diamètre intérieur et 11,7 cm de hauteur, pourvu d'un fond et d'une hausse métallique amovibles.
- La dame Proctor normal qui est constitué par un mouton de 2,49 kg (cylindrique de 5,1 cm de diamètre) dont la hauteur de chute est de 30,4 cm.



- Du sable.
- Une étuve.
- Une règle à araser d'environ 250 mm.
- Truelles pour le malaxage.
- Des maillets, burins, couteaux, etc. pour le démoulage, ou mieux un appareil à démouler.
- Une balance sensible au gramme d'une portée maxima au moins égale à 20 kg .

- Une éprouvette graduée.
- De l'eau.
- Un bac.

### **Mode opératoire essai Proctor**

- On prend 2,5 kg de sable préalablement préparé qu'on verse dans un bac.
- On ajoute une certaine quantité d'eau (\*) proportionnelle au poids du sable utilisé.
- A l'aide de la truelle on malaxe bien le sable.
- On remplit le moule Proctor normalisé en trois couches puis après avoir versé chaque couche on compacte l'aide de la dame Proctor normal en 25 coups en respectant la hauteur de chute et en assurant une répartition équitable des coups sur la surface à compacter.
- On procède de la même manière après la mise en place de la 2eme et 3eme couche.
- Une fois le moule rempli, on arase le sable avec une règle à araser, on comble les vides laissés à la surface.
- On prélève ensuite un échantillon d'environ 100 g à la surface du moule, puis on retire la base de ce dernier afin de prendre un 2<sup>eme</sup> échantillon d'a peu près du même poids.
- A la balance, on évalue les masses des deux prélèvements puis on les fait passer à l'étuve au moins pendant 24h aux termes desquelles on va repeser les échantillons.
- Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau suivant.
- L'essai est répété plusieurs fois de suite sur des échantillons portés à des teneurs en eau croissantes (2%, 4% ,6% ,8% ,10%,12% ,14%,16%)

## Utilisation de l'essai Proctor dans les travaux de compactage de sols

En conception routière, lorsque lors de la construction d'un stock de terre (un remblai), l'objectif va être de compacter le sol afin à la fois de stocker un maximum de matériau dans le volume donné, et aussi d'augmenter la stabilité du remblai pour éviter les phénomènes de glissement.

L'essai Proctor permet de connaître la densité maximale possible d'un matériau, et sa teneur en eau nécessaire pour aboutir à cette densité.

En remblai, si le matériau est trop sec ( $W < W_{OPN}$ ), il faudra alors l'humidifier (le plus souvent à l'aide d'une sous-soleuse et d'un malaxeur).

S'il est trop humide ( $W > W_{OPN}$ ), il faudra l'aérer jusqu'à obtenir la teneur en eau OPN.

Une fois la teneur en eau optimale atteinte, le compacteur roule sur le matériau, jusqu'à atteindre la compacité maximum ( $\gamma_{OPN}$ ).

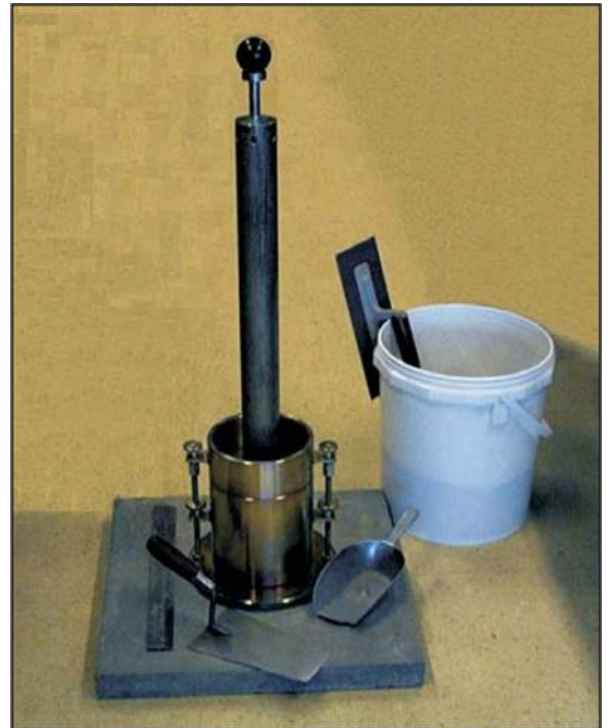
En couche de forme, la portance exigée par la structure de la chaussée est beaucoup plus importante qu'en remblai.

De ce fait l'énergie de compactage est plus grande :

- 2 700 J pour essais Proctor Modifié
- 570 J pour l'essai Normal.

Dans le cadre du guide des terrassements routiers, GTR, les conditions à respecter pour un sol sont un nombre de passes plus grand pour une teneur en eau optimale  $W_{OPM}$ .

La portance est mesurée à long terme notamment à l'essai à la plaque, avant de réaliser la structure de chaussée pour vérifier que la portance de la plateforme est conforme au dimensionnement retenu.





#### 4.1.4.5. L'essai Micro Deval

Il a pour but la détermination de la **résistance à l'usure** par le **frottement réciproque** des éléments d'un granulat.

#### Description de la machine Micro Deval

La machine Micro Deval comporte :

- Un à quatre cylindres creux en acier inox ayant un diamètre intérieur de 20 cm et une longueur utile de 15.4 cm;
- ces cylindres ont une épaisseur supérieure ou égale à 3 mm.
- Ils sont posés sur deux arbres horizontaux soudés sur un châssis métallique tubulaire et sont aussi très étanches grâce à un joint placé sur le couvercle.



Un moteur assure une rotation de 100 tours par minute et s'arrête en achevant :

- 12 000 tours pour un échantillon de granulométrie variant entre 4-14 mm et
- 14 000 tours pour un échantillon ayant une granulométrie variant de 25-50 mm.



Des billes d'inox de 10 mm, assurent la charge abrasive.

### Principe de l'essai

Le matériau soumis à cet essai évolue par frottement des éléments les uns sur les autres, sur le cylindre de la machine en rotation et sur les boulets (charge abrasive)

### Préparation de l'échantillon

La granulométrie de l'échantillon doit être conforme à l'une des classes granulaires types : 4-6,3 ; 6,3-10 ; 10-14 ; 25-50.

Laver l'échantillon et le faire sécher à l'étuve jusqu'à une température de 105°C et un poids constant (5 h au minimum).

Pour une granulométrie qui varie de 4-14 mm prendre 500 g de l'échantillon et pour celle variant entre 25-50 mm prendre 10 kg de l'échantillon.

### Mode opératoire

Concernant l'essai sur les gravillons compris entre 4-14 mm, la charge de boulets relative à la classe granulaire choisie :

| classes granulaires<br>(mm) | Poids échantillon<br>(g) | Poids de la charge<br>(g) |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 4-6,3                       | 500                      | 2000                      |
| 6,3-10                      | 500                      | 4000                      |
| 10-14                       | 500                      | 5000                      |

En présence de l'eau, on rajoute 2.5 L d'eau.

### Résultats

Soit

- **M** la masse du matériau soumis à l'essai et
- **m** la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai;
- la résistance à l'usure s'exprime par le **Coefficient de Micro Deval** qui s'écrit:

$$CMD=100*(m/M)$$



#### 4.1.4.6. Essai Los Angeles

Il permet de mesurer les **résistances** combinées :

- aux chocs,
- à la détérioration progressive par frottement réciproques des éléments d'un granulat.

Ce mode opératoire s'applique aux granulats utilisés pour la constitution des chaussées et bétons hydrauliques.

#### Description de la machine Los Angeles

La machine Los Angeles comporte :

Un cylindre creux en acier de 12 mm d'épaisseur, fermé à ses deux extrémités ayant :

- un diamètre intérieur de 711 mm et
- une longueur intérieure de 508 mm.

Le cylindre est porté par deux axes horizontaux fixés à ses deux parois latérales, mais ils n'entrent pas à l'intérieur du cylindre.



Sur toute la longueur du cylindre, on trouve une ouverture de 150 mm de largeur qui permet d'introduire l'échantillon.

