

CHAPITRE 0

PRESENTATION DE LA MECANIQUE DES SOLS

0.1 Introduction
0.2 Historique de la Mécanique des sols
0.3 Aperçu sur les études en Mécanique des sols
0.4 Conclusion

0.1 Introduction

La mécanique des sols est une science qui s'intègre au domaine du Génie Civil, qui traite de la construction des ouvrages reposant sur la surface de la terre ~~quelque~~ *quelle que* soient leurs dimensions. Le recours à cette science a lieu à différents niveaux:

* Pour une structure reposant sur un sol qui est plus déformable en général que la structure elle-même (béton, métal), le sol ne peut supporter que de faibles contraintes; il faut donc analyser de près le système qui transmet les efforts de la structure au sol par l'intermédiaire des fondations. C'est le cas des bâtiments et des ouvrages d'art.

** Le sol peut lui-même servir comme matériau de construction pour des ouvrages plus massifs, par rapport aux ouvrages en béton armé ou en métal, mais qui sont plus souples: ce sont les ouvrages en terre, tels que les barrages et les digues.

*** Certains ouvrages particuliers, et qui sont intermédiaires aux deux catégories précédentes, sont aussi étudiés; il s'agit des ouvrages de soutènement.

Cependant, la principale difficulté réside dans les sols, dont la constitution et le comportement mécanique sont complexes. Pour déterminer leur nature (du point de vue ~~géologie et~~ géotechnique) et leur type, il faut faire appel à des techniques délicates et coûteuses, telles que forages, prélèvements d'échantillons, essais en laboratoire, essais en place (in situ), etc.. . Cela est très important parce qu'il faut bien connaître le sol sur lequel on construit avant même de décider du type de fondation, et même parfois, du type de l'ouvrage à implanter. Cette étude qui s'appelle la reconnaissance des sols, nécessite une étude géotechnique.

0.2 Historique de la mécanique des sols

La mécanique des sols est une science récente pour laquelle les dates importantes à retenir sont les suivantes:

- l'étude du frottement des corps, et la présentation du fondement de la résistance au cisaillement due à Coulomb: 1773-1776;
- l'étude des glissements de terrain, et l'introduction de la notion de stabilité des pentes (lors de la construction du canal de Bourgogne) due à Collin: 1846;
- l'étude de l'écoulement d'eau à travers un sol, et l'introduction d'une loi d'écoulement unidimensionnelle due à Darcy: 1858;
- la parution du premier ouvrage de mécanique des sols avec l'introduction des notions de contrainte effective, de consolidation d'un sol fin, et des comportements à court terme et à long terme, elles sont dues à Terzaghi: 1925.

0.3 Aperçu sur les études en mécanique des sols

0.3.1 Les fondations

Ce sont les éléments de transmission des efforts appliqués par l'ouvrage sur le sol qui ne doit pas être le siège de déformations excessives. Deux cas extrêmes sont considérés:

* Le sol est constitué d'une couche ferme et résistante (rocher, grave, sable) près de sa surface, les éléments utilisés sont en béton armé, et sont placés sous des piliers ou des murs porteurs. Il s'agit des fondations superficielles (figure 1a).

** Le sol ferme est à très grande profondeur, il faut alors reporter les efforts dus à la superstructure par l'intermédiaire d'éléments verticaux (ou inclinés) résistants appelés pieux, et dont le diamètre varie généralement de 0,4 m à 1,0 m. Il s'agit des fondations profondes (figure 1b).

