

INTRODUCTION A LA GEOTECHNIQUE ROUTIERE

La géotechnique est l'étude de l'adaptation des ouvrages humains aux sols et roches formant le terrain naturel.

Elle traite de l'interaction sol / structures, et fait appel à des bases de géologie, de mécanique des sols, de mécanique des roches et de structures. (En parallèle à la mécanique des sols qui traite des matériaux meubles, la mécanique des roches traite des matériaux rigides, et les géomatériaux cimentés traitent d'une catégorie de matériaux intermédiaires entre les sols et les roches)

Les études géotechniques ont pour principal objet les études de sol pour la construction d'ouvrages (pavillons, immeubles, voiries, ouvrages d'art...), et notamment la définition des fondations, mais aussi dans le cadre de diagnostics pour des ouvrages sinistrés. Elles traitent également des phénomènes de mouvement de sol (glissement, affaissement et autres), de déformation (tassements sous charges) et résistance mécanique.

L'hydrogéologie, qui étudie les nappes aquifères souterraines en vue de leur exploitation, est généralement considérée comme une discipline indépendante, n'entrant pas dans le cadre de la géotechnique. Cependant on doit tenir compte des effets de la présence et de la circulation de l'eau dans le sols qui sont pratiquement à l'origine de tous les accidents dus à des ruptures de sols ou de roches.

Les géotechniciens qui gèrent des équipes de forage, dépouillent des essais in situ et en laboratoire de toutes sortes, ont des connaissances en géologie, hydrogéologie, mécanique des sols et construction. Ils doivent synthétiser toutes ces connaissances pour permettre de construire en toutes circonstances et ce au meilleur coût. C'est donc un métier d'une grande variété qui nécessite une curiosité et un esprit de synthèse.

A partir d'essais de laboratoires et in situ de plus en plus perfectionnés, la Mécanique des Sols fournit aux constructeurs les données nécessaires pour étudier les ouvrages de génie civil et de bâtiment et assurer leur stabilité en fonction des sols sur lesquels ils doivent être fondés, ou avec lesquels ils seront construits (barrages en remblais); ceci tant durant la progression des travaux (grands terrassements) qu'après mise en service des ouvrages.

1. Essais Géotechniques Routières - Réglementation en Algérie

1.1. Définition :

La géotechnique routière est tout simplement l'application de la géotechnique au domaine routier.

Elle concerne :

- les travaux de terrassement (utilisation du sol comme matériaux de construction en déblai/remblai)
- les soutènements et stabilisation de talus
- les fondations des ouvrages d'art

Un projet géotechnique se déroule de la façon suivante :

- Les reconnaissances géotechniques
- La reconnaissance des sols
- Les diverses études
- La fixation des conditions de mise en place des matériaux
- Le contrôle qualité et la réception de la plate-forme sur chantier

1.2. Etude géotechnique routière :

Une étude géotechnique routière vise à reconnaître au droit d'un aménagement existant ou à construire :

- La nature et la répartition des terrains
- Les caractéristiques et comportements des matériaux
- Les caractéristiques hydrauliques du site (présence d'eau, nature des écoulements, etc...)
- Les terrains constitutifs du sous-sol étant non homogènes et non isotropes, avec une répartition spatiale de type aléatoire.

La modélisation et l'étude du comportement des terrains s'appuieront sur une reconnaissance qui sera donc toujours partielle.

L'étude géotechnique devra lever un maximum d'incertitudes sur le sous-sol pour la conception ou le confortement d'un projet.

1.3. Réglementation en Algérie :

En Algérie, la bonne exécution des projets routiers nécessite une étude géotechnique approfondie et adéquate à la réglementation en vigueur. Pour cela, les maîtres d'œuvre se réfèrent à diverses normes dont le choix est parfois imposé par le maître d'ouvrage. La quasi-totalité de ces normes étant internationales (ISO), Françaises (NF) ou Anglo-Saxonnes (EN). Il y a environ 108 normes adoptées dans le domaine des travaux publics dont près de la moitié concerne la géotechnique routière.

Les certifications ISO 9000/9001/9004 de la gestion de qualité, la norme NF P 94-500 relative aux marchés et l'accréditation ISO/CEI 17025 relative à la compétence des laboratoires d'essais sont requises pour l'obtention de rapports qualité/prix très satisfaisants.

L'utilisation des nomenclatures GTR – SETRA et du LCPC aidera à déterminer les caractéristiques des matériaux et de définir leurs conditions de mise en œuvre.

2. Essais Géotechniques Routiers au Laboratoire

Certains essais géotechniques nécessitent un appareillage spécifique et/ou des conditions de travail qui ne peuvent être satisfaites in situ tels que la température ou la durée de l'essai. Sans parler de la disposition du matériel requis et qui, dans un laboratoire, est mieux manié et reste préservé des agressions du climat ou d'un quelconque risque de dégradation possible sur chantier.

Nous pouvons distinguer quatre types d'essais géotechniques routiers établis au laboratoire :

- Les essais d'identification et de classification des sols (teneur en eau, limites d'Atterberg, équivalent de sable, VBS, granulométrie)
- Les essais géomécaniques (œdométrique, cisaillement, triaxiaux)
- Les essais de comportement mécanique (Los Angeles, Micro Deval, friabilité des sables, Marshall)
- Les essais de paramétrage hydrique (CBR, Proctor)

Les résultats et conclusions tirées après chaque groupe d'essais serviront au bon déroulement des essais suivants.

2.1. Les essais d'identification et de classification des sols :

L'objectif de ces essais est de :

- Classer les sols en fonction de leur granularité, plasticité, argilosité, état hydrique, etc.
- Calculer les indices des vides, le degré de saturation, la porosité, etc.

Nous énoncerons le but, le domaine d'application, le principe et les résultats attendus pour chaque essai respectif.

➤ Teneur en eau (séchage à l'étuve) :

Il existe en pratique plusieurs modes opératoires pour la détermination de la teneur en eau, nous citerons à titre d'exemple :

- Le flambage à l'alcool à brûler.
- L'emploi du Carbure de Calcium.
- Le séchage à l'étuve

Nous avons choisi de parler de la dernière méthode.

But de l'essai :

Déterminer la quantité d'eau contenue dans un sol, ou le rapport en % du poids W_w d'eau que le sol contient au poids W_d de ses éléments secs.

Domaine d'application :

Travaux de terrassement et de compactage.

Principe de l'essai :

L'échantillon de matériau humide est pesé, puis placé dans une étuve à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante (masse du matériau sec).

Résultats et interprétations :

La teneur en eau W sera égale à : (masse d'eau évaporée / masse matériau sec) exprimée en %.

Le résultat nous permet de caractériser l'état hydrique du sol :

- Limites d'Atterberg
- Essais Proctor et CBR

Il nous permet aussi de déterminer des paramètres tels que :

- La masse volumique sèche à partir de la masse volumique humide.
- Le dosage en chaux adapté au traitement d'un matériau humide.

➤ **Limites d'Atterberg :**

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

- Etat solide
- Etat plastique
- Etat liquide

But de l'essai :

Caractériser l'argilosité d'un sol, et donc 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)

Domaine d'application :

Cet essai s'applique généralement sur les sols comportant un pourcentage de fines ($80\mu\text{m}$) supérieur à 35%.

La détermination de l'argilosité d'un sol par les limites d'Atterberg que par l'essai VBS (Valeur de Bleu du sol) est à privilégier dès que le sol est argileux à très argileux.

