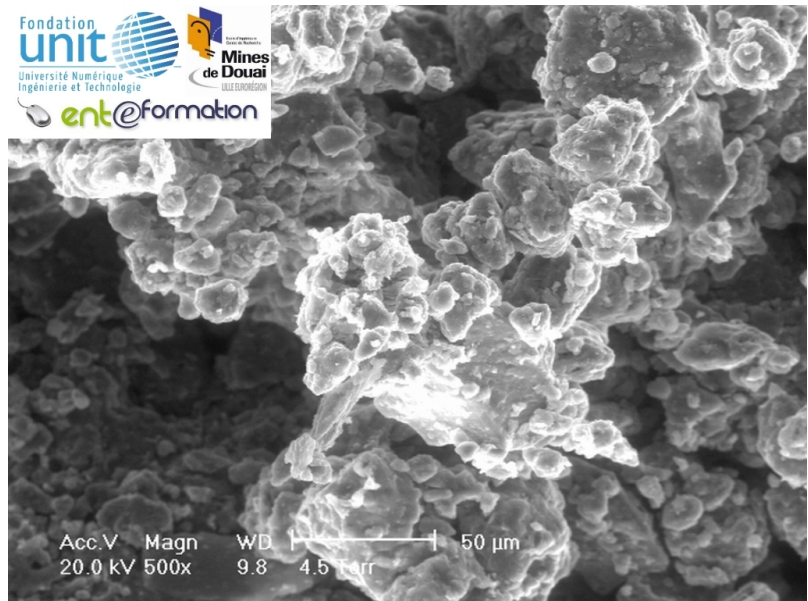


3- La classification des sols

V4



FRED PORTET ET OLIVIER NOËL, ENSEIGNANTS À L'ENTE
D'AIX-EN-PROVENCE

SYLVIE NICAISE, LABORATOIRE DU CETE MÉDITERRANÉE

CAROLE PORTILLO ET MATHIEU VERMEULEN, ÉCOLE DES
MINES DE DOUAI

Table des matières

Objectifs	5
I - Généralités sur les sols	7
A. Terminologie des matériaux.....	7
B. Caractéristiques d'un sol.....	8
C. Différence entre sols fins et sols grenus.....	9
D. Paramètres dimensionnels et adimensionnels.....	10
II - Classification des matériaux	13
A. Classification des sols selon la nomenclature GTR (norme NF P 11 300).....	13
B. Essais de laboratoire.....	14
III - Les essais de laboratoire : paramètres de nature	15
A. Analyse granulométrique NF P 94 056.....	15
B. Limites Atterberg - Indice de plasticité NF P 94 057.....	18
C. Valeur au bleu du sol NF P 94 068.....	20
D. Equivalent de sable.....	21
IV - Les essais de laboratoire : paramètres de comportement mécanique	23
A. Los Angeles NF EN 1097-2.....	23
B. Micro Deval en présence d'Eau (MDE).....	24
C. Friabilité des sables.....	26
V - Les essais de laboratoire : paramètres d'état hydrique	27

A. Teneur en eau NF P 94 050.....	27
B. Détermination optimum Proctor NF P 94 093.....	28
C. Indice Portant Immédiat (IPI) NF P 94 078.....	29
VI - Classification des roches	31
A. Coefficient de Fragmentabilité NF P 94 066.....	31
B. Coefficient de Dégradabilité NF P 94 067.....	32
C. Exemple.....	33
VII - Tableaux de synthèse	35
A. Tableaux de synthèse.....	35

Objectifs

Ce module va vous permettre :

- d'exprimer le besoin d'une classification pour hiérarchiser le comportement des sols
- d'identifier les paramètres régissant les comportements des sols comme clés de classification
- d'énumérer les essais d'identification courants

Remerciements :

V. Ferber, Y. Deniaud, R. Bocciardi, E Manier, D. Criado pour les crédits photos

Autoroute du Sud de la France (ASF), Réseau Ferré de France (RFF), Direction Départementale de l'Équipement de Guyane (DDE 973) pour les crédits vidéos

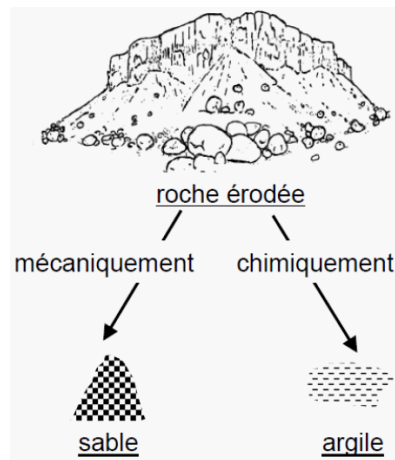
Généralités sur les sols

Terminologie des matériaux	7
Caractéristiques d'un sol	8
Différence entre sols fins et sols grenus	9
Paramètres dimensionnels et adimensionnels	10

A. Terminologie des matériaux



Définition : Un sol, c'est !



Sol : produit de l'érosion des roches

- produit de la décomposition des roches sous l'action d'agents atmosphériques (air, eau)
- mélange en proportions variables de particules de toutes dimensions
- matériaux de comportement complexe

Terminologie utilisée en géotechnique routière

Sols :

- constitués de grains plus ou moins gros facilement dissociables
- comprennent moins de 3 % de matière organique

Matériaux rocheux :

- matériaux naturels compacts
- dégagement avec moyens puissants (explosifs, engins puissants)

Sols organiques :

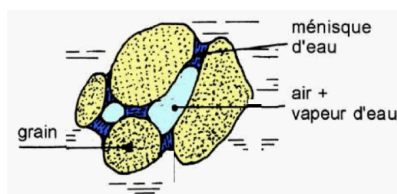
- comprennent plus de 3 % de matière organique

Sous produits industriels :

- produits de l'activité humaine (cendres volantes, matériaux de démolition et haut-fourneaux, ...)

Pour cela , différents moyens d'analyse sont employés ...

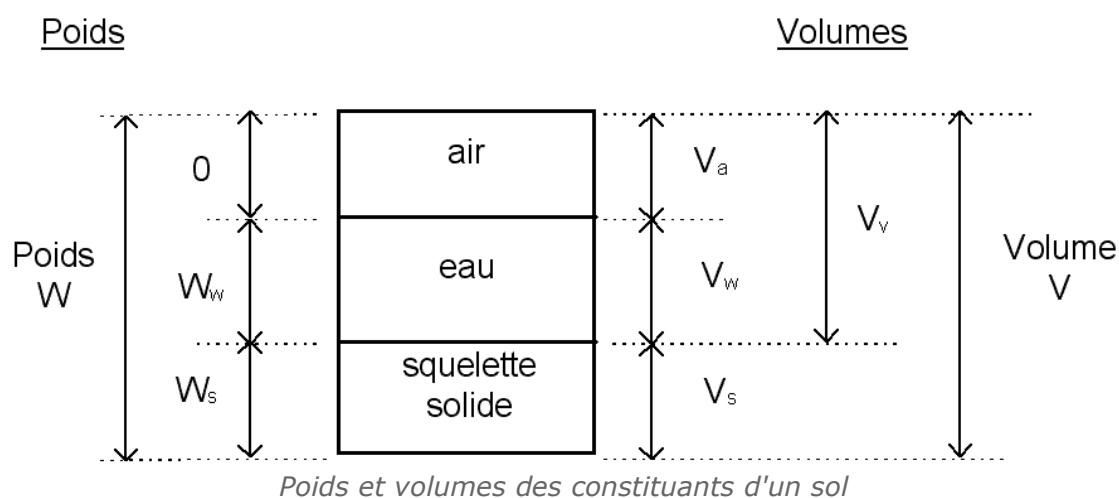
B. Caractéristiques d'un sol



Constituants d'un sol

Un sol est un mélange de 3 éléments :

- solide (squelette)
- eau (libre ou non)
- gaz (air)



Poids et volumes des constituants d'un sol

Phase gazeuse :

- air + gaz de décomposition ou vapeur d'eau

Un sol est saturé lorsque les vides sont remplis.