Au cours de l'essai, cette ouverture est bouchée hermétiquement aux poussières par un couvercle immobile tel que la surface intérieure reste cylindrique ;

Une tablette en saillie placée à 40 cm du rebord du couvercle. Elle est démontable, en acier dur et de section rectangulaire.

Elle repose suivant un plan diamétral, le long d'une génératrice et est fixée par des boulons sur les parois latérales ;

Un moteur assurant au tambour de la machine une vitesse de rotation comprise entre **30 et 33** tr/mn;

Un bac destiné à ramasser les matériaux après l'essai ;

Un compte-tours de type rotatif, arrêtant au nombre de tours voulu ;

Une charge qui est constituée par des **boulets sphériques** de 47 mm de diamètre et pesant 420 et 445 g.

Ces boulets ne doivent pas s'user de façon asymétrique.

### **Principe de l'Essai**

Il consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6 mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets et aux frottements réciproques de la machine Los Angeles, pour cela il évolue pendant l'essai.

La granularité du matériau soumis à l'essai est choisie parmi six classes granulaires qui sont :

- 4/6,3 mm
- 6,3/10 mm
- 10/14 mm
- 10/25 mm
- 16/31,5 mm
- 25/50 mm

Selon le type de granularité, la masse de la charge de boulets varie.

Si

- $M$  est la masse du matériau soumis à l'essai,
- $M_1$  est la masse des éléments inférieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai qui est égouttée et séchée à l'étuve jusqu'à poids constant.

On définit alors le coefficient Los Angeles LA qui est un pourcentage en masse du rapport des éléments passant aux tamis de 1,6 et la masse initiale sèche.

$$LA = 100 \times (M - M1) / M$$

LA : c'est la résistance à la fragmentation par chocs et par frottements réciproques des éléments du granulat.

### **Mode opératoire**

L'essai est mis en route en exécutant à la machine :

- 500 rotations à une vitesse comprise entre 30 et 35 tr/min pour toutes les classes,
- 1000 tours à une vitesse entre 30 et 35 tr/mn pour la classe 25-50 mm.

Après l'essai on emporte les granulats et on les ramasse dans le bac placé sous l'appareil pour éviter les pertes des granulats, il faut apporter l'ouverture au-dessus de ce bac.

On blute le matériau contenu dans le bac sur le tamis de 1,6 mm puis on lave le refus à 1,6 mm dans un autre bac et on le verse dans le bac troué.

Dès que le refus est séché à l'étuve alors on détermine les poids de la pesée M1, et on calcule alors le coefficient Los Angeles :

$$LA = 100 \times (M - M1) / M$$

#### 4.1.5 Comportements des sols et emploi en remblai et couche de forme

Les aspects à considérer systématiquement pour étudier les capacités de réemploi des sols sont les suivants:

- aptitude à la densification
- aptitude à supporter la circulation (caractéristique importante en phase de chantier)
- aptitude au traitement à la chaux ou au ciment
- caractère évolutif

D'autres aspects sont à considérer en fonction du contexte:

- la gélivité
- l'érodabilité
- la capillarité

##### aptitude des sols à la densification:

Cette aptitude sera déterminée par :

- la distribution pondérale des différentes particules (analyse granulométrique),
- par l'argilosité (Limites d'Atterberg et valeur au bleu), en fonction de l'angularité et en fonction de l'évolution de densité en fonction de la teneur en eau (essai Proctor). Ce dernier critère est le plus significatif.

##### aptitude des sols à supporter la circulation:

Cette aptitude est importante en :

- phase chantier,
- pour la stabilité des plateformes.

Elle se mesurera par la possibilité de niveler la partie supérieure des terrassements.

Cette capacité au nivellement est déterminée par :

- le Dmax
- la distribution pondérale des particules (analyse granulométrique).

Elle se mesure aussi par la possibilité du sol à supporter des efforts tangentiels

- analyse granulométrique,
- limites d'Atterberg
- valeur au bleu.

La glissance de surface marquera :

- la qualité du sol à supporter le trafic de chantier en sécurité,
- sa capacité à « ancrer » les couches supérieures.

Dernier aspect de cette aptitude: la sensibilité à l'eau. On mesurera l'évolution de la portance en fonction de la teneur en eau (mesure de l'indice de portance immédiat I.P.I.).

aptitude au traitement à la chaux, au ciment ou au liants routiers:

Cette aptitude devient de plus en plus importante, dans le cadre d'une meilleure utilisation des ressources naturelles et de l'économie des matériaux rares (matériaux alluvionnaires de lit mineur).

caractère évolutif:

Ce caractère prend deux dimensions différentes, pour l'utilisation en remblai ou en couche de forme.

En remblai, il sera important de connaître le comportement du matériau sous :

- les contraintes de mise en œuvre et dans l'ouvrage en service (mesure de la masse volumique des blocs et essais de fragmentabilité LA),
- le comportement du matériau sous des variations de régime hydrique.

En couche de forme, il sera nécessaire de connaître le comportement du matériau :

- aux chocs,
- à l'attrition en présence d'eau causée par la circulation des engins :
  - essais Los-Angeles,
  - Micro-Deval humide,
  - essai de friabilité.

## 4.3 L'eau et le gel dans les chaussées

### 4.3.1 L'eau et l'argile

L'importance de l'eau dans les sols est liée à la présence d'argile.

Les argiles, comme nous l'avons indiqué ci-avant, forment des structures :

- tétraèdres
- octaèdres assemblées en feuillets.

Selon la nature des composants, la distance des feuillets est plus ou moins importante laissant une place plus ou moins importante en contact avec le milieu extérieur: c'est la surface spécifique du matériau.

Exemples: la Montmorillonite  $600 \text{ m}^2 / \text{g}$

la kaolinite  $20 \text{ m}^2 / \text{g}$

La sensibilité à l'eau en sera affectée d'autant. La relation entre argile et eau est liée aux caractéristiques électriques de l'argile en surface:

La particule d'argile présente un déficit de charge à sa périphérie, la molécule d'eau présente elle une charge positive, elle répond en partie au déficit de la particule d'argile.

Il existe une liaison très forte, de plusieurs dizaine de Mpa, appelée couche de Stern, dont la densité est de 1,5 très difficile à supprimer.

Le bleu de méthylène, utilisé lors de l'essai VBS vient se caler aux alentours de la couche de Stern, il caractérise bien la surface spécifique.

La mesure de la teneur en eau n'affecte que très peu la couche de Gouy.

Il existe une différence de potentiel entre la couche de Gouy et la couche de Stern.

La pureté de l'eau joue un rôle important sur la valeur de cette d.d.p.: plus cette eau est minéralisée plus la d.d.p. est faible.

Cette organisation à l'échelle macroscopique interfère à une échelle plus grande de la manière suivante:

- l'argile perd peu d'eau par drainage gravitaire
- la perméabilité à l'eau est d'autant plus importante que le sol est saturé en eau.

#### 4.3.2 Les mouvements d'eau dans le sol

La loi de Darcy a défini que la vitesse de l'eau est proportionnelle au gradient hydraulique. Les différences de perméabilité génèrent des phénomènes d'imperméabilité:

- si deux couches perméables présentent des perméabilités de même ordre, la couche de relative moindre perméabilité se comporte temporairement comme un matériau imperméable.
- ces différences de perméabilité génèrent des circulations d'eau horizontale.

#### *Forces capillaires*

Une pression plus faible que celle de l'air qui s'exerce sur l'eau à l'intérieur des grains conduit à des mouvements de l'eau. Ce phénomène permet à l'eau de s'élever à une hauteur supérieure à celle de l'état naturel.

#### *La succion*

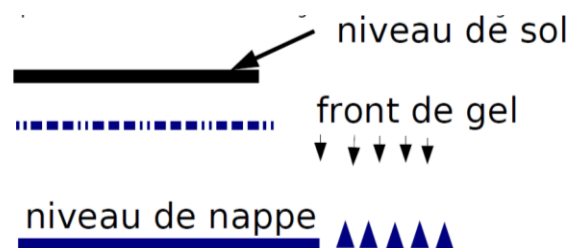
La succion est caractérisée par les courbes de succion. Sa valeur en laboratoire est d'autant plus forte que le tube est fin (loi de Laplace).

Une courbe de succion est propre à un matériau. La pente de cette courbe indique l'effort de drainage pour faire varier la teneur en eau W%.