Principe de l'essai :

L'essai s'effectue sur la fraction 0/400 μm en deux phases :

- Détermination de la teneur en eau W_L pour laquelle une rainure pratiquée dans une coupelle se ferme, suite à des chocs répétés pour un nombre de coups donnés (cette limite de liquidité correspond à une résistance à un cisaillement conventionnel)
- Détermination de la teneur en eau W_P pour laquelle un rouleau de sol se fissure (cette limite de plasticité correspond à une résistance à la traction conventionnelle)



W_L : réalisation de la rainure

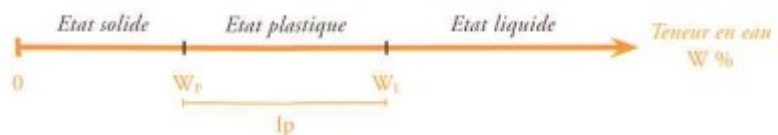


W_p : réalisation du rouleau de sol

Résultats et interprétations :

Expression des résultats

- limite de liquidité W_L (%)
- limite de plasticité W_p (%)
- indice de plasticité $I_p = W_L - W_p$



Interprétation

Le GTR retient les seuils suivants :



Les limites d'Atterberg permettent de calculer l'indice de consistance qui caractérise l'état hydrique d'un sol (80 à 90 % d'éléments < 400 μ m) :

$$I_c = (W_L - W_N) / I_p \text{ avec } W_N: \text{ teneur en eau naturelle de la fraction } 0/400\mu\text{m}$$

$I_c = 0$ si matériau à l'état liquide
 $I_c = 1$ si matériau à l'état solide

➤ Equivalent de Sable (ES) :

But de l'essai :

L'essai équivalent de sable permet de mettre en évidence la proportion de poussière fine nuisible dans un matériau. Et surtout utilisé par les matériaux routiers et les sables à béton. Car il permet de séparer les sables et graviers des particules fines comme les limons et argiles.

Domaine d'application :

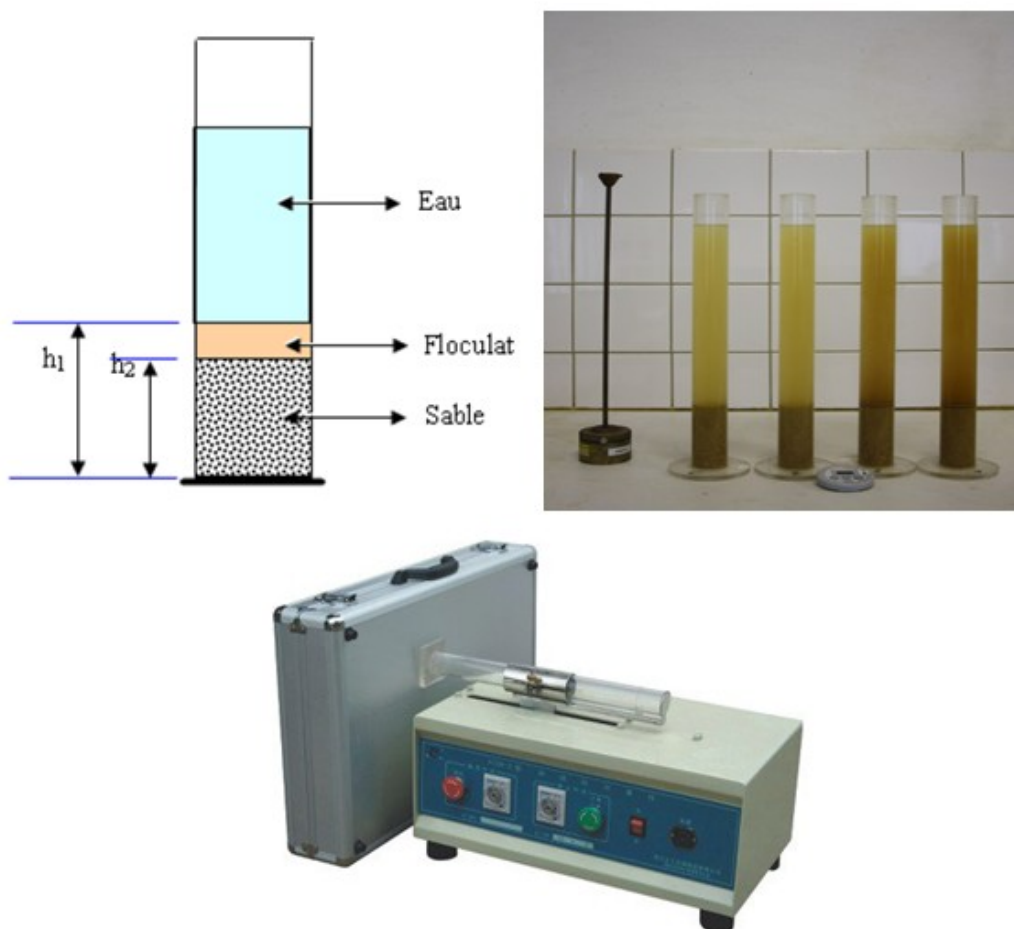
Cette détermination trouve son application dans de nombreux domaines notamment les domaines suivants :

- Classification des sols.

- Etude des sables et sols fins peu plastique.
- Choix et contrôle des soles utilisable en stabilisation mécanique.
- Choix et contrôle des sables à béton.
- Contrôles des sables utilises en stabilisation chimique.
- Choix et contrôle des granulats pour les enrobes hydrocarbonés.

Principe de l'essai :

L'essai équivalent de sable s'effectue sur la fraction des sols passant au tamis de 5mm ; il rend compte globalement de la quantité et de la qualité des éléments les plus fins contenus dans cette fraction, en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments plus fins (argileux par exemple).



Résultats et interprétations :

- C'est un essai empirique, rapide et simple.
- Il s'effectue sur la fraction des sols passant au tamis de 5mm (module AFNOR 38)
- L'essai prolonge l'essai de plasticité quand $I_p < 5$.
- Il sert à éliminer les sols gélifs, à choisir des sols à stabiliser.
- La masse de matériaux nécessaire à l'essai est inférieur au kilogramme.

- L'essai se fait sur deux échantillons et l'équivalent de sable est la moyenne des deux résultats.

➤ Valeur de Bleu du Sol (VBS) :

But de l'essai :

Déterminer la propreté d'un sable, d'un granulat et plus généralement d'un sol, et les différents types d'argiles qu'il contient.

Domaine d'application :

Cet essai concerne les sols et certains matériaux rocheux. Toutefois, pour les matériaux les plus argileux, on privilégiera la réalisation des limites d'Atterberg.

Principe de l'essai :

L'essai au bleu de méthylène est pratiqué sur la fraction granulaire 0/2mm des sables courants ou sur 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 et d'en déterminer la concentration.

On appelle valeur de bleu VB d'un sable (MB dans la norme européenne), la quantité en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 1 kg de fraction 0/2mm du sable.

On appelle valeur de bleu des fillers VBF la 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).

On appelle valeur de bleu sols VBS la quantité en grammes de bleu de méthylène adsorbée par 100 g de fraction 0/50mm d'un sol. Pour cet essai on travaille sur la fraction 0/5 du matériau.

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.