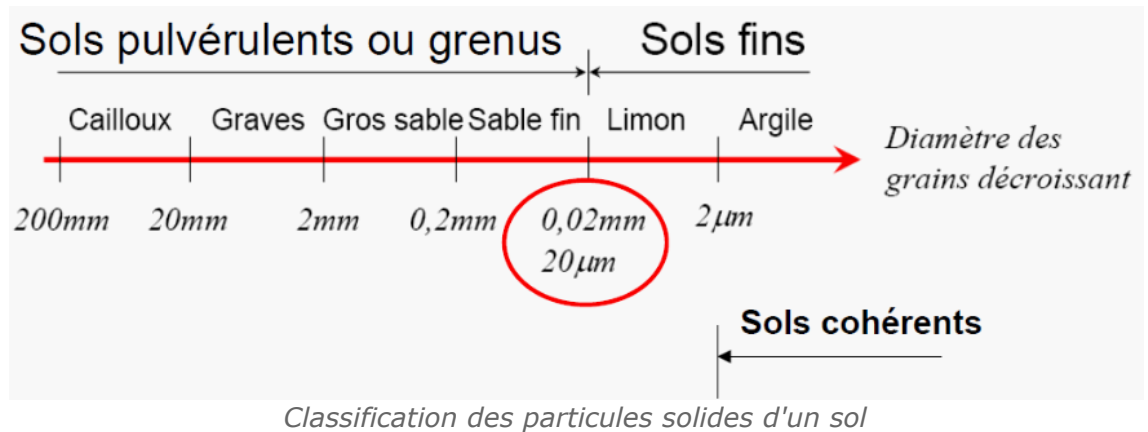
Phase liquide :

- eau absorbée : constitue un film entre les grains jouant ainsi un rôle de lubrifiant.

Ne s'écoule pas, s'élimine par chauffage très intense ($>300^\circ$).

- eau libre : s'écoule, s'élimine par étuvage vers 100° .

Classification des particules solides d'un sol



C. Différence entre sols fins et sols grenus

Sols grenus (pulvérulents) - Sols fins

Les forces d'attractions intergranulaires (force électrique, force de Van Der Waals, etc.) influencent le comportement des sols pour les grains de dimension très petite. Dans ce cas, le sol présente de la cohésion.

On distingue deux catégories de sols :

- **les sols fins (ou sols cohérents) $d < 20 \mu\text{m}$ avec cohésion (argile, limon) :**
comportement très différent en fonction des teneurs en eau (état solide, plastique ou liquide)
- **les sols grenus $d > 20 \mu\text{m}$ sans cohésion (sable, gravier, etc.) :**
comportement régi par les propriétés du squelette solide (peu influencé par l'eau)

Dans la réalité, les sols sont constitués d'un mélange de particules de différentes dimensions, soit un état intermédiaire entre les sols grenus et les sols fins.

Propriétés des sols grenus (pulvérulents)



Exemple d'un sable grossier

- forces de frottement entre les grains sont :
 - dépendants de la forme, l'angularité et la compacité des grains
 - indépendants de la teneur en eau
- résistance au cisaillement
- aucune résistance à la traction
- perméables

Propriétés des sols fins



Exemple d'une argile

- imperméables et gélifs
- **sensibles à l'eau (gonflements ou retraits)**

- cohésion assurée par frottements et forces d'attraction entre les grains
 - dépendants de la forme, l'angularité, la compacité et de l'effet de surface des grains
 - dépendants de la **teneur en eau**
- résistance au cisaillement et à la traction

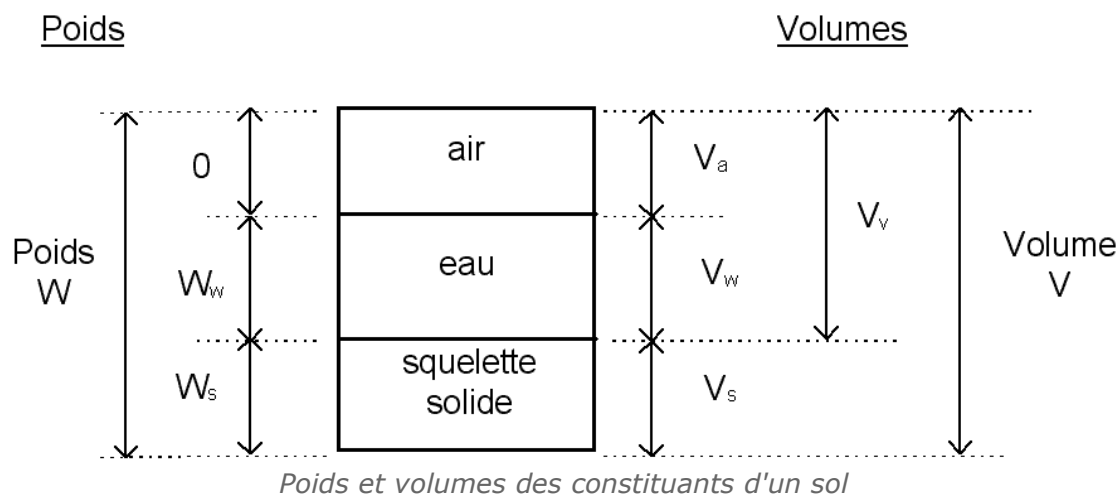
Pour conclure ...

Un sol est un assemblage hétérogène de particules ou de cristaux aux propriétés très variables : dimensions, formes, propriétés physico-chimiques, etc...

Un sol contenant de l'argile sera influencé par la teneur en eau, c'est une question centrale en géotechnique.