#### 4.3.3 Les effets du gel dans le sol

L'isotherme zéro reste stable dans le sol tant que les forces de succion font transiter de l'eau vers le front de gel.

Cette isotherme descend ensuite pour retrouver de l'eau et faire gonfler les lentilles de gel.



#### 4.3.4 Perméabilité et mouvements d'eau

Un sol totalement sec perd sa perméabilité. Le traitement du sol avec des liants hydrauliques modifie sa perméabilité.

L'aération par une machine à disques ou par ripage augmente la perméabilité des sols et facilite l'évaporation.

#### 4.3.5 Applications aux chaussées

Le maximum de portance sera obtenu pour une plateforme avec la plus petite teneur en eau (ce qui n'indique pas que la teneur en eau doit être nulle).

Il y a lieu d'interposer une couche drainante sous les couches de chaussées, si l'arase de terrassement risque de présenter une teneur en eau élevée (variation du niveau d'eau en zone de profil rasant et en terrain argileux par exemple).

La couche drainante exerce un rôle de château d'eau, si elle subit des effets de succion vis à vis du sol support (sol argileux).

Il y a lieu de dimensionner la couche de forme pour supprimer les remontées capillaires dans la chaussée.

On détermine la teneur en eau en fonction de la valeur donnée par l'essai Proctor.

Après mesure on détermine la courbe de succion du matériau.

On peut alors calculer l'épaisseur de la couche de forme pour éviter la remontée d'eau par capillarité.

Il est aussi important de veiller au drainage de l'arase terrassement, pour limiter les remontées d'eau dans les couches supérieures. Cette précaution est aussi bien valable dans les zones de déblai que dans les zones de remblai.

Dans le même registre, la pente transversale de l'arase terrassement sera soignée, pour des matériaux fins, sa valeur devra être égale à 4%.

En remblai, l'interface entre matériau sera soignée pour toujours maintenir des pentes vers l'extérieur et ne pas bloquer de zones de rétention d'eau.

Le « gras de talus » devra faire l'objet d'une attention particulière, il doit être réalisé avec des matériaux perméables.

Les fossés ont pour rôle d'assainir l'arase terrassement, leur cote de fil d'eau doit donc être inférieure à cet arase, si la profondeur des fossés est limitée par l'emprise de la route, les fonctions de recueil d'eau de surface et d'assainissement de l'arase doivent être séparées.

On implante alors des drains routiers, recouverts de matériaux drainants en partie supérieure.

25/04/2016



# Terrassements

## 1. Généralités

La construction d'une route exige la mise en forme de l'assise et de la plateforme qui vont recevoir le corps de chaussée et les équipements y afférents, cette mise en forme nécessite des opérations appelées :

### « Terrassements ».

La réalisation des terrassements a pour but de modifier la topographie d'un site afin de donner à la route les caractéristiques géométriques stipulées conformément aux indications prescrites par les plans d'exécution (tracé en plan, profil en long et profil en travers).

Ces modifications peuvent être :

- modestes (excavation requise pour installer les fondations superficielles d'un bâtiment),
- linéaires (aménagement d'une structure routière, construction d'une digue),
- complexes (construction des approches d'un échangeur routier multiple).

Ils sont certes limités dans le cas des voiries à très faible trafic ( $t \leq t_5$ ), mais peuvent constituer des ouvrages importants dans le cas de voiries dont le trafic est compris entre  $t_5$  et  $t_3$  ( $t_5 < t \leq t_3$ ).

En fonction de la nature du chantier à réaliser, trois cas sont envisagés :

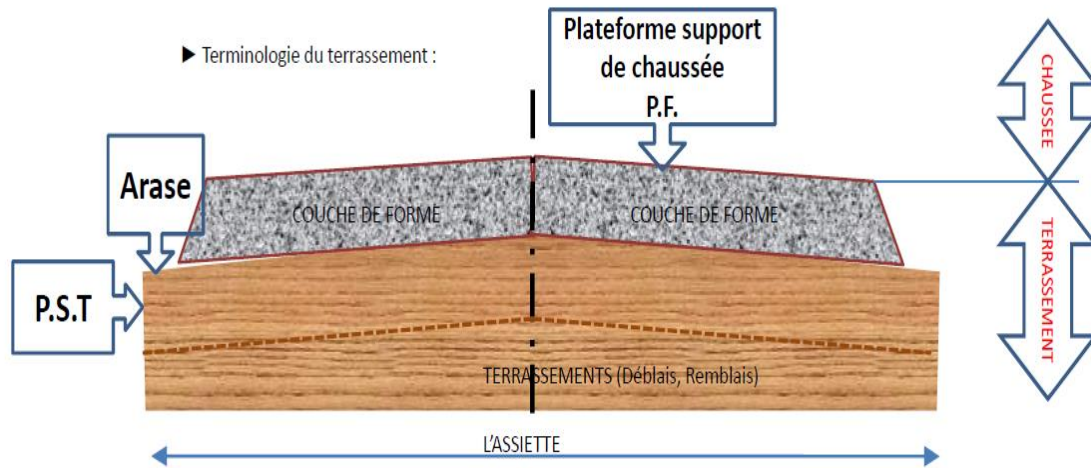
- cas **de renforcement** d'une voirie existante (ampleur très faible),
- cas **de réfection** d'une voirie existante,
- cas **de construction** d'une voirie neuve : importants.

On distingue deux opérations majeures dans les activités de terrassement, le déblai et le remblai.

- Le **déblai** consiste à **retirer** et à **transporter** sur le site du projet ou à l'extérieur de celui-ci (**Dépôt**), des sols décapés ou excavés.
- Le **remblai** consiste à **transporter** à partir du site du projet ou de l'extérieur de ce dernier (**gite d'emprunt**), des matériaux conformes à l'usage et aux spécifications techniques.

Les terrassements représentent une phase délicate d'un chantier, car ils impliquent en permanence une adaptation à la qualité des terrains rencontrés qui plus est, sont tributaires des conditions climatiques régnant au moment de l'exécution des travaux.

## II.2. Terminologie du terrassement



### Définitions

#### a) Partie Supérieure des Terrassements (PST)

Elle désigne conventionnellement :

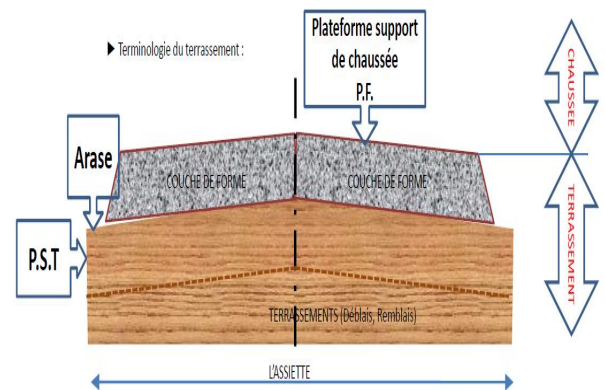
#### « Le mètre supérieur »

- des terrains rapportés (cas des remblais),
- ou en place (cas des déblais).

#### b) Arase (AR)

La surface de la PST est dénommée :

« arase »



### **c) Couche de forme Positionnée sur l'arase**

Elle est constituée de :

- matériaux granulaires,
- ou traités,
- insensibles à l'eau et au gel,
- sur une épaisseur usuelle de :

**$E_p = 0,20$  à  $0,80$  m.**

La surface de la couche de forme est dénommée

**« plateforme » (PF).**

### **Règles et Objectifs :**

- Utiliser et s'adapter aux matériaux du chantier ou d'une zone extérieure la plus proche possible appelée :

#### **Zone d'Emprunt**

- Utilisation de règles de référence à partir desquelles l'ingénieur doit en apprécier les adaptations en fonction de son expérience (  $\Rightarrow$  pas de calcul mathématique).
- Adapter le terrain naturel au profil en long du projet et proposer une portance suffisante pour permettre la réalisation des couches de chaussées et accepter le trafic.
- Déblais, remblais, drainage, talus, décapage

### II.3. Cas de renforcement d'une voirie existante

Les travaux de terrassements sont, dans ce cas, réduits, mais dépendent de la structure de la voirie existante

En règle générale, le revêtement en béton est réalisé directement sur la voirie existante, sans couche intermédiaire et sans aucune précaution préalable.