Ensemble du matériel d'essai



Réalisation de taches à dosage croissant



Aurèle bleue apparaissant à la périphérie de la tache (fin de l'adsorption du bleu)

Résultats et interprétations :

La VBS nous est donnée par formule : $VBS = B \cdot C \cdot 100 / M_s$ (en grammes de bleu pour 100g de matériau sec)

B : masse de bleu introduite (solution à 10g/l).

C : proportion du 0/5 mm (soumis à l'essai) dans la fraction 0/50 mm du matériau sec.

M_s : masse sèche de la prise d'essai.

➤ Analyse granulométrique par voie sèche :

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.

Domaine d'application :

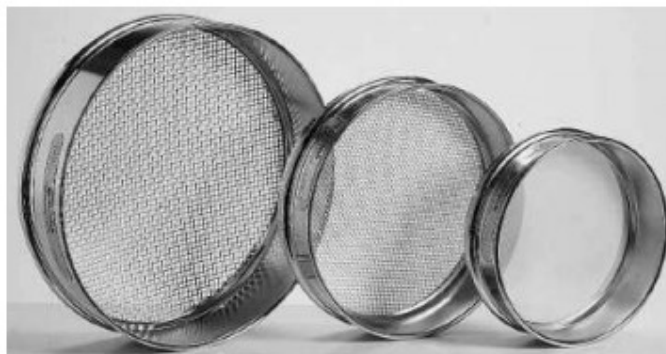
Cette analyse granulométrique permet de définir diverses classes de matériaux indépendamment de leur nature chimique. Le tableau ci-dessous correspond à la norme française NF P18-560 utilisée notamment dans le domaine routier.

Maxi	Appellation	Mini
200 mm	cailloux	20 mm
20 mm	graviers	2 mm
2 mm	sables grossiers	0,2 mm
0,2 mm	sables fins	20 µm
20 µm	limons	2 µm
2 µm	argiles	

Principe de l'essai :

L'essai consiste à fractionner au moyen d'une série de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes.

Les masses des différents refus et tamisats sont rapportées à la masse initiale du matériau. Les pourcentages ainsi obtenus sont exploités sous forme graphique.



Résultats et interprétations :

Tracé de la courbe granulométrique : Il suffit de porter les divers pourcentages des tamisats cumulés sur une feuille semi-logarithmique :

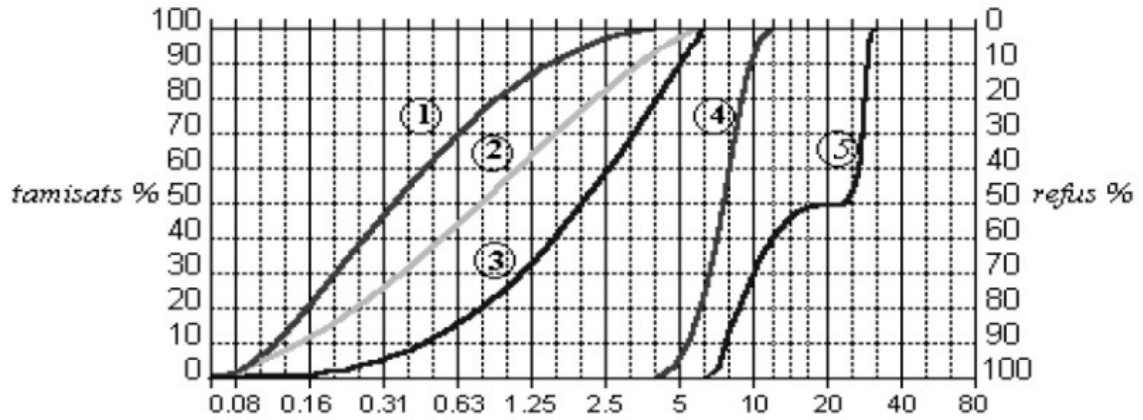
- En abscisse : les dimensions des mailles, échelle logarithmique
- En ordonnée : les pourcentages sur une échelle arithmétique.

La courbe doit être tracée de manière continue.

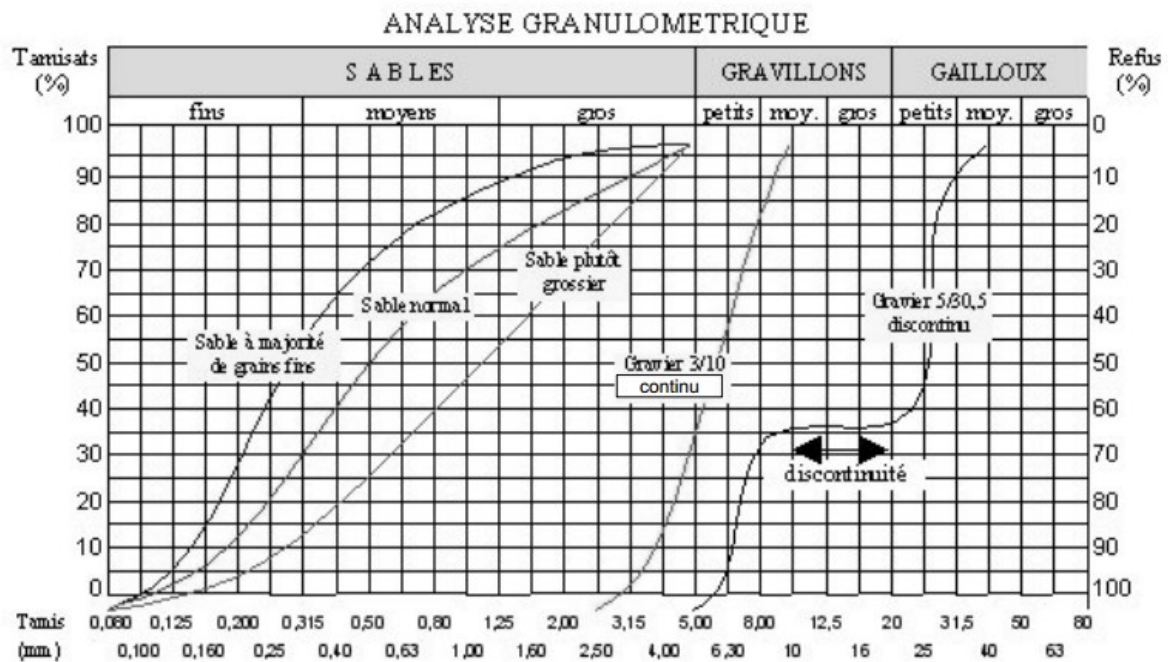
La forme de la courbe granulométrique obtenue apporte les renseignements suivants :

- Les dimensions d et D du granulat,
- La plus ou moins grande proportion d'éléments fins,
- La continuité ou la discontinuité de la granularité.

Ci-dessous, des types de tracés obtenus :



1. Sable à majorité de grains fins,
2. Sable normal,
3. Sable plutôt grossier
4. gravillon 5/10 à granulométrie continue
5. gravillon 5/25 à granulométrie discontinue



➤ Analyse granulométrique par voie humide :

But de l'essai :

Tracer la courbe granulométrique des éléments fins.