D. Paramètres dimensionnels et adimensionnels

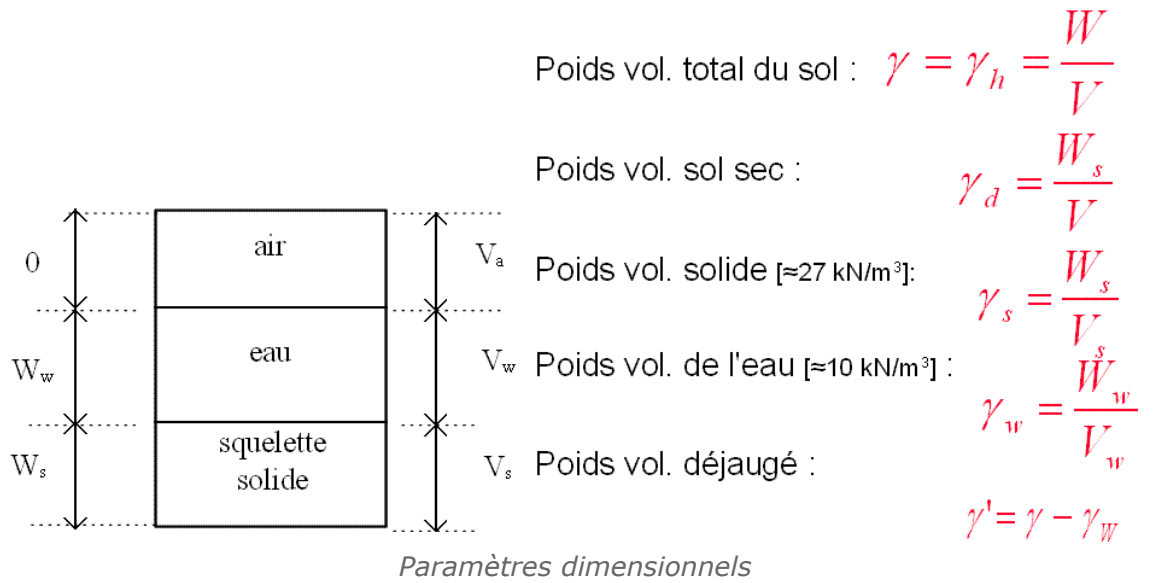
Poids et volume



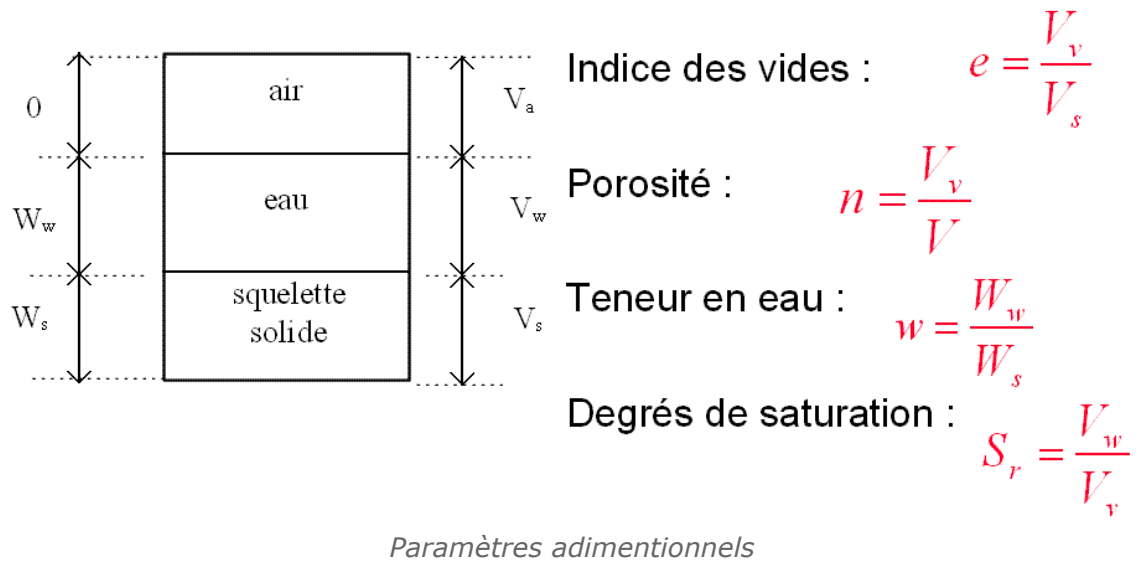
$$W = W_w + W_s$$

$$V = V_v + V_s = V_a + V_w + V_s$$

Paramètres dimensionnels



Paramètres adimensionnels



Relations entre les paramètres

Valeurs des différents paramètres en fonction :

- de l'indice des vides "e"
- et d'autres paramètres

$$\begin{array}{lll}
 n & n = \frac{e}{1+e} & \gamma' \quad \gamma' = \frac{\gamma_s - \gamma_w}{1+e} & e & e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \\
 \gamma_d & \gamma_d = \frac{\gamma_s}{1+e} & \gamma_{sat} \quad \gamma_{sat} = \frac{\gamma_s + e\gamma_w}{1+e} & \gamma & \gamma = \gamma_h = (1+w)\gamma_d \\
 \gamma_h & \gamma_h = \frac{(1+w)\gamma_s}{1+e} & w_{sat} \quad w_{sat} = \frac{e\gamma_w}{\gamma_s} & \gamma_{sat} & \gamma_{sat} = \gamma_d + \left(1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}\right)\gamma_w
 \end{array}$$

Relations entre paramètres

Classification des matériaux

Classification des sols selon la nomenclature GTR (norme NF P 11 300)	13
Essais de laboratoire	14



Guides Techniques SETRA

couches de forme (GTR) permet de :

- déterminer les caractéristiques des matériaux
- définir leurs conditions de mise en œuvre en tenant compte de la météorologie au moment des travaux

La réalisation des remblais et des couches de forme nécessite d'étudier, pour des raisons économiques, la **possibilité de réutiliser les matériaux de déblais extraits du sol** avant de rechercher des matériaux d'emprunts.

L'utilisation du guide technique pour la réalisation des remblais et des

A. Classification des sols selon la nomenclature GTR (norme NF P 11 300)

On distingue 3 familles :

1. les **SOLS** de classe : **A, B, C et D**
2. les **MATÉRIAUX ROCHEUX** de classe : **R**
3. les **SOLS ORGANIQUES** et **SOUS PRODUITS INDUSTRIELS** de classe : **F**

Les 4 classes de sols (famille 1) :

Classe A : sols fins

Classe B : sols sableux et graveleux avec fines

Classe C : sols comportant des fines et des gros éléments

Classe D : sols insensibles à l'eau

Identification des sols (famille 1)

Les paramètres retenus pour l'identification des sols sont :

- les paramètres de nature, dont les caractéristiques sont :
 - granularité
 - argilosité
- les paramètres de comportement mécanique, dont les caractéristiques sont :
 - résistance à la fragmentation
 - résistance à l'usure
 - friabilité
- les paramètres d'état hydrique :
 - état hydrique

Chaque caractéristique sera déterminée à l'aide des essais de laboratoire...

B. Essais de laboratoire

Principaux essais de laboratoire

Paramètres de nature :

- Granularité qui permet de déterminer la distribution des tailles de particules :
 - a. Analyse granulométrique
- Argilosité qui permet d'identifier la fraction argileuse :
 - a. Limites d'Atterberg
 - b. Essai au bleu
 - c. Equivalent de sable

Paramètres de comportement mécanique :

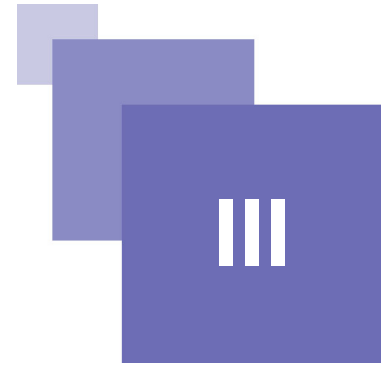
Sols	Roches
<ul style="list-style-type: none"> • Résistance à la fragmentation <ol style="list-style-type: none"> a. Los Angeles (LA) • Résistance à l'usure <ol style="list-style-type: none"> a. Micro Deval en présence d'Eau (MDE) • Friabilité : <ol style="list-style-type: none"> a. Friabilité des Sables (FS) 	<ul style="list-style-type: none"> • Résistance à la fragmentation <ol style="list-style-type: none"> a. Fragmentabilité • Résistance à l'usure : <ol style="list-style-type: none"> a. Dégradabilité • Autres essais utilisés <ol style="list-style-type: none"> a. Los Angeles (LA) b. Micro Deval en présence d'Eau (MDE) c. Friabilité des Sables (FS)

Tableau 1 Comportement mécanique

Paramètres d'état hydrique :

- Etat hydrique :
 - a. Teneur en eau
 - b. Essai Proctor
 - c. Poinçonnement IPI

Les essais de laboratoire : paramètres de nature



Analyse granulométrique NF P 94 056	15
Limites Atterberg - Indice de plasticité NF P 94 057	18
Valeur au bleu du sol NF P 94 068	20
Equivalent de sable	21

Essais d'identification pour déterminer les paramètres de nature (granularité et argilosité) :

- Analyse granulométrique
- Limites d'Atterberg
- Essai au bleu
- Equivalent de sable

A. Analyse granulométrique NF P 94 056

But de l'essai

Déterminer la répartition des grains de sol suivant leur dimension dans un échantillon.

Représentation de la répartition de la masse des particules à l'état sec en fonction de leur dimension.