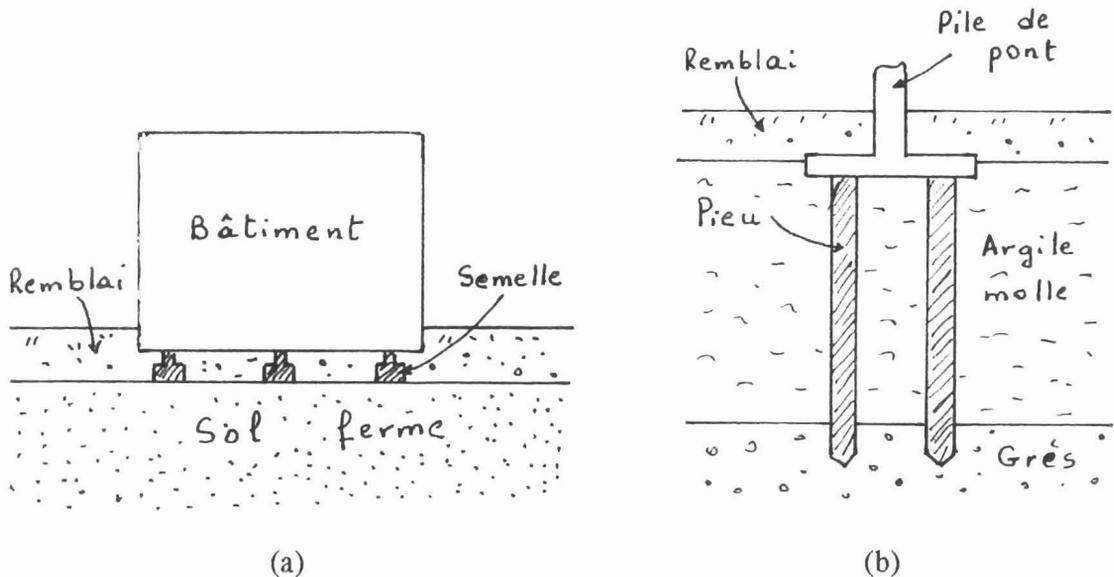


Figure 1. Systèmes de fondations courants

Le choix entre une fondation superficielle et une fondation profonde est difficile, surtout lorsqu'on est loin des deux cas précédents. Cependant, la solution fondations superficielles doit être toujours examinée auparavant, parce qu'elle est moins coûteuse que celle des fondations profondes.

0.3.2 Les ouvrages en terre

On raisonnera sur l'exemple du barrage en terre représenté sur la figure 2. Dans ce cas, plusieurs problèmes sont à résoudre:

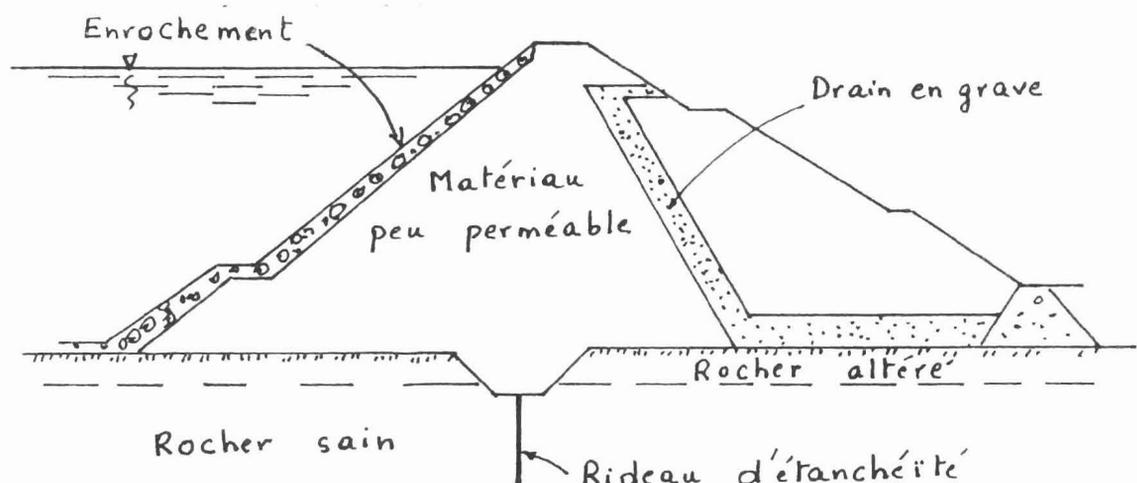


Figure 2. Coupe type d'un barrage en terre

- le choix des matériaux de construction disponibles près du site;
- la perméabilité du sol de fondation pour étudier l'écoulement ou l'infiltration d'eau;
- le compactage du sol constituant le corps du barrage pour déterminer la densité sèche maximale et la teneur en eau optimale;
- la stabilité des talus du barrage pour des cas différents: retenue pleine, vidange rapide.

0.3.3 Les techniques de renforcement des sols

En 1961, l'ingénieur français Vidal a mis au point une technique permettant d'améliorer les performances mécaniques d'un sol. Il s'agit de la terre armée qui consiste à mettre des lits d'armatures régulièrement espacés dans un remblai de sable compacté, l'ensemble sol-armature peut résister à des efforts de traction importants (figure 3).

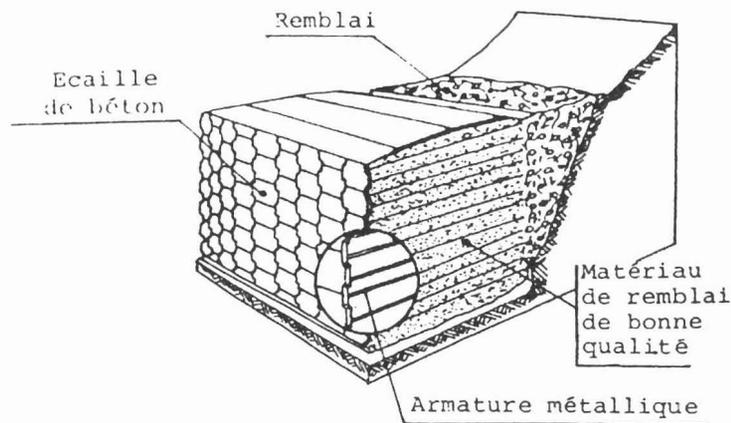


Figure 3. Principe de la terre armée, Schlosser 1983

D'autres techniques sont ensuite apparues telles que:

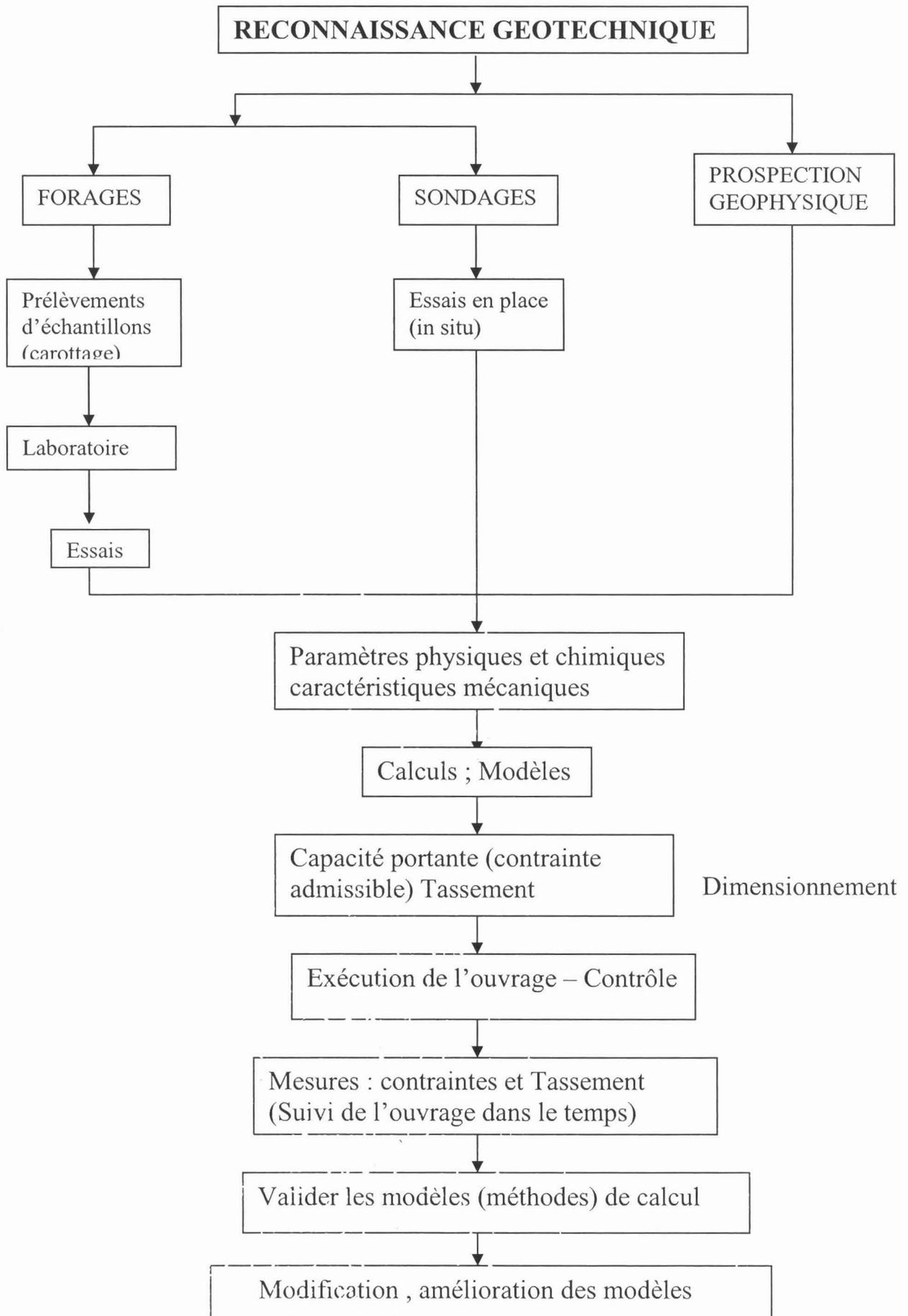
- les colonnes ballastées ou de sol traité à la chaux: elles permettent d'augmenter la capacité portante des sols mous et réduire leur tassement;
- le clouage par des inclusions métalliques, il permet d'assurer une meilleure stabilité des talus de déblai, notamment vis à vis du glissement;
- les géotextiles qui sont des textiles synthétiques perméables dont le rôle est de renforcer le sol en place et lui conférer une déformabilité élevée avant la rupture.

Ces techniques sont souvent utilisées lors de la construction des ouvrages en génie civil.

0.4 Conclusion

Lors de la construction d'un ouvrage, la mécanique des sols intervient en général à trois niveaux:

- Reconnaître le type de sol, et déterminer ses paramètres physiques (poids spécifique, teneur en eau, etc..), et chimiques éventuellement (teneurs en carbonate et en matière organique); la qualité de reconnaissance du sol est très importante. Déterminer aussi les caractéristiques mécaniques du sol à partir d'essais de résistance (au cisaillement en l'occurrence) pour déterminer sa contrainte admissible.
- Dimensionner les éléments de fondation d'un ouvrage, et faire éventuellement l'étude de stabilité d'ouvrages annexes tels que les soutènements, talus, etc.. Dans cette dernière étape, on recommande en pratique de ne pas utiliser des modèles de comportement sophistiqués. En effet le comportement des sols est très complexe, il ne sera approché que grossièrement.
- Procéder à la comparaison des résultats de calcul avec des résultats expérimentaux (obtenus à partir de mesures en place), en vue de valider les hypothèses avancées lors des calculs réalisés.