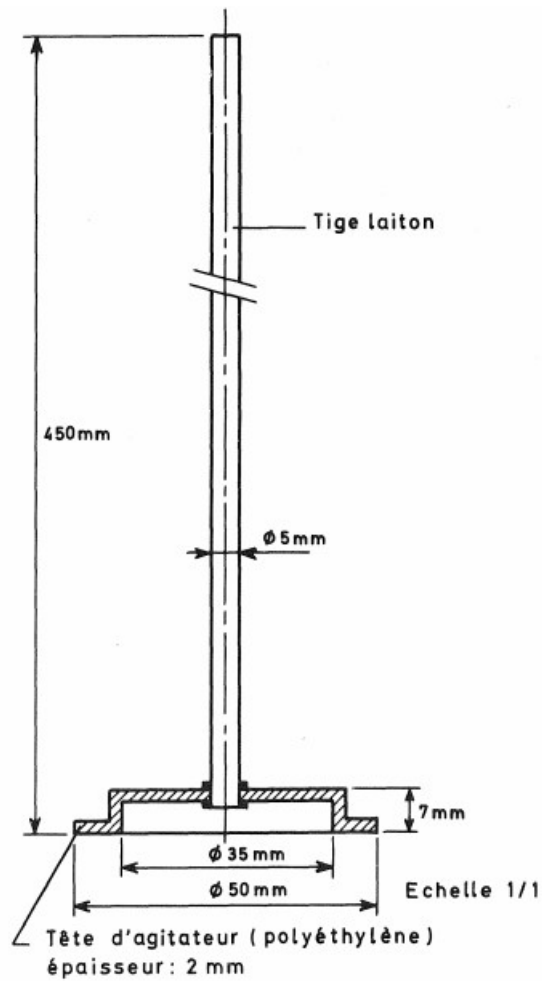
Principe de l'essai

La méthode consiste à mesurer le temps de sédimentation dans une colonne d'eau, c'est-à-dire la vitesse de chute des particules.

À partir de la loi de Stokes, on détermine la taille des grains.

- v : vitesse de sédimentation (m/s)
- g : accélération de la pesanteur
- $\Delta\gamma$: différence de masse volumique entre les particules et le fluide (kg/m^3)
- μ : viscosité (Pa·s)
- $r : \sqrt{(9 \mu v / 2 g \Delta\gamma)}$

$$v = g \frac{\gamma_s - \gamma_e}{18 \eta} D^2$$



Agitateur Manuel

2.2. Les essais géomécaniques

➤ Définition de la géomécanique :

La géomécanique est l'outil mathématique de la géotechnique ; elle synthétise la mécanique des sols, la mécanique des roches, l'hydraulique souterraine et une partie de la sismique.

Lors d'études géotechniques pour aménager et/ou exploiter la subsurface terrestre : projeter, construire et entretenir un ouvrage ; assurer la stabilité d'un talus de remblais ou de déblais, d'une excavation souterraine, d'un soutènement, estimer celle d'un versant naturel ; éviter la rupture et limiter le tassement d'une fondation d'ouvrage ; estimer le débit d'un puits, d'un drain, d'une fouille à épuiser... on doit poser des problèmes de géomécanique et les résoudre par le calcul ; ils concernent la déformation ou le déplacement du géomatériau, sol, roche et/ou eau, sous l'action de la gravité à laquelle peuvent s'associer des efforts spécifiques, induits par un événement naturel ou par la mise en œuvre du sous-sol d'un site de construction ; ce sont généralement des charges de remblais ou de fondations, des décharges de galeries ou de déblais, des pressions hydrostatiques ou de courant...

➤ Essai de compression à l'œdomètre :

But de l'essai :

Lorsque des couches de sols sont soumises à des sollicitations de grande étendue (dallages, remblais...) on peut considérer que la compression est unidimensionnelle. La déformation verticale qui en résulte est appelée tassement. Pour simuler en laboratoire ces chargements unidimensionnels, on comprime des échantillons intacts de sol dans un appareil appelé œdomètre. Cet essai permet d'établir, pour un échantillon donné, deux types de courbes : - la courbe de compressibilité, qui indique le tassement total en fonction de logarithme de la contrainte appliquée, - les courbes de consolidation, qui donnent le tassement de l'échantillon en fonction du temps sous application d'une contrainte constante.

Domaine d'application :

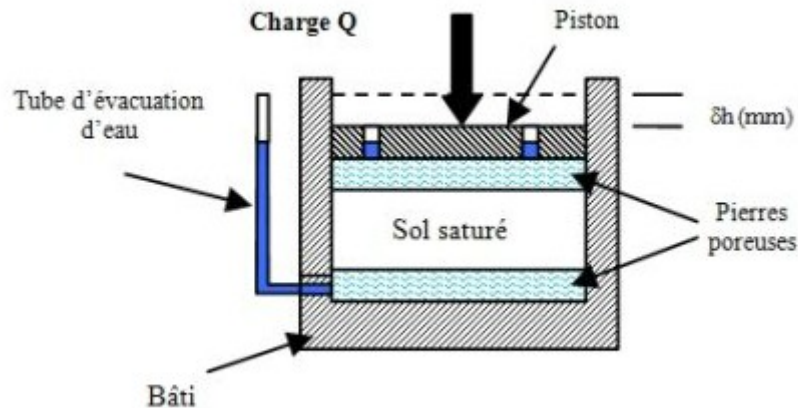
Etude des sols cohérents.

Principe de l'essai:

L'essai s'effectue sur une éprouvette de sol placée dans une enceinte cylindrique rigide (œdomètre). - Diamètre de la boîte : $D \geq 60$ mm - hauteur de l'éprouvette : $10 \text{ mm} \leq H_i \leq 0,4 D$ Un dispositif applique sur cette éprouvette un effort

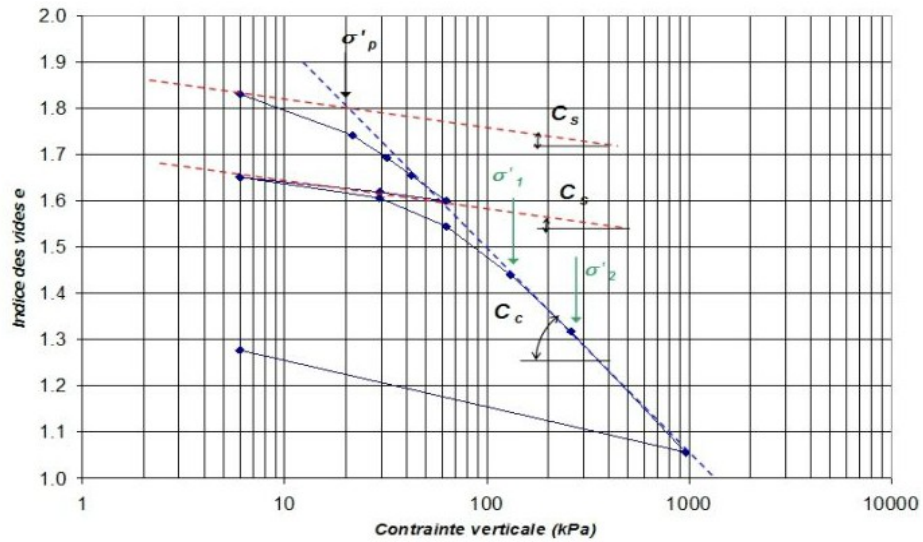
axial vertical, l'éprouvette étant drainée en haut et en bas et maintenue saturée pendant l'essai. La charge est appliquée par paliers maintenus constants successivement croissants et décroissants suivant un programme défini. Les variations de hauteur de l'éprouvette sont mesurées pendant l'essai en fonction de la durée d'application de la charge.

Les paliers de chargement et de déchargement sont maintenus au moins 24 heures et prolongés si nécessaire dans les conditions fixées par la norme.