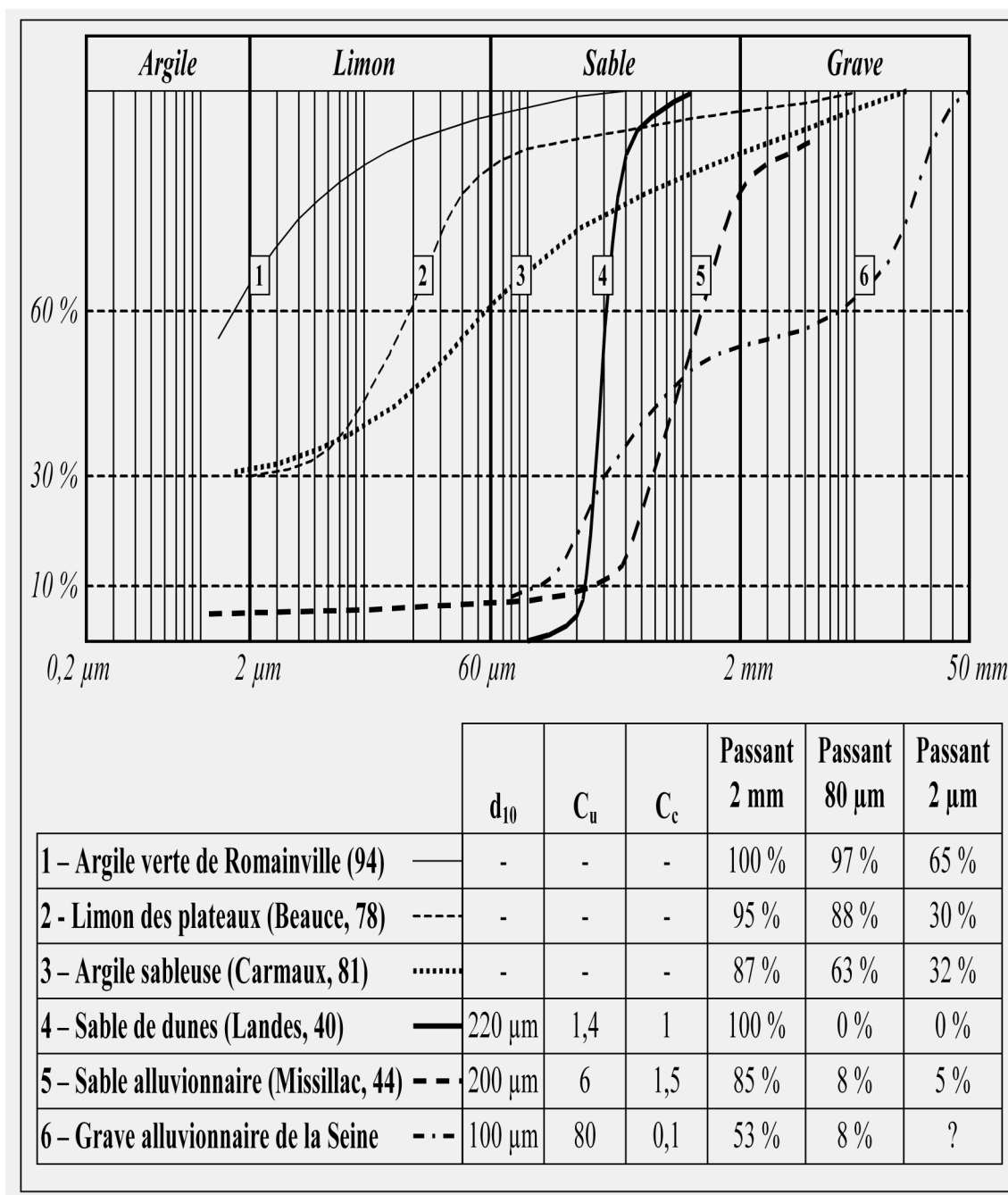
Termes à retenir :

- **d** : dimension nominale d'ouverture d'un tamis
- **tamisat** : partie du matériau passant à travers les mailles d'un tamis
- **classe granulométrique** : ensemble des éléments dont les dimensions sont comprises entre deux ouvertures de tamis définissant un intervalle (ex: 0 /50mm)
- **courbe granulométrique** : représentation graphique du pourcentage massique



Analyse granulométrique (source : CETE)

Animation ci-dessous : cliquez sur le bouton "Animation" pour lancer l'animation



Courbe granulométrique - Granularité (source : V. Ferber)

Pour en savoir plus, consultez la fiche technique du SETRA :

Paramètres pour terrassements (données d'entrée pour la classification) :

- **Dmax**
- **le pourcentage de passants < 2 mm**
- **le pourcentage de passants < 80 μm (pourcentage de fines)**

B. Limites Atterberg - Indice de plasticité NF P 94 057

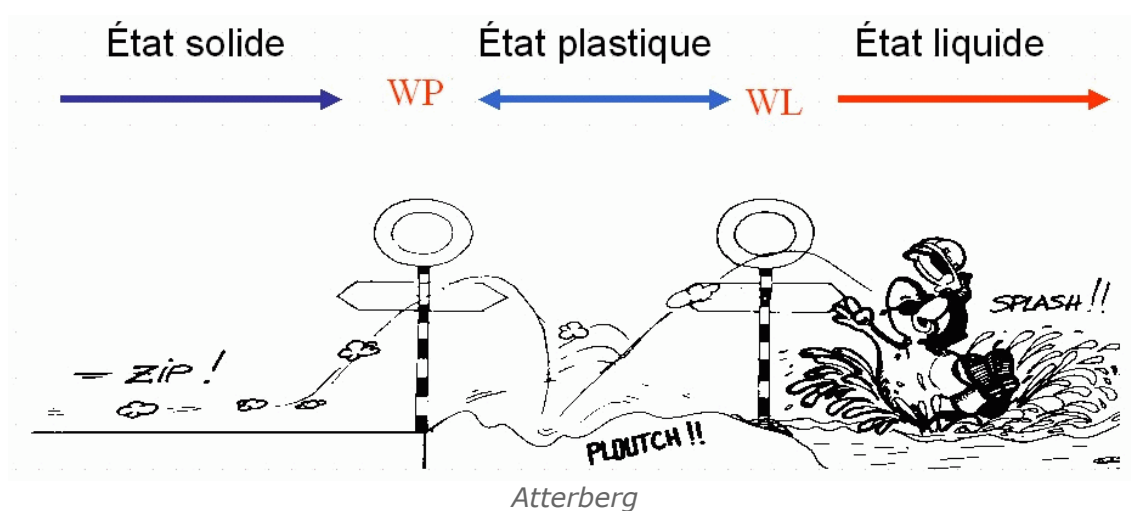
Selon sa teneur en eau, un sol sensible à l'eau peut se présenter sous trois états :