L'existence sur l'ancien revêtement de déformations importantes, pouvant par conséquent entraîner de fortes variations d'épaisseur du béton, conduit le plus souvent à envisager de réaliser au préalable les travaux suivants :

Rabotage du revêtement existant dans le cas de déformations transversales (ornières de 3 cm ou plus),



Reprofilage de l'ancienne chaussée dans le cas de déformations longitudinales (ondulations courtes).



### II. 3. Cas de réfection d'une voirie existante

Les travaux de terrassements sont, dans ce cas, réduits.

Leur exécution suit le processus suivant :

- décaissement et évacuation des matériaux de l'ancienne structure,
- réorganisation éventuelle des réseaux enterrés,
- travaux éventuels de purge et de comblement,
- compactage de la plate-forme.



### II.4. Cas de construction d'une voirie neuve

Les travaux de terrassements pour la construction d'une chaussée neuve comprennent :

- les travaux préparatoires,
- les terrassements.

#### II. 4.1 - Les travaux préparatoires sont de trois types :

Avant d'entamer l'exécution des terrassements, des **travaux préparatoires** (préalable) doivent être effectués dont les plus importants sont :

- Débroussaillage.
- abattages d'arbres et essouchage des souches des arbres ;
- Décapage de la terre végétale et éventuellement tous les sols organiques ;
- déplacements éventuels de réseaux existants.
- installation de chantier.
- piquetage général (travaux topographiques)

#### II. 4.1.1 - Tracé de la route

Dans le cas de la voirie à **faible trafic**, un tracé qui suit au maximum le terrain naturel est recommandé.

Mais pour des considérations liées à la sécurité et au confort de l'utilisateur, ceci n'est malheureusement pas toujours possible.

Des travaux de terrassements en **déblai** et en **remblai** sont donc nécessaires.

Pour permettre la réalisation des travaux de terrassements dans de bonnes conditions, il convient d'effectuer des travaux de **piquetage** permettant :

- d'une part de matérialiser le tracé de la route,
- d'autre part de déterminer sur le terrain la hauteur ainsi que la limite des zones de déblai et de remblai.

#### **II. 4.1.2 - Dégagement de l'emprise de la route**

Ces travaux comprennent :

- Le **débroussaillage** consiste à abattre et à retirer les arbustes et la végétation qui se trouvent sur le site des travaux.
- L'**abattage** des arbres,
- Le **dessouchage** : est l'opération qui permet de retirer de la terre, les souches des arbres abattues. Cette opération peut se faire à l'aide:
  - De pousseur si le nombre de souches est important.
  - De pelle hydraulique lorsque le nombre de souches est modeste.
- les démolitions diverses,
- les déplacements des réseaux, etc.

#### **II. 4.1.3 - Décapage de la terre végétale**

Ces travaux consistent à enlever la **couche superficielle** (couche de sol organique) du terrain naturel sur une épaisseur bien déterminée :

- de l'ordre de 15 à 20 cm.
- de façon que les débris d'arbres :
  - racines,
  - branche,
  - feuilles.
- la terre végétale,

Soient entièrement enlevés. Ce sol organique est soit entassé pour servir ultérieurement lors de l'aménagement final, soit transporté à l'extérieur du site des travaux.

Des **pent**es transversales de 2 à 4 % seront prévues afin de permettre l'évacuation :

- des eaux de pluie,
- de ruissellement.

Ces travaux peuvent être réalisés à l'aide :

- d'un boteur,
- ou d'une pelle mécanique.



## II. 4.2 - Les terrassements

L'objet des terrassements est double :

- modifier le terrain naturel pour l'amener au niveau prévu par le projet,
- préparer une plate-forme support de la chaussée répondant aux critères de qualité nécessaire d'ordres :
  - géométrique,
  - et mécanique.

Les travaux comprennent :

- l'exécution des déblais,
- l'exécution des remblais,
- l'exécution de la plate-forme support de la chaussée.





## II. 4.2.1 - Exécution des remblais

L'objectif principal est d'obtenir :

- un **remblai stable** qui supporte la chaussée,
- **sans tassements** qui seraient préjudiciables à sa bonne tenue.



Pour atteindre cet objectif, il convient de respecter les règles ou dispositions particulières de mise en œuvre et qui se résument comme suit :

- **exécuter** le remblai par **couches successives** au moyen de **bouteurs**,
- **densifier** chaque couche par un **compactage** méthodique,
- **apporter** un **soin** particulier à l'exécution de sa **partie supérieure** qui recevra la **chaussée**.



Quant au choix des matériaux pour la construction d'un remblai, ceux qui sont **insensibles à l'eau** seront réservés en priorité :

- pour réaliser la **partie supérieure** du remblai
- de manière à lui conférer une **bonne portance**.

Les matériaux **sensibles** à l'eau seront utilisés en **corps de remblai** après **traitement aux liants hydrauliques**.

### 4.2.3 - Réalisation de la plate-forme support de la chaussée

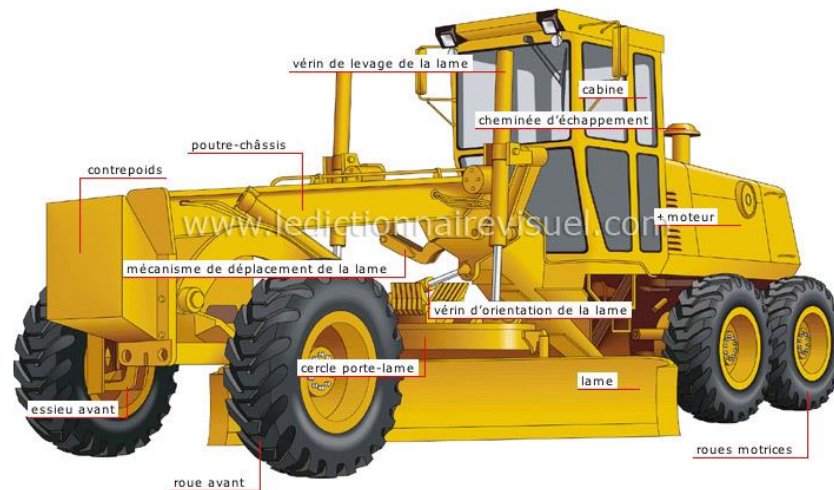
En déblai comme en remblai, la couche supérieure des terrassements doit posséder des **qualités suffisantes** pour recevoir la **chaussée**.

Les matériaux qui la composent doivent être de bonne qualité et leur compactage particulièrement soigné pour leur conférer une portance satisfaisante.



Par ailleurs, un bon réglage de la surface et des pentes transversales de **2 à 4 %** doit être obtenu afin de permettre l'évacuation des eaux de pluie et de ruissellement.

Le réglage de la surface est réalisé par une **niveleuse**.



Mais il arrive souvent que le sol, mis à nu par les terrassements, soit dans un état tel qu'il n'autorise même pas la circulation des camions de chantier.

Il doit donc être amélioré ou protégé de manière à constituer un support convenable permettant en premier lieu la construction de la chaussée et à plus long terme un bon fonctionnement de celle-ci.

Pour améliorer et/ou protéger le sol en place, plusieurs solutions existent et en particulier la technique de traitement des sols en place aux

**liants hydrauliques et/ou à la chaux**  
qui constitue une solution largement répandue.

## 4.3 - Traitement des sols en place

### 4.3.1 - Définition

Traiter un sol avec un **liant hydraulique**, c'est le mélanger intimement avec cet élément d'apport pour lui conférer des propriétés nouvelles.

Il s'agit d'un traitement qui utilise les affinités **chimiques** du sol et du liant hydraulique.

Il est complété par un traitement **mécanique**

« **le compactage** ».

Cette technique a connu un très fort développement, depuis une dizaine d'années, dû essentiellement à deux phénomènes :

- a) le **premier phénomène** est lié à des impératifs économiques associés à un souci **écologique** croissant.

En effet, alors que les profils géométriques des projets routiers deviennent de plus en plus contraignants et demandent des mouvements de terre importants dans des sols parfois difficilement réutilisables, les gisements naturels de matériaux nobles, inégalement répartis, s'épuisent.