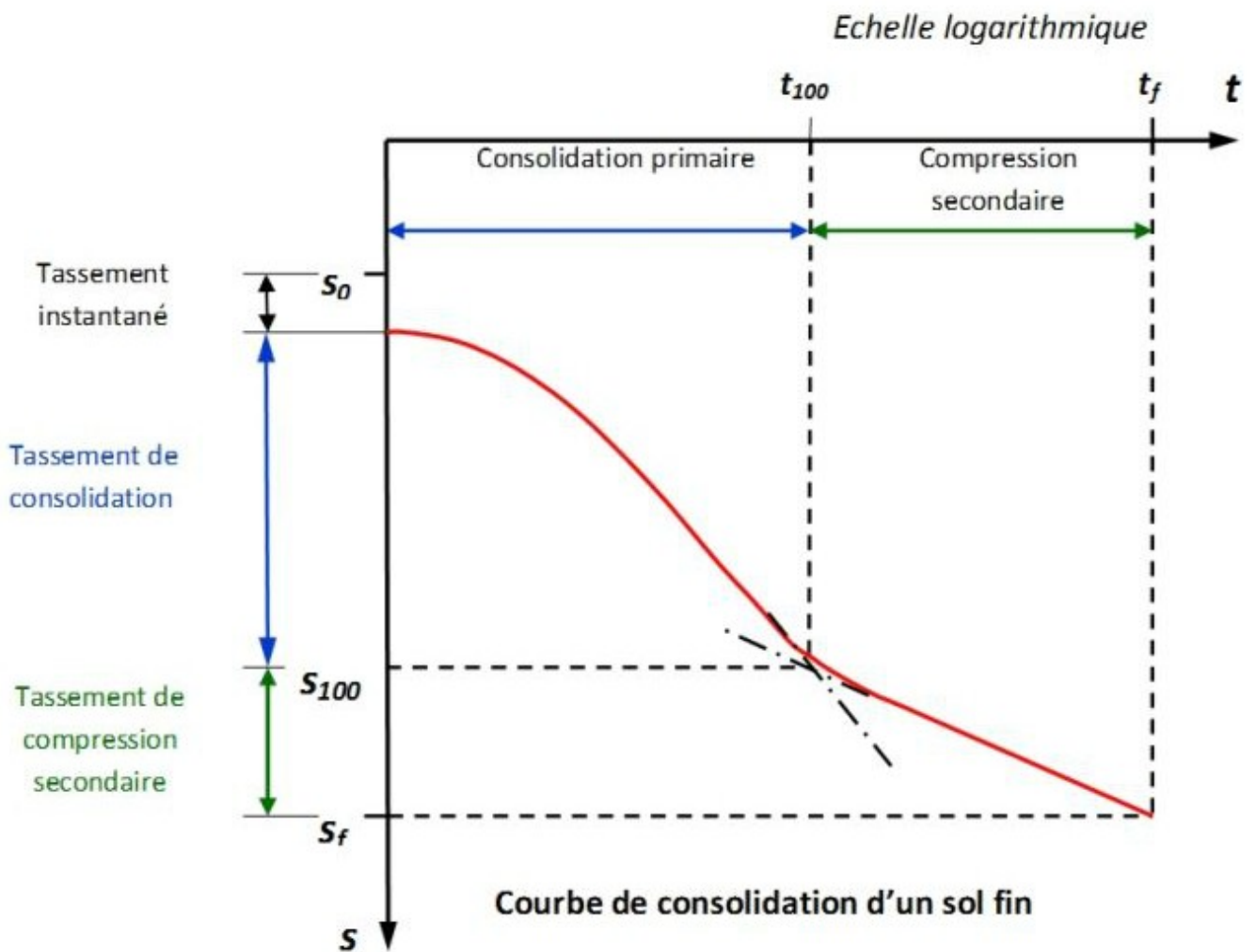
Résultats et interprétations :

- Courbe de compressibilité :
 - Contrainte effective verticale σ'_{vo} : contrainte effective verticale du sol en place au moment de son prélèvement.
 - Contrainte effective de pré-consolidation σ'_p : contrainte effective maximale sous laquelle le sol s'est déjà consolidé au cours de son histoire.
 - Indice de compression C_c : pente de la tangente à la courbe vierge qui permet de préciser la sensibilité du sol au tassement le long de cette courbe.
 - Indice de gonflement C_s : traduit la déformabilité d'un échantillon non gonflant en deçà de la contrainte de consolidation à laquelle il a été soumis (à ne pas confondre avec C_g coefficient de gonflement).
 - Module œdométrique sécant E_{oed} : module de déformation calculé entre deux points de la courbe de chargement N_1 (σ_1, e_1) et N_2 (σ_2, e_2), qui n'a pas une valeur constante. Ce module permet de calculer les tassements des sols.



- Courbe de consolidation ($\sigma=c^{ste}$) :

- La courbe de consolidation permet de mettre en évidence à la fois la consolidation primaire et la consolidation secondaire. L'intersection des tangentes aux deux branches de la courbe relatives à ces deux types de consolidation définit conventionnellement la fin de la consolidation primaire correspondant à s_{100} et t_{100} .
- Par une série de constructions graphiques on peut déduire la valeur du coefficient de consolidation vertical C_v (m^2/s) qui permettra de calculer ensuite les vitesses de tassement des couches de sol.



- Essai de cisaillement (sol pulvérulent) :

But de l'essai :

Déterminer expérimentalement la courbe intrinsèque d'un sol pulvérulent puis d'en déduire les paramètres de cisaillement qui permettent d'estimer par exemple la contrainte de rupture sous une fondation superficielle.

Domaine d'application :

L'essai de cisaillement réalisé à la boîte s'applique dans des conditions drainées sur tous les types de sols naturels, reconstitués ou artificiels.

L'essai fournit des paramètres de résistance au cisaillement rectiligne des matériaux soumis à essais.

Principe de l'essai :

Dans l'essai de cisaillement à la boîte de Casagrande, on cherche à provoquer la rupture de l'échantillon suivant un plan imposé.

L'échantillon est placé dans une boîte constituée de deux parties qui peuvent glisser horizontalement l'une sur l'autre.

On applique à l'échantillon un effort normal de compression N , verticalement, par l'intermédiaire d'un piston et un effort tranchant T , horizontalement, en déplaçant la demi-boîte inférieure.

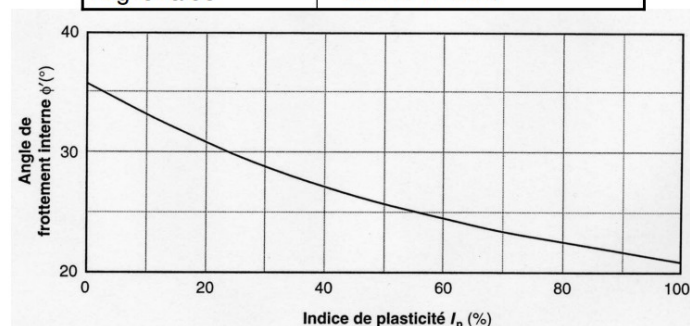
Un comparateur mesure la variation de hauteur de l'échantillon.

Résultats et interprétation :

La courbe intrinsèque nous donne les valeurs de l'angle de frottement interne et C (terme de la cohésion).

Comportement des sols fins

Argile très molle	$C_u < 25 \text{ kPa}$
Argile molle	$25 \text{ kPa} < C_u < 50 \text{ kPa}$
Argile consistante	$50 \text{ kPa} < C_u < 100 \text{ kPa}$
Argile raide	$100 \text{ kPa} < C_u$



➤ Essais triaxiaux :

But des essais :

Déterminer la résistance au cisaillement.