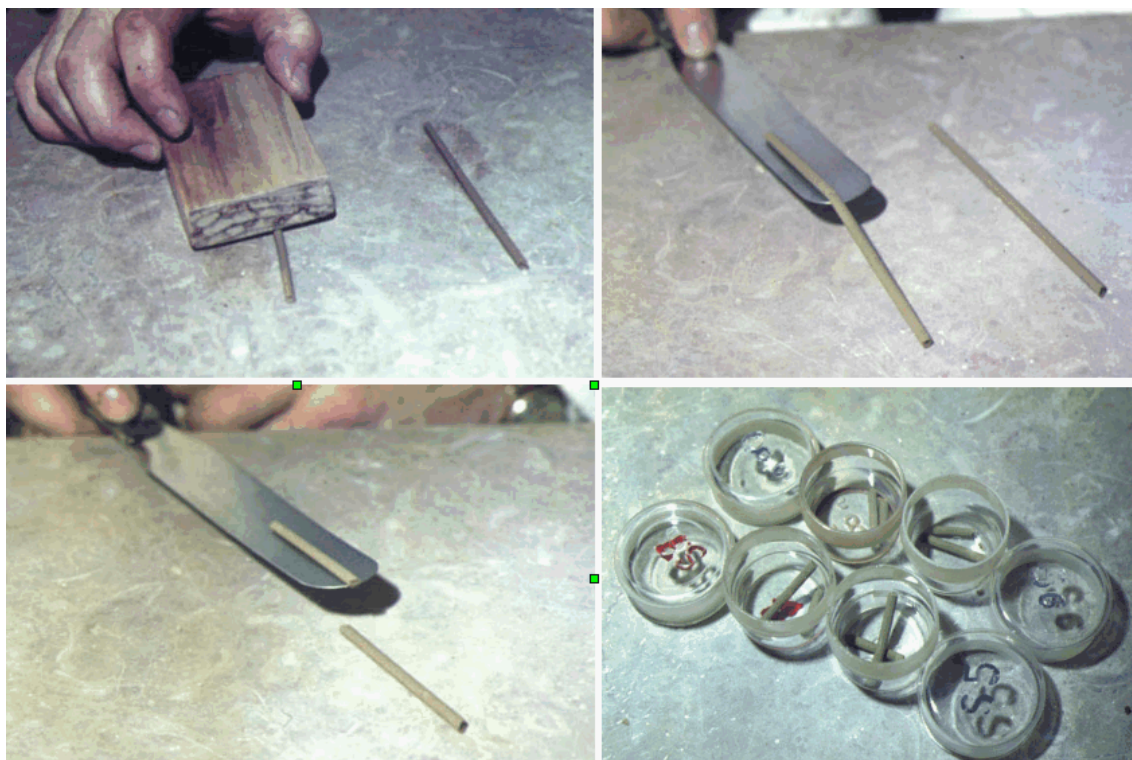
1. état solide
2. état plastique
3. état liquide

But de l'essai :

Déterminer les teneurs en eau remarquables situées à la frontière entre ces différents états sont les « **Limites d'Atterberg** » :

- limite de Liquidité : WL (frontière entre état plastique et liquide)
- limite de Plasticité : WP (frontière entre état solide et plastique)





Atterberg : limite de plasticité (source : CETE)



Atterberg : Limite de liquidité (source : CETE)

A partir des limites d'Atterberg, on peut calculer les indices suivants qui expriment la **sensibilité à l'eau du sol (Ip)** et sa **consistance (Ic)** par rapport à sa **teneur en eau (Wn)** :

indice de plasticité : $I_p = W_L - W_P$

indice de consistance :

$$I_c = \frac{W_L - W_n}{I_p}$$

image_3_FormuleIC

Pour en savoir plus, consultez la fiche technique du SETRA :

C. Valeur au bleu du sol NF P 94 068

But de l'essai :

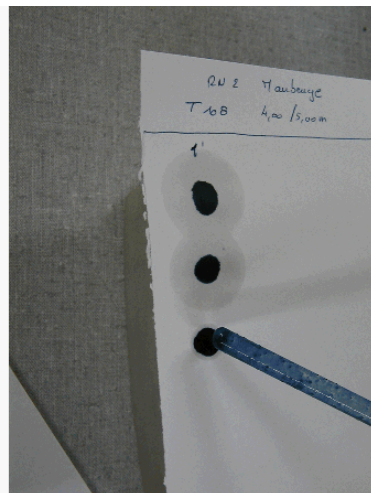
Evaluer la richesse en argile d'un sol en mesurant sa capacité d'adsorption de molécules de bleu de méthylène.



Ajouts successifs de bleu

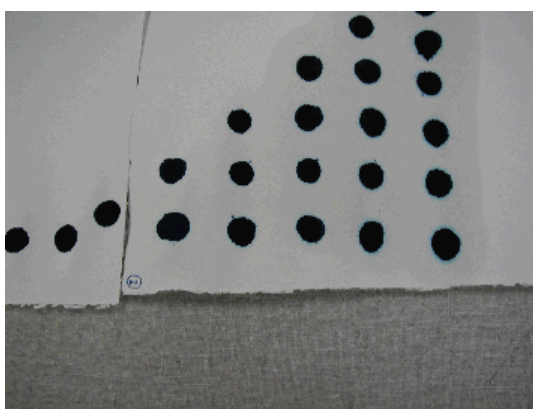


Prélèvement d'une goutte de suspension

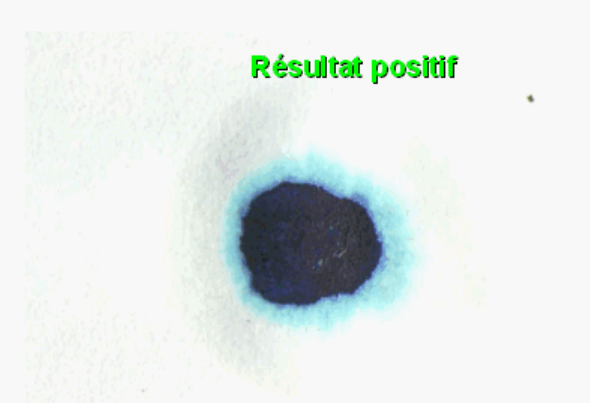
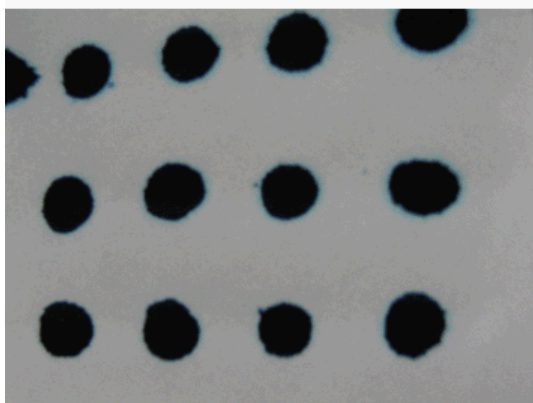
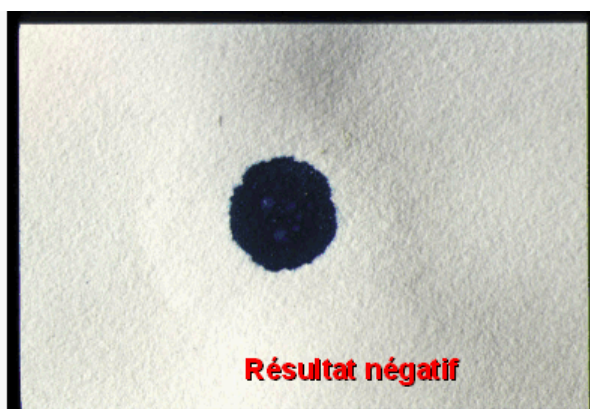


Dépôt sur papier filtre

Valeur au bleu (source : CETE)



Tests successifs



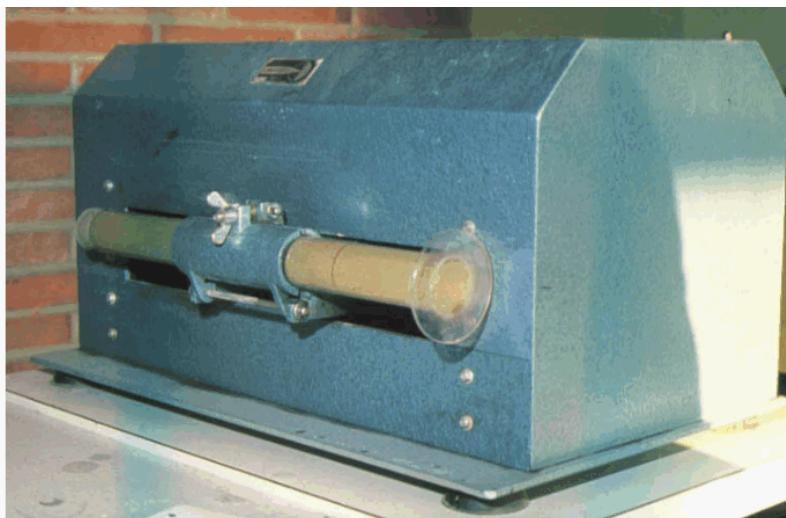
Résultats de valeur au bleu (source : CETE)