Il convient donc d'épargner les ressources existantes, d'autant plus que le coût du transport est élevé.

A ces impératifs économiques, il convient d'adjoindre un souci fort louable de préservation de l'environnement poussant à limiter la constitution de décharges de matériaux impropres à la réutilisation.

- b) le **second phénomène** auquel est lié le développement du traitement des sols en place repose sur les **progrès technologiques** réalisés ces dernières années en la matière.

Nous sommes loin actuellement des conditions matérielles de la première expérience réalisée en 1962, les perfectionnements énormes apportés aux :

- matériels d'épandage,
- de malaxage,
- augmentation du parc de matériel de traitement ainsi que sa diversification ont permis d'améliorer sensiblement les rendements et la qualité du travail réalisé.

Aujourd'hui, la technique du traitement aux liants hydrauliques s'étend à un nombre de plus en plus élevé de sols tels que :

- les limons,
- les argiles,
- les marnes,
- les matériaux sableux, sableux-graveleux et graveleux,
- les craies,
- les calcaires tendres, etc.

### **II. 4.3.2 - Objectif**

Le traitement des sols a pour objet de rendre utilisable un sol qui ne présente pas les caractéristiques requises pour servir sans préparation, à supporter :

- une route,
- un parking,
- une plate-forme industrielle.

Le traitement aux liants hydrauliques des sols en place permet **d'éviter l'apport de matériaux extérieurs au chantier.**

C'est donc une solution :

- économique,
- écologique.

Il a deux raisons d'être :

- a) soit améliorer des sols trop humides, qu'il s'agisse du sol en place pour permettre la progression du chantier ou qu'il s'agisse de sols à réutiliser en remblai.  
Dans ce cas, on cherche un effet rapide pour obtenir un niveau de portance suffisant permettant la circulation des engins et la mise en œuvre possibles, mais sans chercher à obtenir des performances mécaniques forcément élevées par la suite.
- b) soit réaliser des plates-formes rigides et stables aux intempéries pour la circulation de chantier et la mise en œuvre de la fondation.  
Dans ce cas, on recherche une résistance mécanique pour la plate-forme.

### II. 4.3.3 - Les différents types de traitement

Selon l'utilisation prévue (en couches de forme, en remblais ou en PST) et en fonction du type de sol à stabiliser, il existe plusieurs types de traitements des sols en place qui ne diffèrent que par la nature du liant utilisé.

En Algérie et en Europe, on utilise presque exclusivement les traitements suivants :

- le traitement à la chaux,
- le traitement au ciment ou aux liants hydrauliques routiers,
- le traitement mixte à la chaux puis au ciment ou aux liants hydrauliques routiers.



## II. 4.3.4 - Exécution des travaux

Elle suit le processus suivant :

### a) La préparation du sol à traiter,

### b) L'épandage du liant

Pour réduire et maîtriser la dispersion du liant hydraulique, il est préférable de retenir

- dans le cas de chantiers importants
- un épandeur à dosage pondéral, asservi à la vitesse d'avancement.



Le contrôle de la régularité de l'épandage et de la quantité des liants est réalisé par la méthode dite « à la bêche ».

### c) Le malaxage

Pour assurer une bonne homogénéité du matériau et une profondeur homogène du malaxage, il est judicieux de retenir un malaxeur à rotor horizontal ou un atelier compact de reconditionnement.

D'autre part, le malaxage foisonnant énormément les matériaux, il faut veiller

- lorsqu'on retraite par bandes jointives
- à mordre suffisamment (20 cm) dans la partie déjà foisonnée, pour ne pas laisser de matériau non malaxé en bordures de bandes.



## Le compactage

L'atelier de compactage ainsi que le nombre de passes nécessaires seront définis sur une planche d'essais de compactage.

Le compactage doit suivre sans tarder la fin du malaxage





### **Le réglage**

La définitif doit se faire par rabotage sur toute la largeur à régler et en aucun cas par comblement des points bas par les matériaux provenant de l'écrêtage des bosses.

Cette opération doit suivre immédiatement le compactage.

Elle se fait le plus souvent à la niveleuse.

Les matériaux provenant du rabotage doivent être évacués



### **La couche de protection** : le produit de cure.

Elle est destinée à protéger la couche traitée des intempéries, de l'évaporation de l'eau et du trafic.

Elle doit être réalisée dans les plus brefs délais après la fin du réglage.



Dans certains cas particuliers où le matériau à traiter est trop sec, il peut être nécessaire de procéder à un **arrosage avec malaxage**, avant épandage du liant, pour réhumidifier le sol.

Inversement, on peut procéder à un malaxage sans liant pour profiter des conditions atmosphériques favorables à une évaporation lorsqu'on est en présence de sols humides ou très humides.

#### **4.3.5 - Traitements - types**

La recherche de la meilleure adéquation (technique et économique) entre produits de traitements et matériaux à traiter pour une application donnée :

- a) remblai,
- b) PST,
- c) couche de forme

implique de reconnaître ces matériaux à partir des paramètres significatifs vis-à-vis des phénomènes intervenant dans la technique du traitement des sols.

Le tableau 9 donne, en fonction de l'état hydrique du sol et de la nature du sol (argileux ou non), l'ordre et l'organisation de ces différentes phases élémentaires d'exécution.



| Sol normal non argileux (1)  |  | Traitements préalables dans le cas de  |  |
|--|--|--|--|
| Teneur en eau légèrement supérieure à l'optimum Proctor normal   | Teneur en eau inférieure à l'optimum Proctor normal  | Sol argileux (2)   | Sol gorgé d'eau  |
| 1. Ouverture au scarificateur ou au ripper si le sol est très compact.   | 1. Ouverture au scarificateur ou au ripper si le sol est très compact.   | 1. Ouverture du sol au scarificateur ou au ripper  | 1. Ouverture du sol au scarificateur ou au ripper                        |
| 2. Passage du malaxeur sur l'épaisseur de la couche à stabiliser.  | 2. Epandage du ciment. Poids au m2 indiqué par le laboratoire.   | 2. Epandage de chaux grasse. Poids au m2 indiqué par le laboratoire et répandage de l'eau si nécessaire. | 2. Epandage de chaux vive. Poids au m2 indiqué par le laboratoire.       |
| 3. Laisser sécher le sol durant la journée.  | 3. Malaxage du ciment. Nombre de passages du malaxeur à déterminer sur chantier, réglage au grader et léger compactage | 3. Malaxage de la chaux. Nombre de passages du malaxeur à déterminer sur chantier.                       | 3. Malaxage de la chaux vive.  |
| 4. Refermer le sol en fin de journée.  |  | 4. Compactage.   | 4. Compactage.   |
| 5. Le lendemain, réouverture du sol au malaxeur. Après mesure de la teneur en eau, recommencer si besoin les opérations 2, 3 et 4. | 4. Passage du malaxeur sur 0,10 m environ de profondeur..  | 5. Laisser agir la chaux pendant 24 à 48 heures  | Poursuite avec un traitement type d'un sol non argileux (colonne 1 ou 2) |
| 6. Épandage du ciment. Poids au mètre carré fourni par le laboratoire  | 5. Répandage de l'eau. Nombre de litres au m2 indiqué par le laboratoire chantier. Remalaxage.                         | Poursuite avec un traitement type d'un sol non argileux (colonne 1 ou 2)                                 |  |
| 7. Malaxage du ciment. Nombre de passages du malaxeur à déterminer sur chantier et réglage au grader.                              | 6. Compactage. Nombre de passages à déterminer sur chantier pour atteindre 95% de l'Optimum Proctor                    |  |  |
| 8. Compactage. Nombre de passages à déterminer sur chantier pour atteindre 95% de l'Optimum Proctor                                | 7. Réglage au grader du sol malaxé et compacté.  |  |  |
| 9. Réglage au grader du sol malaxé et compacté.  | 8. Produit de cure dans les plus brefs délais.   |  |  |
| 10. Produit de cure dans les plus brefs délais.  |  |  |  |

(1) D'après la GTR et la norme NF P 11-300, les sols non argileux sont les sols de classes B<sub>1</sub> ; B<sub>2</sub> ; D<sub>1</sub> ; C<sub>1</sub>B<sub>1</sub> ; C<sub>1</sub>B<sub>2</sub> ; B<sub>3</sub> ; B<sub>4</sub> ; D<sub>2</sub> ; D<sub>3</sub> ; C<sub>1</sub>B<sub>3</sub> ; C<sub>1</sub>B<sub>4</sub> ; C<sub>2</sub>B<sub>3</sub> ; C<sub>2</sub>B<sub>4</sub> et éventuellement les sols de classes B<sub>5</sub> ; C<sub>1</sub>A<sub>1</sub> ; C<sub>1</sub>B<sub>5</sub> et C<sub>2</sub>B<sub>5</sub> si ces derniers sont très peu argileux (VB<sub>s</sub> < 0,5).