Principe de l'essai :

On distingue :

- Essais non consolidés non drainés (UU)
- Essais consolidés non drainés avec mesure de la pression interstitielle (CU + u)
- Essais consolidés non drainés sans mesure de la pression interstitielle (CU)
- Essais consolidés drainés (CD)

Une éprouvette de sol de forme cylindrique et de section droite circulaire (élancement proche de 2), est placée sur une embase rigide, munie ou non d'un disque drainant, à l'intérieur d'une enceinte étanche (cellule triaxiale).

Sur sa surface latérale, l'éprouvette est recouverte d'une membrane souple et imperméable.

A la partie supérieure de l'éprouvette est placée une embase rigide munie ou non d'un disque drainant, sur laquelle vient s'appuyer un piston.

La cellule est remplie d'eau.

Le dispositif d'essai permet de mettre cette eau en pression et ainsi d'appliquer à l'éprouvette une contrainte isotrope σ_3 ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$).

L'essai s'effectue en imposant à l'éprouvette une déformation axiale à vitesse constante.

Il consiste à faire croître F en enfonçant le piston à vitesse constante tout en maintenant la pression σ_3 constante.

L'éprouvette est donc soumise à :

- Une pression hydrostatique imposée à l'intérieur de l'enceinte par un liquide.
 - Une déformation axiale par déplacement relatif des deux embases.
- Par symétrie les contraintes σ_1 et σ_3 sont respectivement verticale et horizontale.

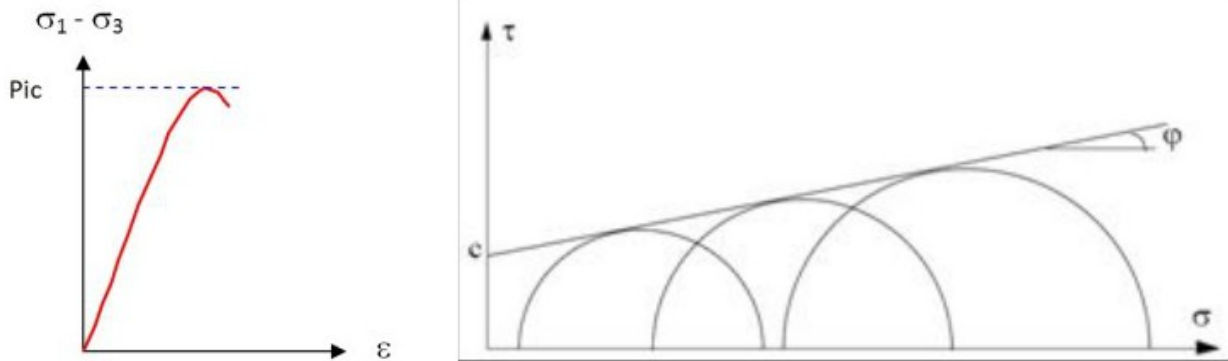
Résultats et interprétations :

Comme σ_3 s'applique également sur la face supérieure de l'éprouvette, il s'ensuit que :

$$\frac{F}{S} = q = \sigma_1 - \sigma_3$$

- La courbe effort-déformation ($\sigma_1 - \sigma_3$; e) peut être enregistrée au cours de l'essai.
- Au moment de la rupture, le déviateur maximal des contraintes $q = \sigma_1 - \sigma_3$ correspondant au cercle de Mohr tangent à la courbe intrinsèque est connu.

- Plusieurs essais sont effectués (au moins 3) à des pressions de confinement différentes et représentatives du confinement in-situ.
- Les caractéristiques mécaniques sont obtenues en représentant dans le plan de Mohr l'état des contraintes à la rupture.



2.3. Les essais de comportement mécanique :

➤ Essai Los Angeles :

But de l'essai :

L'essai Los Angeles permet de mesurer les résistances combinées aux chocs et 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.

Domaine d'application :

Granulats d'origine naturelle ou artificielle.

La résistance à la fragmentation est un critère de classification des sols granulaires et matériaux rocheux.



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, M1 est la masse des éléments supérieurs à 1,6 mm produits au cours de l'essai qui est égouttée et séchée à l'étuve jusqu'à poids constant.



Résultats et interprétations :

On définit 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.

$$LA = 100 \times (M - M_1) / M \quad LA : \text{résistance à la fragmentation}$$

➤ Essais Micro Deval par voie sèche (MDS) :

But de l'essai :

Déterminer la résistance à l'usure par frottements réciproques des éléments d'un granulat

Domaine d'application :

Cet essai permet de mesurer la résistance à l'usure d'un échantillon de granulats. En règle générale, l'échantillon est soumis à l'essai en présence d'eau, mais il peut aussi être

effectué à sec.

Il s'applique aux granulats naturels et artificiels utilisés dans le bâtiment et les grands travaux.

Principe de l'essai :

La prise d'essai, constituée de 500g d'une classe granulaire (4/6, 6/10 ou 10/14 mm), est placée avec une charge constituée de billes d'acier de 10 mm de diamètre, dans un cylindre métallique.

La rotation du cylindre autour de son axe placé horizontalement entraîne une usure par frottement granulats-billes et la formation d'une proportion de fines d'autant plus grande que le matériau est plus tendre. Le pourcentage de ces éléments fins produits au cours de l'essai constitue le coefficient Micro Deval.



Résultats et interprétations :

Le coefficient Micro Deval est par définition égal au rapport :

$$m = M - m'$$

$$CMD = 100 \times m / M$$

M : masse de l'échantillon 500 ou 10.000 g selon la classe choisie.

m : masse du tamisât au tamis de 1,6 mm

Le résultat sera arrondi à l'unité. Le coefficient mesure le % d'usure, plus il est petit plus la résistance à l'usure est grande.

➤ 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.

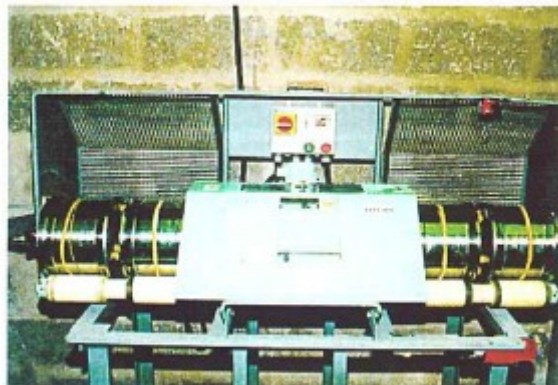
Objectif : évaluer l'évolution des matériaux sableux sous le trafic de chantier.

Domaine d'application :

La friabilité est un critère d'identification reconnu par le GTR pour préciser le classement des sables pour un emploi en couche de forme.

Principe de l'essai :

Mesurer l'évolution granulométrique d'une fraction de sable (0,2 - 2 mm ou 0,2 - 4 mm) produite par fragmentation dans un cylindre en rotation en présence d'eau et d'une charge broyante (billes métalliques).



Exemple d'appareil utilisable pour la mesure du FS

Résultats et interprétations :

Le coefficient de friabilité des sables F_s est égal à :

$$F_s = 100 \times \frac{\text{masse sèche (g) des éléments inférieurs à 0,1 mm produits durant l'essai}}{500}$$

F_s est l'un des indicateurs permettant de juger la résistance au trafic de chantier des matériaux sableux non traités utilisés en couche de forme.