Pour en savoir plus, consultez la fiche technique du SETRA :

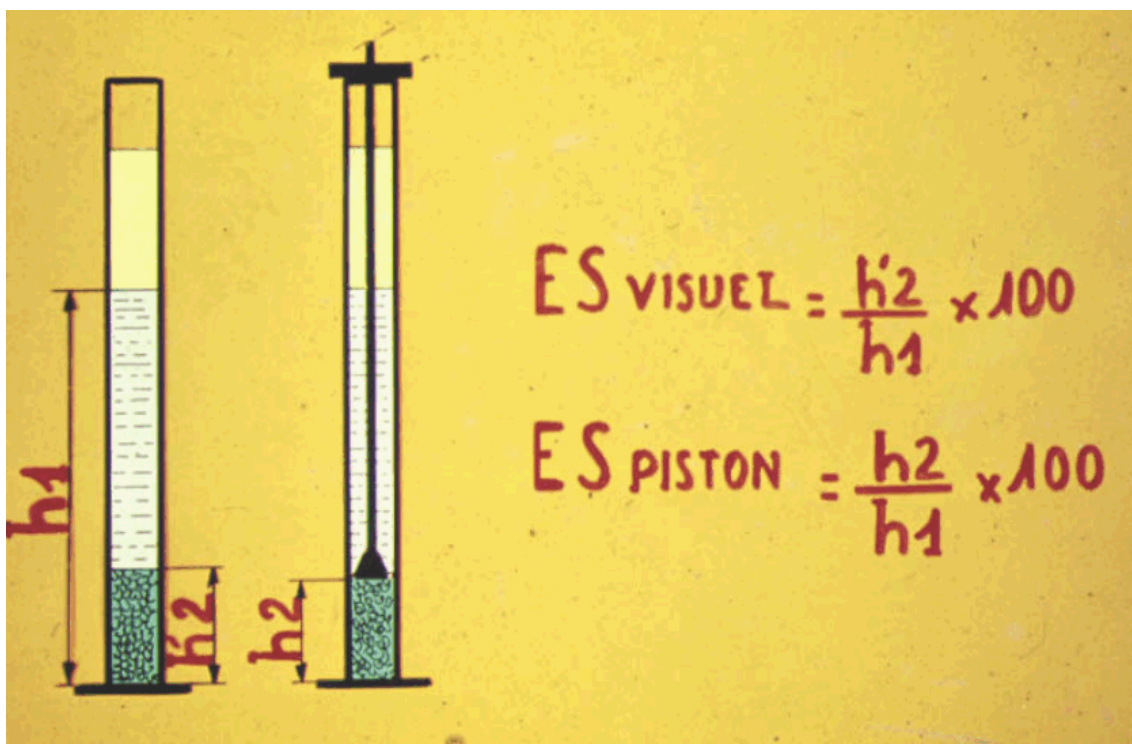
D. Equivalent de sable

But de l'essai :

Déterminer, dans un sol, la proportion de sol fin et de sol grenu.



Equivalent sable (source : CETE)



Résultat équivalent sable

Les essais de laboratoire : paramètres de comportement mécanique

IV

Los Angeles NF EN 1097-2	23
Micro Deval en présence d'Eau (MDE)	24
Friabilité des sables	26

Essais d'identification pour déterminer les paramètres de comportement mécanique (résistance à la fragmentation, résistance à l'usure et friabilité) :

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

A. Los Angeles NF EN 1097-2

But de l'essai

Evaluer la résistance à la fragmentation de la matrice d'une roche.

Expression des résultats :

LA = % éléments < 1,6 mm produits après essai



Los Angelès (source : CETE)

Pour en savoir plus, consultez la fiche technique du SETRA :

B. Micro Deval en présence d'Eau (MDE)

But de l'essai :

Evaluer la résistance à l'usure par frottement des granulats et leur sensibilité à l'eau.



Micro Deval (source : CETE)



Micro Deval (source : CETE)

Échantillon après séchage et écrêtage à 1,6 mm



Micro Deval : Échantillon après séchage et écrêtage à 1,6 mm (source : CETE)

Expression des résultats :

MDE = % éléments < 1,6 mm produits après essai

Pour en savoir plus, consultez la fiche technique du SETRA :

C. Friabilité des sables

But de l'essai :

Déterminer la résistance à la fragmentation d'un sable.

Protocole similaire à celui de l'essai Micro Deval.

Fraction étudiée : 0,2 - 2 mm ou 0,2 - 4 mm

On détermine la quantité de particules $< 0,1$ mm produite par la sollicitation.

Objectif : évaluer l'évolution des matériaux sableux sous le trafic de chantier.

Pour en savoir plus, consultez la fiche technique du SETRA :

Les essais de laboratoire : paramètres d'état hydrique

V

Teneur en eau NF P 94 050	27
Détermination optimum Proctor NF P 94 093	28
Indice Portant Immédiat (IPI) NF P 94 078	29

Essais pour déterminer les paramètres d'état hydrique :

- Teneur en eau
- Essai Proctor Normal
- Poinçonnement IPI

Cinq états considérés :

1. état très sec (ts)
2. état sec (s)
3. état moyen (m)
4. état humide (h)
5. état très humide (th)

A. Teneur en eau NF P 94 050

Les paramètres retenus sont :



La pesée (source : CETE)

La pesée



La séchage (105°C)

Le séchage (source : CETE)

$$W \% = \frac{m_w \text{ masse d'eau évaporée}}{m_d \text{ masse matériaux sec}} \times 100$$

Pour en savoir plus, consultez la fiche technique du SETRA :

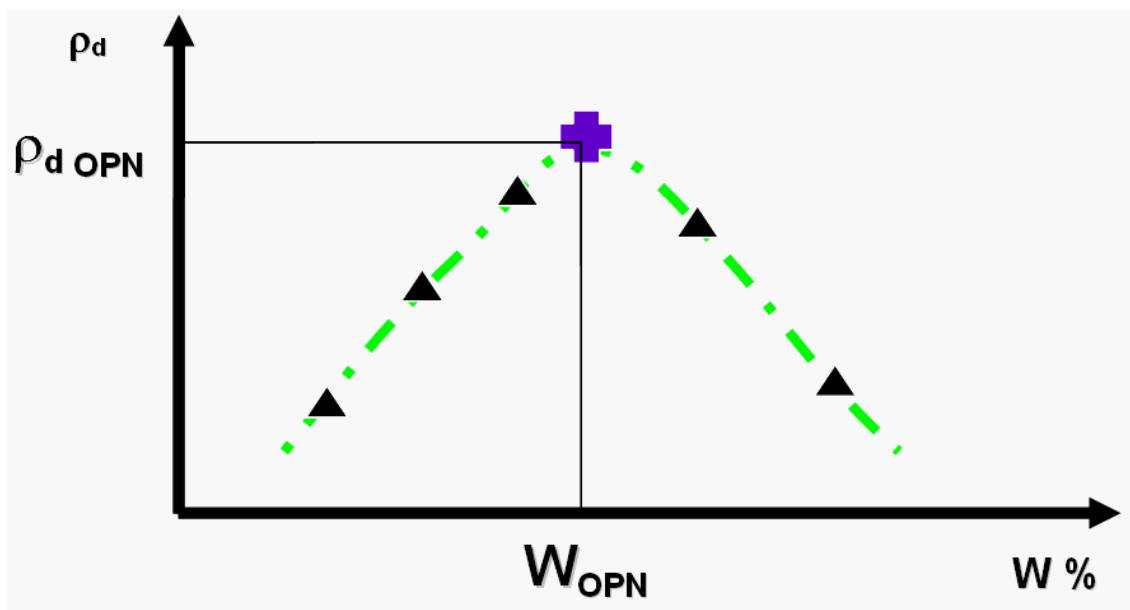
B. Détermination optimum Proctor NF P 94 093

But de l'essai

Appréhender l'aptitude d'un sol à se compacter et définir les objectifs de compactage à atteindre.