(2) D'après la GTR et la norme NF P 11-300, les sols argileux sont les sols de classes A<sub>2</sub> ; B<sub>6</sub> ; C<sub>1</sub>A<sub>2</sub> ; C<sub>1</sub>B<sub>6</sub> ; C<sub>2</sub>A<sub>2</sub> ; C<sub>2</sub>B<sub>6</sub> ; C<sub>2</sub>A<sub>1</sub> ; A<sub>3</sub> ; C<sub>1</sub>A<sub>3</sub> ; C<sub>2</sub>A<sub>3</sub> ; A<sub>1</sub> ; B<sub>5</sub> ; C<sub>1</sub>A<sub>1</sub> ; C<sub>1</sub>B<sub>5</sub> et C<sub>2</sub>B<sub>5</sub>.

**Tableau : Traitement types des sols**

# Réalisation des terrassements

### III.2.1 Les terrassements routiers organisation

Terrasser, c'est **extraire**.

Terrasser, c'est **transporter**.

Terrasser, c'est **mettre en dépôt ou en remblai**.

C'est un poste très important de la réalisation d'un chantier routier.

#### III.2.1.1 Des aléas fortement présents

En matière d'Ouvrages d'Art ou de Chaussées, la réalisation correspond en général aux prévisions. Il y a peu d'écart dans les dépenses.

En matière de terrassement en revanche, les aléas sont plus sensibles.

En effet la connaissance du contexte n'atteint pas un niveau de précision absolue.

Les travaux sont parfois différents du projet.

De plus les conditions météorologiques impactent directement les conditions de réalisation.

Nous l'avons vu précédemment la variation de la teneur en eau modifie le comportement des matériaux fins.

C'est un poste important aussi par la part qu'il représente :

- pour faire **1 kilomètre d'autoroute**, il y a entre **75 000 et 200 000 m<sup>3</sup>** de terrassement.
- dans le **coût d'une autoroute**, la part des terrassements varie entre **1/5 et 1/3**.

C'est aussi au sujet des terrassements que les **litiges** entre Maîtres d'ouvrage et entreprises sont les plus nombreux et les plus importants.

### III.2.1.2 Règle fondamentale : équilibre déblais - remblais

Autrefois, le terrassement était effectué manuellement et le transport par chariots à traction animale.

Les projeteurs recherchaient donc le plus petit volume à terrasser et la distance la plus courte pour le transport.

Les études cherchaient à faire "coller" le projet au terrain.

Il paraissait intéressant d'équilibrer les déblais avec les remblais, c'est à dire d'avoir des volumes égaux.

Aujourd'hui, ces notions d'équilibre et de minimisation des transports restent valables, mais passent au second plan.

Les matériaux ne sont plus découverts au fur et à mesure de l'extraction.

Grâce aux études géologiques, aux sondages, la nature des sols est connue et utilisée judicieusement.



### 3.3 La réalisation des déblais

L'exécution des déblais doit intégrer les contraintes propres à chaque phase de leur exécution:

- extraction
- préparation du chantier de remblai
- transport des matériaux

Les contraintes essentielles à prendre en compte sont :

- la gestion de l'écoulement de l'eau
- la réalisation des talus.

#### 3.3.1 L'extraction

Celle-ci se réalise, qui pour un type de matériau donné:

- banc rocheux,
- sols meubles
- compacts...

Conseille un type d'extraction.

#### 3.3.2 Préparation du chantier de remblai

Une fragmentation des bancs rocheux peut s'avérer nécessaire.

Elle est réalisée par l'emploi éventuel :

- du ripper,
- d'explosif,
- en achevant la fragmentation du remblai par l'utilisation d'un compacteur spécialisé (grid-roller ou rouleau à pointes ou encore kanding).



La maîtrise de la teneur en eau ;

- en s'assurant de la sensibilité à l'eau des matériaux,
- en évitant les ornières ou cuvettes en aménageant des pentes suffisantes (10%)
- en s'assurant qu'il existe un dispositif complet d'évacuation d'eau.

Dans les zones de forte pente, il peut être nécessaire de réaliser des redans qui permettront d'augmenter et d'assurer la stabilité des remblais, leur dimension et plus particulièrement le rapport hauteur sur largeur, dépendra des caractéristiques mécaniques des matériaux du sol de la zone support de remblai.

### III.2.3.3 Transports des matériaux

Terrasser, c'est déplacer le sol et donc transporter.

La phase du transport est donc importante et va conditionner le coût de l'opération.

Pour transporter, les engins retenus doivent présenter des caractéristiques adaptées aux cadences et aux distances:

a) **Bulldozer** : distance entre 0 et 50m

Pour une distance comprise entre :

**0 et 50 m environ,**

on utilise :

**Le bulldozer**



Bulldozer

Appelé aussi BOUTEURS (DOZERS Bulldozer)

#### Principe

Les dozers sont des tracteurs sur chenilles équipés à l'avant d'une lame.

Ils sont souvent équipés d'un ripper.

Les matériaux sont poussés par la lame à une vitesse entre :

**0 à 12 Km/H**

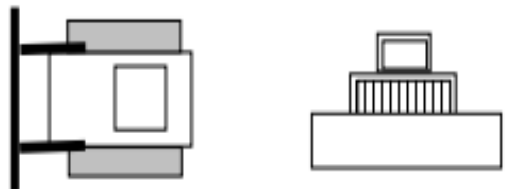
#### Famille

Le nom donné au tracteur est celui de son équipement (lame avant)

##### 1.1. Le bulldozer

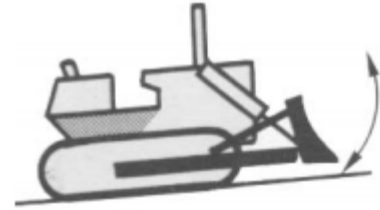
La lame ne peut pas être orientée et est perpendiculaire au tracteur.

Le conducteur peut juste régler la profondeur d'enfoncement de celle-ci dans le sol ou la relever de quelques dizaines de centimètre.



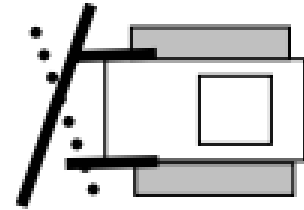
### 1.2. Le tip dozer

Il s'agit d'un bull dont on peut faire varier l'angle d'attaque de la lame.



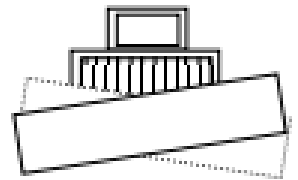
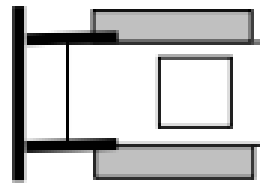
### 1.3. L'angle dozer

Il s'agit d'un bull dont la lame peut s'orienter dans un plan horizontal.



### 1.4. Le tilt dozer

Il s'agit d'un bull dont la lame peut s'incliner dans un plan vertical perpendiculaire au tracteur



Certains boteurs, cumulent plusieurs de ces fonctions

## Utilisation

Bull en anglais signifie

"Taureau"

Les bulldozers sont donc des machines conçues pour exercer un effort horizontal important toujours dans le sens de la marche.

Les modèles sur chenilles sont bien adaptés aux travaux en terrains meubles, mais les vitesses de déplacement étant faibles, ces engins ne sont rentables que sur des déplacements courts (inf. à 100 m).