La limite supérieure préconisée pour cet usage est $F_s = 60\%$..

➤ Essai Marshall :

But de l'essai :

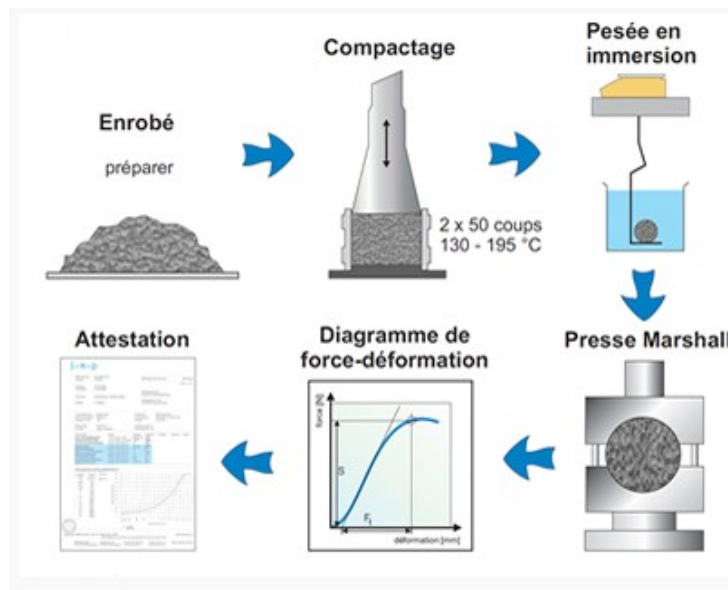
Détermination pour une température et une énergie de compactage données de la résistance mécanique dite « stabilité », de l'affaissement dit « fluage » et du quotient Marshall des éprouvettes de mélanges hydrocarbonées

Domaine d'application :

Cette procédure s'applique dans le laboratoire sur un matériau d'origine naturelle, dans le domaine des routes.

Principe de l'essai :

Confection d'éprouvettes de mélanges hydrocarbonées par compacteur à impact selon un processus déterminé, puis essai de compression suivant une génératrice dans des conditions définies.



Résultats et interprétations :

- Teneur en vides de l'enrobé [%-vol.]
- Masse volumique apparente de l'enrobé [g/cm³]
- Stabilité S [kN] et la valeur de fluage F_t [mm]

2.4. Les essais de paramétrage hydrique :

➤ Essai CBR (California Bearing Ratio) :

But de l'essai :

L'essai permet de déterminer la capacité de portance d'un sol compacté, en estimant sa résistance au poinçonnement, en fonction de son état, sa densité et son humidité, ainsi que les charges appliquées. Il mesure la résistance à l'effort tranchant d'un sol sous conditions d'humidité et de densité contrôlées et du niveau de compactage variable, en permettant d'obtenir un pourcentage du rapport de portance. Cet essai CBR est utilisé pour le dimensionnement des structures des chaussées et l'orientation des travaux de terrassements.

Cet essai permet donc :

- D'établir une classification des sols (GTR)
- D'évaluer la traficabilité des engins de terrassement (IPI)
- De déterminer l'épaisseur des chaussées (CBR augmente \Rightarrow épaisseur diminue)

Domaine d'application :

Cet essai s'applique sur la fraction inférieure à 20mm.

Principe de l'essai :

Les essais de CBR sont effectués sur des échantillons compactés avec une teneur en humidité optimale, obtenus à partir de l'essai de compactage Proctor.

L'expression qui définit le CBR est la suivante :

$$CBR = \frac{P}{P_s} \cdot 100$$

Où:

P = est la pression mesurée dans les sols du site [N / mm²]

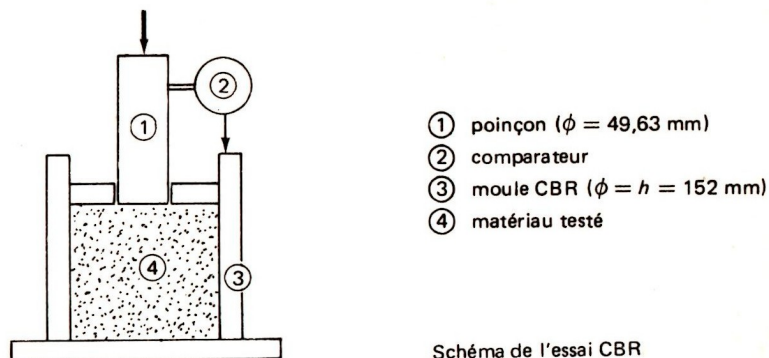
P_s = est la pression pour atteindre la pénétration égale sur sol standard [N / mm²].

L'équation représente le nombre CBR, qui représente le pourcentage de la charge unitaire standard. Dans la pratique, le symbole de (%) est enlevé et le rapport est représenté par un nombre entier.

Normalement le nombre CBR est basé sur le rapport de la charge pour une pénétration de 2,5 mm (0,1 pouces), cependant si la valeur de CBR à une pénétration de 5mm (0,2 pouces) est supérieure, l'essai doit être répété. Si, au cours du deuxième essai, la valeur CBR dépasse les 5 mm de pénétration, cette valeur pourra être acceptée.

Avant la détermination de la résistance à la pénétration, les éprouvettes peuvent être saturées d'eau pendant 96 heures pour simuler les conditions de travail les plus défavorables et pour déterminer sa possible expansion.

Dans la plupart des cas, 3 éprouvettes au moins sont confectionnées, auxquelles sont appliquées différentes énergies de compaction (56, 25 et 10 de coups). Le sol doit avoir une petite quantité de matériel passant par le tamis de 50 mm et une retenue dans le tamis de 20 mm inférieure ou égale à 20%.



Résultats et interprétations :

Les résultats sont répertoriés dans le tableau ci-dessous :

Sols:	Graves:
Portance CBR ₁ [%]	Portance CBR ₂
très élevée > 25	matériaux ronds ≥ 40 %
moyenne 6 - 12	matériaux concassés ≥ 80 %
très faible < 3	résistance au gel: CBR ₂ / CBR ₁ ≥ 0.5

Si la fraction d'éléments supérieures à 20 mm excède 20%, l'essai perd sa signification. la quantité strictement nécessaire à l'essai est de 6kg.

La dispersion des résultats est grande.

Si l'allure de la courbe n'est pas celle indiquée sur le diagramme, il est nécessaire de faire des corrections particulières.