Pour les sols sensibles à l'eau, il permet également de définir les états hydriques du sol.

Animation ci-dessous : cliquez sur le bouton "Compacter en 3 couches" pour lancer l'animation



Résultat Proctor (source : CETE)



Pour en savoir plus, consultez la fiche technique du SETRA :

C. Indice Portant Immédiat (IPI) NF P 94 078

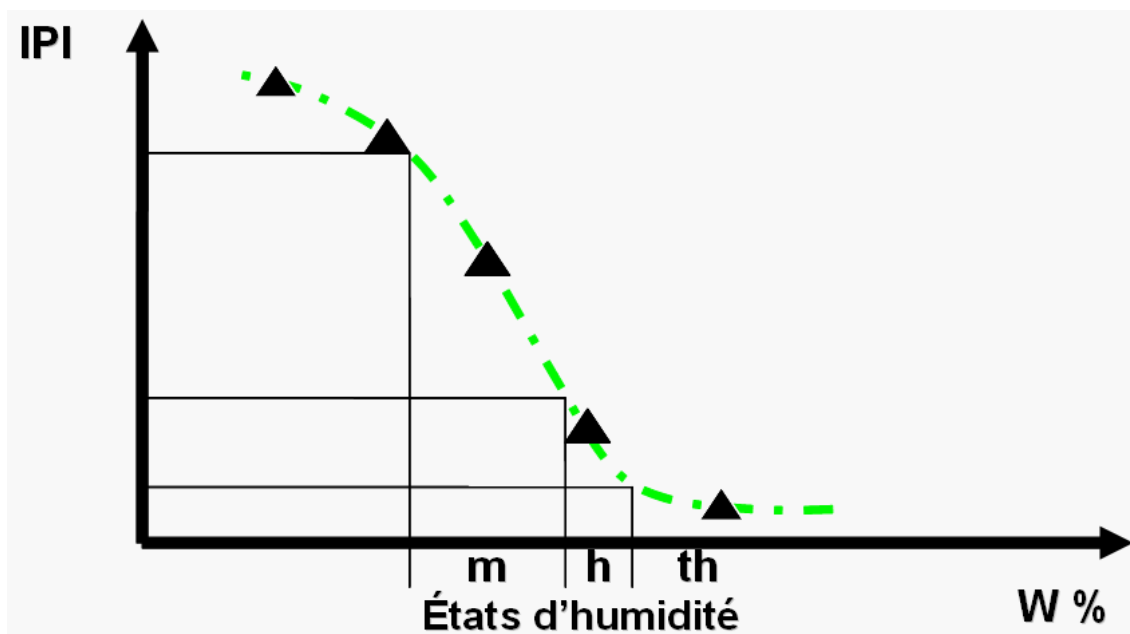
But de l'essai :

Evaluer l'aptitude du matériau à supporter la circulation des engins.

Pour les sols sensibles à l'eau, il permet également de définir les états hydriques du sol (h et th).

L'essai est réalisé à l'aide d'une presse équipée d'un poinçon cylindrique de 49,6 mm de diamètre.

Les essais sont réalisés sur les éprouvettes PROCTOR préalablement confectionnées.



Indice Portant Immédiat (source : CETE)

Pour en savoir plus, consultez la fiche technique du SETRA :

Classification des roches

VI

Coefficient de Fragmentabilité NF P 94 066	31
Coefficient de Dégradabilité NF P 94 067	32
Exemple	33

Essais d'identification pour déterminer les paramètres de comportement mécanique (fragmentabilité et dégradabilité) :

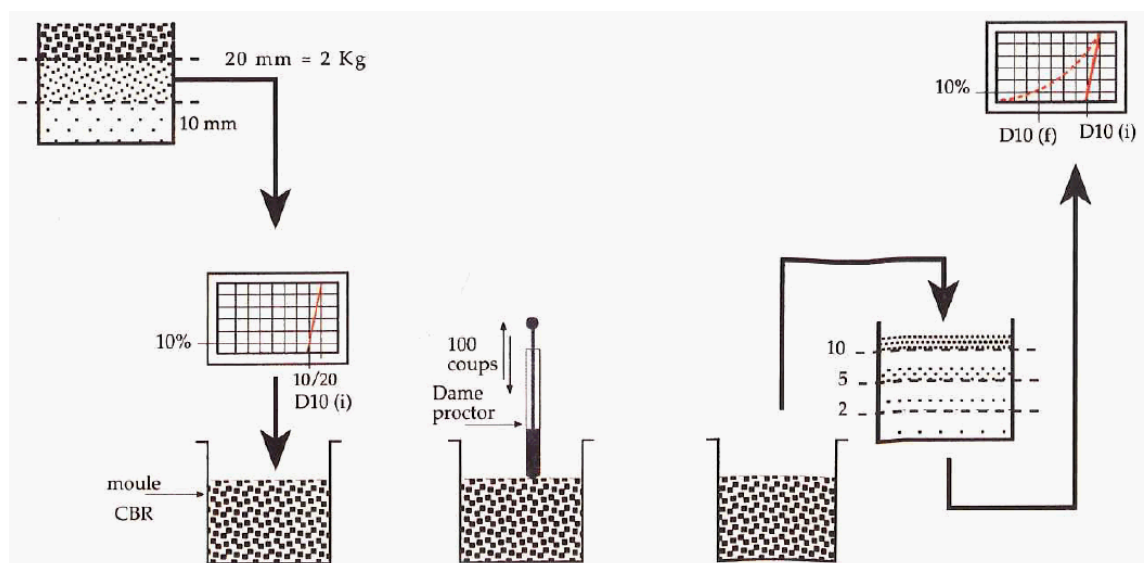
- coefficient de Fragmentabilité
- coefficient de Dégradabilité

A. Coefficient de Fragmentabilité NF P 94 066

Signification :

capacité des matériaux rocheux peu résistants à :

- être affectés par le trafic de chantier
- être transformés en matériau compatible avec un réemploi en remblai



Fragmentabilité (source : SETRA)

$$FR = \frac{D_{10}(i) \text{ du matériaux avant pilonnage}}{D_{10}(f) \text{ du matériaux après pilonnage}}$$