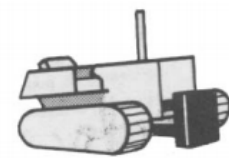
Les modèles sur roues, sont plus indiqués sur des distances longues, ils sont cependant plus rares.

Pour déplacer des matériaux sur moins de 100m, le boteur sur chenille est l'engin de production le plus économique.



Ce sont les engins de prédilection pour les travaux de refoulement, y compris sur sol arborés (déforestation).

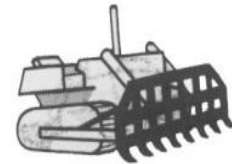
C'est le spécialiste du travail de pousseur (ou de tracteur) pour les scrapers, le buteur prend alors de nom de Pushdozer et est peut-être équipé spécifiquement d'une plaque de poussage.



Il effectue également le défonçage des terrains au ripper avant le travail des scrapers.

D'autre part, il est utilisé pour :

- le remorquage de fortes charges qui est sa spécialité,
- le débardage (transport de tronc par tirage)
- le déssouchage, il reçoit alors un équipement qui lui permet de concentrer son effort de poussé sur une petite surface, l'arrachement étant effectué par l'action combinée de l'avancement et du relèvement de l'outil.



Ils sont également utilisés pour la remise en état des sols et leur nivellement.

### **Productivité**

La production horaire est calculée ainsi :

$$\text{Cubage transporté} \times \text{Nombre de cycles}$$

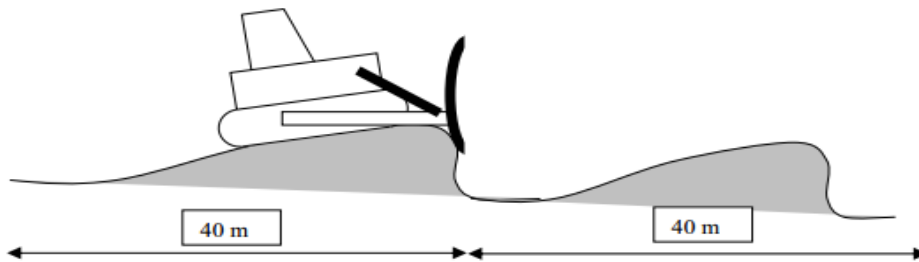
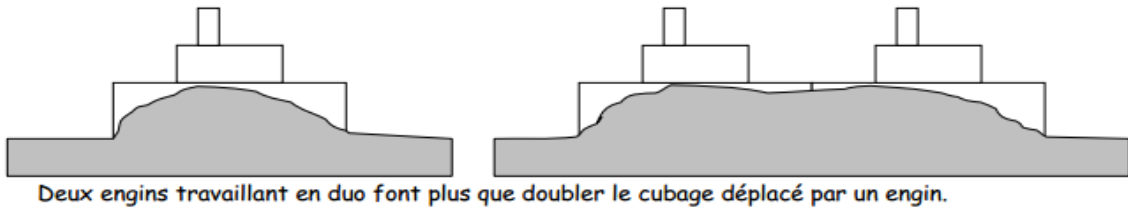
Le cubage dépend :

- de la nature du matériau
- de l'état et des pentes du terrain
- de la méthode de travail appliquée
- de la capacité de la lame.

Le nombre de cycle dépend :

- de la distance de transport
- du modèle de tracteur
- de son système de liaison au sol
- des vitesses Aller et retour
- de l'efficacité du travail (coef. de chargement)

$$\text{Coefficient de chargement} = \frac{\text{cubage transporté (m}^3 \text{ en place)}}{\text{capacité de la lame (m}^3 \text{ foisonnés)}}$$



Lorsque la distance dépasse 50 m. le poussage s'effectue en 2 passes successives.

#### Quelques chiffres :

- Poids de 7 à 93 Tonnes
- Pression sur le sol environ 0.7 kg/cm<sup>2</sup>
- Vitesse de 0 à 12 Km/H sur chenilles et de 6 à 35 km/H sur roues.
- Puissance de 100 à plus de 700 chevaux développant un effort de traction de 10 à 1400KN.
- Largeur de la lame de 2,5 à 6m.

#### Remarques :

- Un engin chenillé ne peut rouler sur route.
- Souvent, un dozer devra donc être démonté pour être déplacé d'un chantier à un autre.
- On démonte la lame, le châssis, la transmission, l'embrayage, les chenilles, etc....
- Et malgré tout le tracteur pèse parfois encore près de 64 Tonnes.

b) **Scraper** : distance entre 50 et 2000m

Pour des distances comprises entre :

**50 m et 2000 m environ,**

On utilise très souvent :

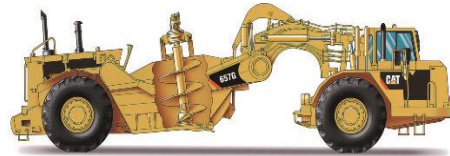
**Le scraper (décapeuse)**

- automoteur,



Scraper automoteur

- bimoteur fonctionnant seuls,



Scraper bimoteurs

- duo (push-pull) ou avec l'aide d'un bulldozer.



Scraper duo push-pull

Les matériaux sont transportés dans la benne du scraper à vitesse moyenne de :

**30 à 50 km/h**

Pour obtenir un meilleur rendement les **pistes** sont :

- larges de 10 m,
- aménagées pour résister aux pressions engendrées par les essieux pesant plus de 50 tonnes.

c) **Tombereaux** : distance entre 2000 et 10 000m

- pour des distances comprises entre

**2000 et 10000m**

les scrapers cèdent le terrain aux :

**Tombereaux**



Dumper

Le chargement est réalisé à l'aide d'une pelle ou avec un gros chargeur à pneus.

La piste sera encore plus soignée car la vitesse des tombereaux sera plus élevée

**60km/h**

d) **Camions** distances supérieures à 10 000m

Pour des distances supérieures à :

**10 000 m,**

**Les camions routiers**



Sont employés :

- 6x4,
- semi-remorques,
- double semi-remorques.



La piste devient alors une véritable :

**Chaussée**

La niveleuse est utilisée pour le fin réglage particulièrement pour les sols fins.

Cet engin entretient de plus sans cesse les pistes de chantier.



Niveleuse

### 3.3.4 Écoulement des eaux

L'écoulement d'eau sur un chantier de terrassement représente la **difficulté majeure** à éviter.

Il peut condamner l'activité du chantier.

L'écoulement des eaux doit être pris en compte :

- dans la préparation,
- tout au long du chantier.

L'écoulement des eaux trouve deux origines:

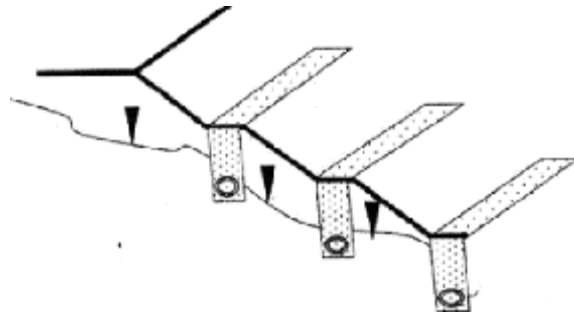
- les eaux superficielles liées aux intempéries,
- les eaux souterraines.

Si le terrain, avant exécution du déblai est parcouru par un écoulement souterrain ou par une nappe souterraine, les travaux peuvent être perturbés par l'écoulement des eaux.

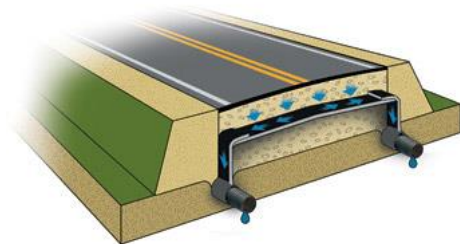
Les pistes deviendront rapidement impraticables.

Plusieurs solutions peuvent être mises en œuvre, elles seront adaptées à l'importance du problème:

- rabattre la nappe par tranchée drainante,



- par pompage,
- pose de drains horizontaux,
- masque drainant: réalisé avec des matériaux écrêtés au  $D_{min}$ , il assure à la fois le rôle de drain et de stabilisateur au remblai.
- réalisation de fossés,
- maintien de pentes transversales et entretien des pistes.