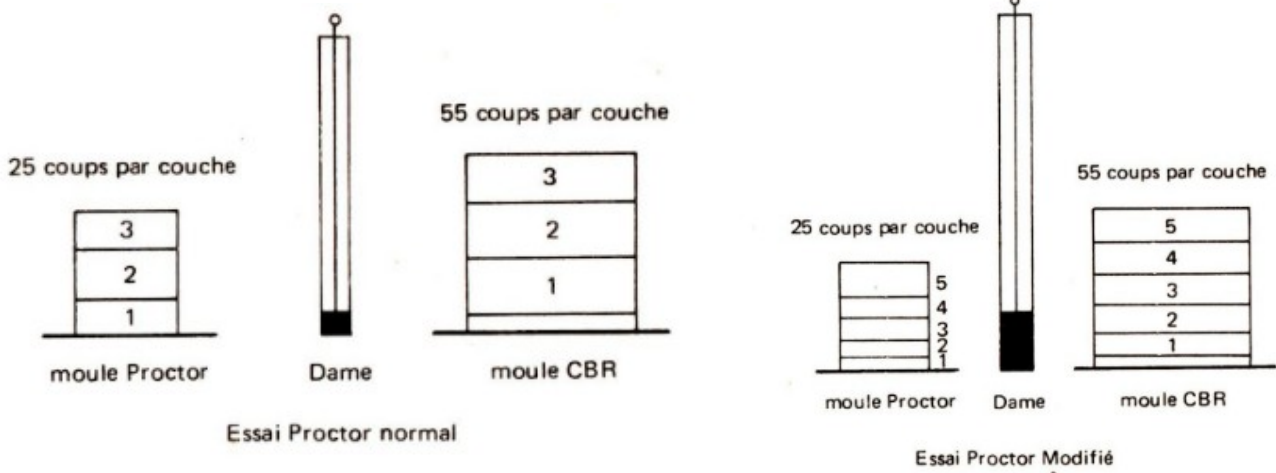
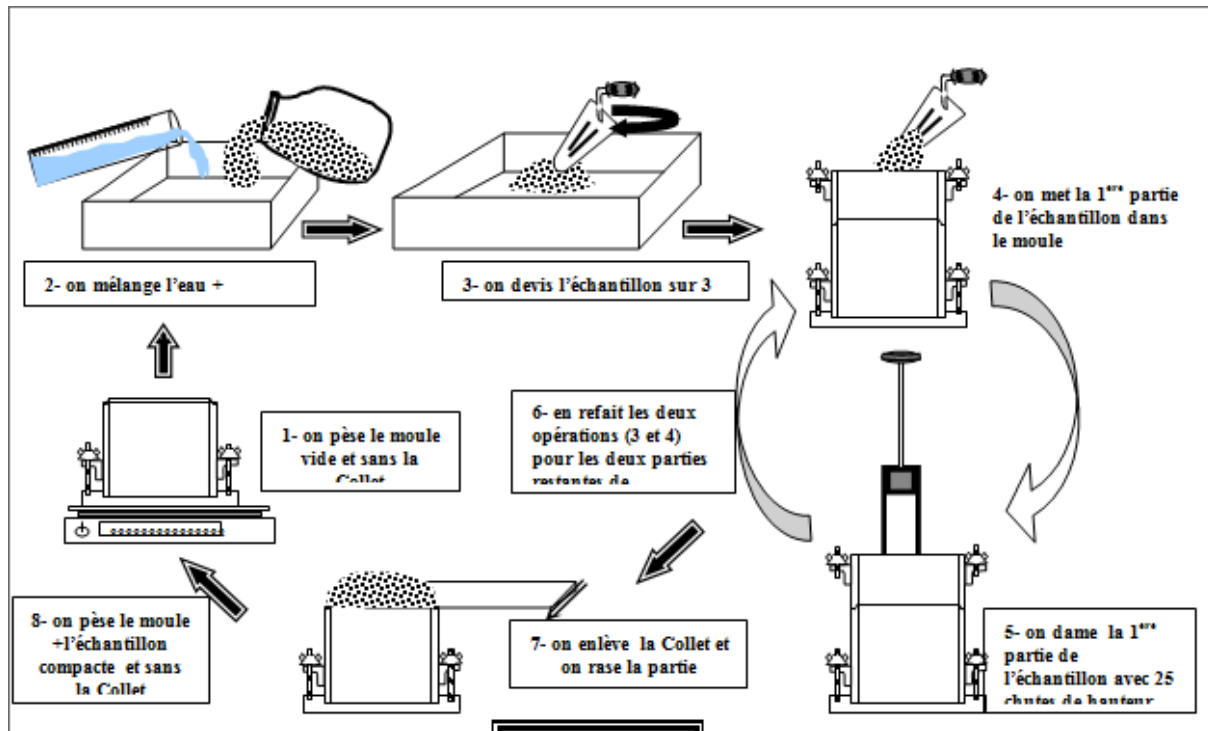
➤ Essais Proctor :

But de l'essai :

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).

Principe de l'essai :

Lorsqu'on compacte de façon identique des échantillons d'un même sol, à des teneurs en eau différentes, on constate que la densité sèche γ_d varie et passe par un maximum pour une teneur en eau déterminée (dite optimale) w_{opt} .



Résultats et interprétations :

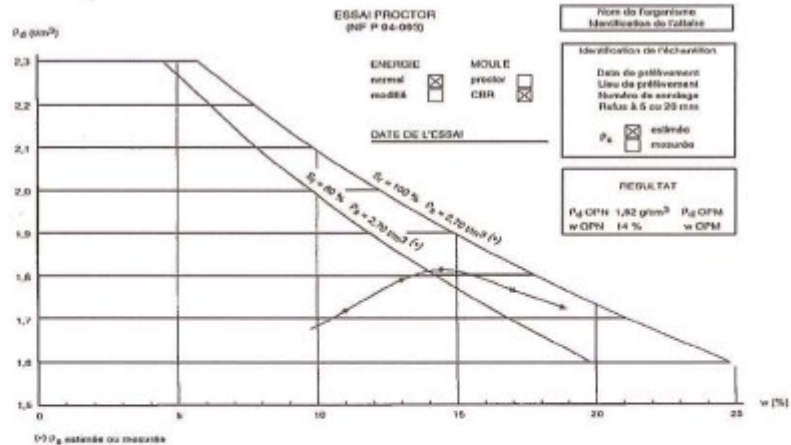
Suivant le document de la SETRA, nous aurons ceci :

Expression des résultats

Pour chaque éprouvette compactée, il convient de déterminer la teneur en eau, la masse de matériau sec contenu dans le moule et la masse volumique du matériau sec.

Les valeurs des masses volumiques du matériau sec et des teneurs en eau correspondantes sont portées sur un graphique. On trace ensuite la courbe ajustée sur les cinq points expérimentaux.

Le maximum de la courbe donne la masse volumique sèche optimum (ρ_{dOPN} en t/m^3) et la teneur en eau optimum Proctor (W_{OPN} en %).



Exemple de courbe Proctor

Interprétation

La courbe $\rho_d = f(w)$ permet d'apprécier le comportement au compactage du matériau en fonction de la teneur en eau.

On peut également caractériser l'état hydrique d'un matériau par l'écart relatif entre sa teneur en eau avec celle de son OPN (W/W_{OPN})

L'utilisation des références de compactage du matériau (ρ_{dOPN} et W_{OPN}) n'est possible que lorsque la proportion d'éléments supérieurs à 20 mm est inférieure à 30 %.

CONCLUSION

Nous décidons de conclure en tentant de répondre à deux grandes questions qui sont :

I. Les méthodes : lesquelles et comment les choisir ?

Elles sont très nombreuses et doivent être choisies en fonction du contexte et de la nature des renseignements qu'elles peuvent fournir.

II. Quelles sources doit-on suivre ?

La grande majorité des calculs opérés lors des essais géotechniques sont purement expérimentaux, c'est pour cela qu'il faut toujours diversifier ses sources pour croiser les résultats et opérer des contrôles systématiques.

Aussi, à la fin de chaque batterie d'essais, le géotechnicien doit pouvoir :

- Décrire le sol analysé
- Le classer en fonction de sa capacité à servir de sol d'assise.
- Etablir une approche des solutions de fondement envisageable.
- Evaluer les tassements absolus et différentiels en fonction des solutions envisagées.