Seuil retenu $FR = 7$

$FR < 7$: roche peu fragmentable

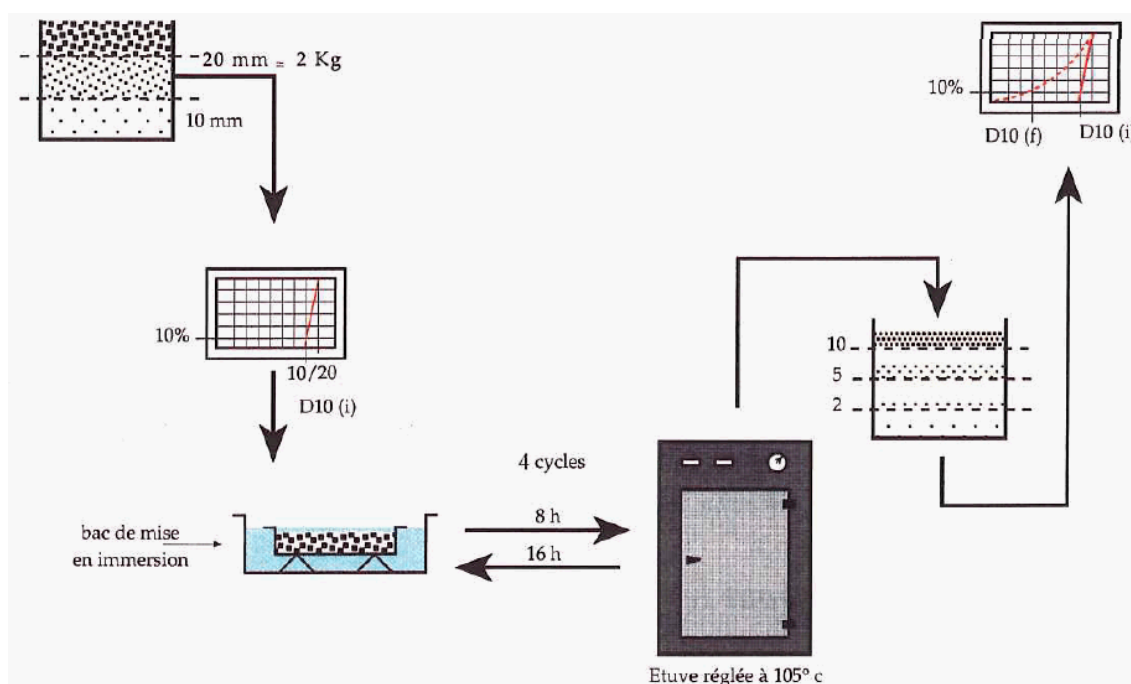
$FR > 7$: roche fragmentable

B. Coefficient de Dégradabilité NF P 94 067

Principaux essais de laboratoire

Signification :

qualifie la sensibilité du matériau rocheux aux sollicitations hydriques (risque d'évolution à long terme).



Dégradabilité (source : SETRA)

$$DG = \frac{D_{10}(i) \text{ du matériaux avant le 1er cycle imbibition-séchage}}{D_{10}(f) \text{ du matériaux après le 4ème cycle imbibition-séchage}}$$

Seuil retenu $DG = 20$ et 5

$DG > 20$: matériaux rocheux très dégradables

$5 < DG < 20$: matériaux rocheux moyennement dégradables

$DG < 5$: matériaux rocheux peu dégradables

C. Exemple

Exemple d'un matériau peu fragmentable et très dégradable

Taille des blocs après extraction à l'explosif.



Taille des blocs après extraction à l'explosif (source : V. Ferber)

Fragmentation complémentaire après extraction à la pelle mécanique.



Fragmentation complémentaire après extraction à la pelle mécanique (source : V. Ferber)

Fragmentation complémentaire après extraction au bull.



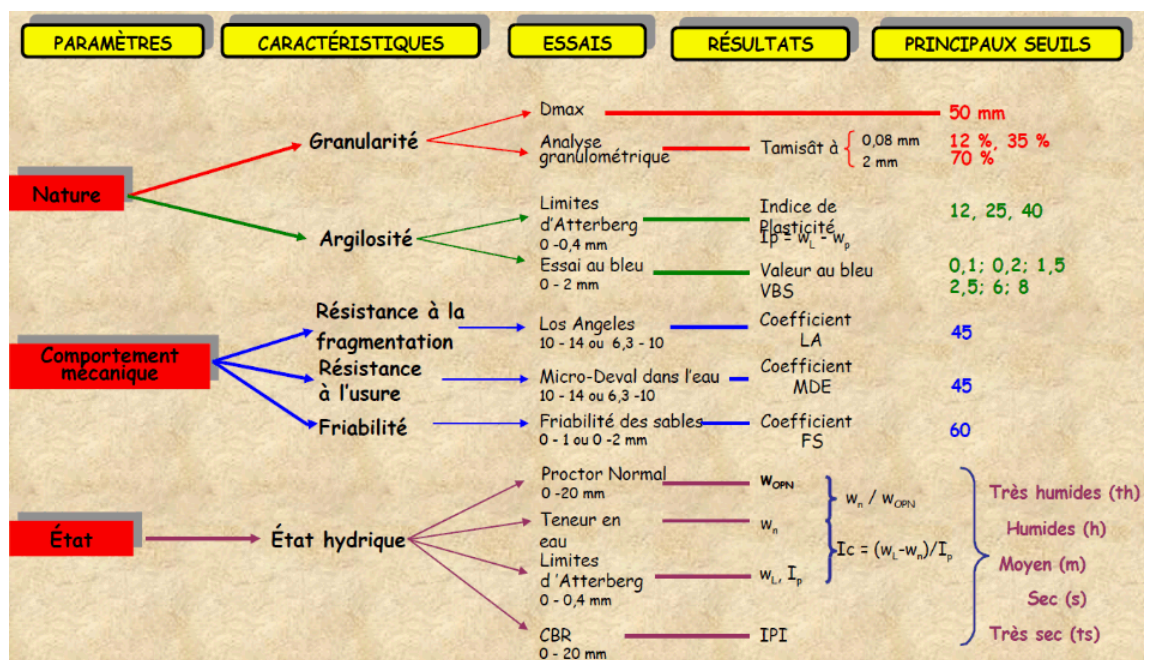
Fragmentation complémentaire après extraction au bulldozer (source : V. Ferber)

Tableaux de synthèse

VII

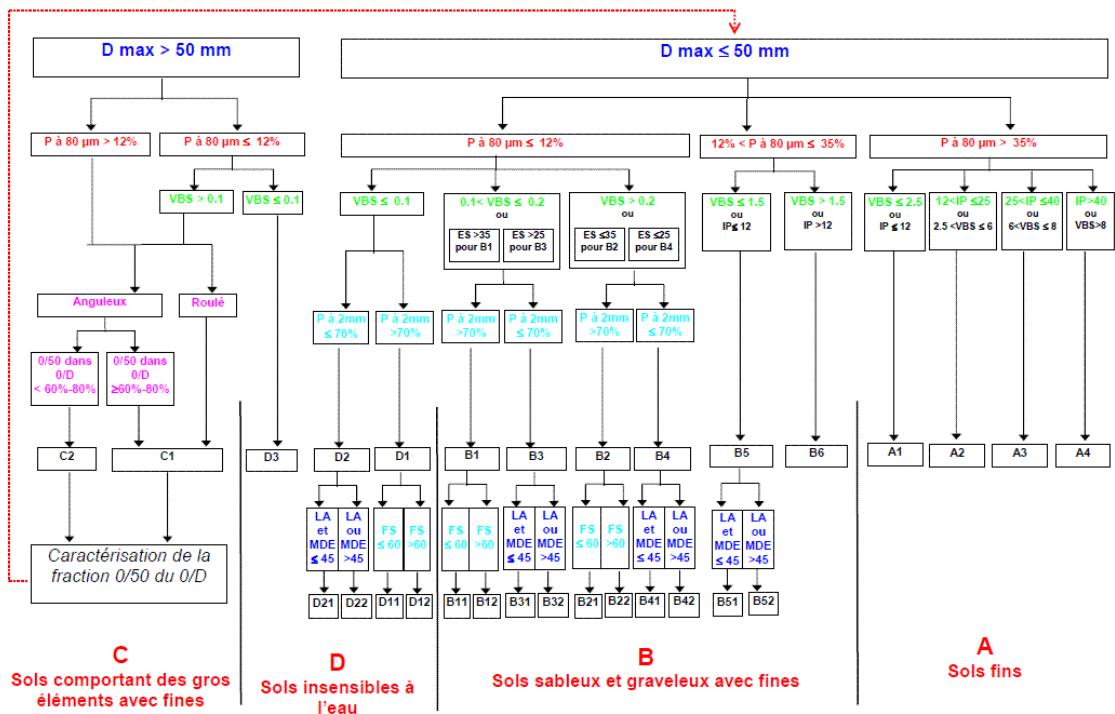
A. Tableaux de synthèse

Tableaux récapitulatifs de la démarche d'identification des sols.



Classification des sols A, B, C et D

Tableau synthétique de la classification GTR pour les sols A, B C et D.



Classification synthétique GTR (source CETE)