### 3.3.5 Les talus

Un talus est un terrain en forte pente qui limite :

- une chaussée de route,
- une plaine,
- un glacier,
- un plateau,
- une banquette,
- une terrasse,
- un fossé,
- une tranchée.



Les talus de remblais sont réalisés par apport excédentaire de matériaux.

Ils ne sont supprimés par terrassement par une pelle hydraulique que lorsque les couches de remblai ont été parfaitement compactées.

Leur stabilité dépend de l'angle de frottement des matériaux qui les composent.

Il est de plus nécessaire qu'ils présentent un aspect suffisamment grenus pour pouvoir supporter la terre végétale mise en œuvre après leur réglage.



### 3.4 La réalisation des remblais

#### 3.4.1 La préparation de la zone de remblai

Nous l'avons évoqué en partie dans les paragraphes précédents. La zone de remblai devra être au préalable débarrassée de tous les éléments qui ne sont pas minéraux:

- végétations (arbres, arbustes, cultures ...),
- terre végétale (elle sera mise en cordon ou en stock),
- constructions ou zones de chaussée si les épaisseurs de remblai sont faibles.

Elle sera éventuellement nivelée, des nappes géotextiles peuvent être implantées si la portance du sol est insuffisante.

Ces matériaux ont pour effet de transformer en efforts transversaux les efforts nominaux liés au poids du remblai.

Dans les zones compressibles (tourbes par exemple), si l'épaisseur des matériaux compressibles est trop importante pour qu'ils soient purgés, des drains verticaux peuvent être mis en œuvre.

Un réseau de drains horizontaux sera alors implanté sur la surface supérieure.

D'autres techniques peuvent être mises en œuvre comme les colonnes ballastées.

La technique s'apparente à celle des pieux: des colonnes par introduction d'une aiguille vibrante.

Dans les sols fins, la vibration conduira à une liquéfaction et à une consolidation dans la zone d'action de l'aiguille.

Dans les sols granulaires, le passage de l'aiguille laissera place à un cylindre qui sera comblé par des matériaux graveleux (à fort coefficient de frottement).



### **3.4.2 Les traitements du sol**

L'impossibilité en l'état de réaliser des remblais avec des matériaux de déblai conduit à l'utilisation de matériaux d'apport.

Cette démarche est coûteuse, d'une part au regard du prix de fourniture et du coût du transport.

Les matériaux apparemment inaptes à leur réutilisation peuvent voir leurs caractéristiques modifiées permettant ainsi de les employer en remblai.

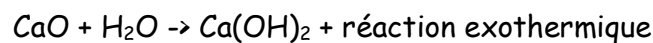
Qu'il s'agisse de l'état hydrique ou de leur argilosité.

Des liants offrent des possibilités d'amélioration des matériaux naturels.

#### **3.4.2.1 Les liants utilisables**

Deux types de liant peuvent être utilisés séparément ou simultanément pour modifier le comportement des sols il s'agit:

- de la chaux: la chaux modifie l'état hydrique du sol.



La chaux modifie les caractéristiques de la fraction argileuse. En modifiant les champs électriques autour de la particule d'argile par échange de cations, cette réaction chimique provoque la floculation du sol. A long terme, la chaux fait augmenter le Ph du mélange et conduit à la dissolution des silicates d'alumine contenus dans l'argile. La cristallisation est lente.

- des liants hydrauliques et pouzzolaniques: ils modifient faiblement l'état hydrique du sol. Par contre à moyen et long terme, ils conduisent à la formation de silicates et d'aluminates de calcium hydratés. Cette réaction favorise l'agglomération des particules de sol par des liaisons cristallines. Le durcissement du mélange dépend de la nature et du dosage du liant, de l'état hydrique et de la compacité du mélange, du degré d'intimité du mélange, de la nature plus ou moins argileuse du sol, de la présence de certains composés chimiques (certains oxydes bloquent la réaction chimique à moyen terme et peuvent provoquer des réactions de gonflement).

#### **3.4.2.2 étude de formulation**

L'étude de formulation doit permettre d'une part de vérifier la compatibilité du sol avec le produit de traitement envisagé, d'établir l'abaque teneur en eau / teneur en liant et d'identifier le produit de traitement.

Avant d'estimer la quantité de liant à utiliser, il est fondamental de vérifier la compatibilité chimique du liant avec le sol. La présence d'oxyde, même en très faible quantité dans le sol peut conduire à des réactions de gonflement à moyen terme (jusqu'à 90 jours). C'est la raison pour laquelle des études de compatibilité sont réalisées.

| <b>Paramètre considéré</b>                    |                      | <b>Type de traitement</b>                          |                                      |
|---|----------------------|--|--------------------------------------|
|   |                      | Traitement à la chaux seule                        | Traitement avec un liant hydraulique |
| Gonflement volumique                          | $\leq 5$             | Apte   | Apte                                 |
|   | $5 < Gv \leq 10$     | Douteux  | Douteux                              |
|   | $> 10$               | Inapte   | Inapte                               |
| Résistance en compression diamétrale Rtb(MPa) | $\geq 0,2$           | Paramètre non considéré pour ce type de traitement | Apte                                 |
|   | $0,1 \leq Rtb < 0,2$ |  | Douteux                              |
|   | $< 0,1$              |  | Inapte                               |

D'une manière empirique, les dosages de chaux varient de 2 à 6 %, les dosages en traitement mixte correspondent souvent à 4 à 5 % de chaux avec 1 à 2% de ciment.

Les liants hydrauliques ne sont pas utilisables à des températures inférieures à 0° (comme les bétons). Des liants routiers ont été mis au point (Lygex, Arc-Gs ...). Ils présentent de capacités, non validées par les fournisseurs à reprendre leur prise après de courtes périodes de froid.

### 3.4.2.3 Mise en œuvre des traitements au liant

Les liants sont mis en œuvre sur des surfaces de matériaux déjà réglées et en légère sur-épaisseur. Le liant est mis en œuvre avec un épandeur. La pris en compte des conséquences dommageables des liants auprès des cultures, des zones humides, de la végétation et des hommes a conduit à disposer sur ces engins, de jupes qui permettent de limiter l'envol des produits autour de la zone traitée.



Après le passage de l'épandeur, un pulvimixer assure le mélange du liant avec le matériau à traiter sur une profondeur variable, en général de 20 à 30 cm. Certains modèles de pulvimixer peuvent atteindre 40 cm de profondeur.



Il y a lieu de tarer dès le début du chantier la densité de liant au  $m^2$ . A cet effet une bâche d'un mètre carré est étendue au sol, il suffit de peser la quantité de liant qu'elle contient après le passage de l'épandeur.

La réussite du traitement est liée à la teneur en eau du mélange. Elle doit bien évidemment être conforme à l'étude. Ainsi, le jour du traitement cette teneur en eau est mesurée sur place et corrigée si nécessaire par une arroseuse. De nouveaux types de matériel permettent d'apporter de l'eau à l'intérieur même du matériau, sur toute la profondeur à traiter. Des rampes d'arrosage sont fixées sur des socles qui pénètrent dans le sol.

La zone traitée est alors réglée à la niveleuse et compactée au nouvel optimum calculé avec le GTR. L'efficacité du traitement est mesurée à l'échéance de la prise, par une mesure de déflexions et de portance.

### **3.5 Les contrôles**

Les contrôles réalisés sur un chantier de terrassement sont de plusieurs natures:

- géométriques, c'est la vérification que l'ouvrage exécuté est conforme aux prescriptions du maître d'ouvrage. Ce point est important, car tant les côtes altimétriques que de tracé ont été déterminées, comme nous l'avons vu dans le chapitre des études, pour prendre en compte des contraintes fortes.
- mécaniques: il y a lieu de vérifier que la plate-forme livrée, ainsi que la couche de forme présentent des performances mécaniques conformes au cahier des charges et surtout aux hypothèses qui ont été prises pour le calcul de la chaussée à supporter. Les contrôles sont réalisés par le maître d'œuvre. Il s'agit essentiellement de mesures de déflexion, et de portance.

On parle souvent de rapport  $EV2/EV1 < 2$  et de déflexion.