CHAPITRE 1

LES SOLS : PROPRIETES PHYSIQUES ET IDENTIFICATION

- 1.1 Introduction
- 1.2 Constitution et différents types de sols
- 1.3 Paramètres physiques des sols
- 1.4 Identification et classification des sols
- 1.5 Applications

1.1 Introduction

Les sols sont en général le résultat de désagréments mécaniques ou chimiques des roches.

Un sol est un mélange d'éléments solides appelés grains ou particules (squelette du sol), d'eau (libre ou liée aux particules), et d'air (ou gaz) :

$$\text{Sol} = \text{squelette solide (grains minéraux)} + \underbrace{\text{eau} + \text{gaz}}_{\text{pores}}$$

Entre les grains d'un sol, il existe des vides qui peuvent être remplis par de l'eau, par un gaz, ou par les deux à la fois. En conséquence, physiquement un sol n'est pas un milieu continu homogène.

Certains sols dits organiques, contiennent (en plus des trois phases classiques) des débris soient animaux, soient végétaux en quantités variables.

C'est un milieu poreux hétérogène.

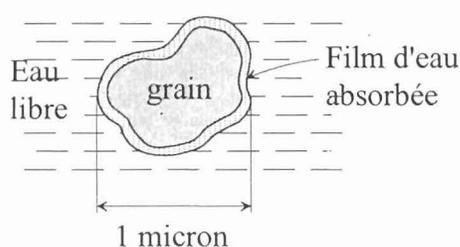
1.2 Constitution et différents types de sols

1.2.1 Constitution des sols

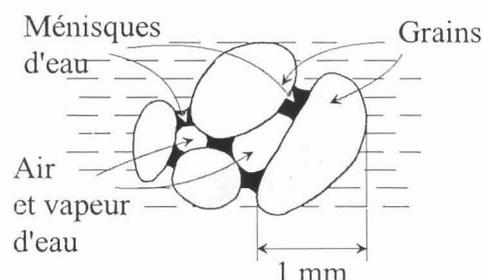
Squelette d'un sol : C'est l'ensemble des constituants solides d'origine minérale de formes et de grosseurs (dimensions) variées : les grains (ou particules), les graviers, etc...

Eau: On en distingue deux types:

- l'eau libre qui peut circuler entre les particules, elle s'évapore à une température égale à 100° Celsius (figure 1);



(a) Particule d'un sol fin



(b) Sol grenu humide non saturé

Figure 1. Types d'eau dans les sols, Schlosser (1983)

- l'eau adsorbée qui constitue un film d'eau autour de chaque grain (figure 1a). Ses propriétés physiques sont différentes de celles de l'eau libre; par exemple elle ne s'évapore qu'à des températures élevées (supérieures à 200° Celsius).

Gaz : Le gaz contenu dans les vides entre les particules d'un sol est de l'air si le sol est sec, ou un mélange d'air et de vapeur d'eau si le sol est humide. Le sol est dit saturé si tous les vides sont remplis d'eau.

1.2.2 Types de sols

d'après la classification des sols en vigueur, on distingue :

Sols grenus: Ils sont constitués généralement par des grains de dimension supérieure à 20 microns, tels que les sables et graviers.

Sols fins: Ils sont constitués par des particules de dimension inférieure à 20 microns, telles que argiles, et limons.

Physiquement la distinction entre les sols fins et les sols grenus est faite à partir de la granulométrie : dimensions des grains qui les constituent.

La distinction entre les sols grenus et fins est schématique. En pratique, la majorité des sols ont une granulométrie intermédiaire à celles définissant les sols fins et les sols grenus.

Sols organiques: Ils sont constitués de débris végétaux ou animaux, en plus des trois phases classiques rencontrées dans les sols. Comme exemple : la vase de Tunis est un sol organique contenant des coquillages (débris animaux) ; la tourbe est un sol organique contenant des débris végétaux (France).

1.3 Les paramètres physiques des sols

On schématise un échantillon de sol comme l'indique la figure 2.

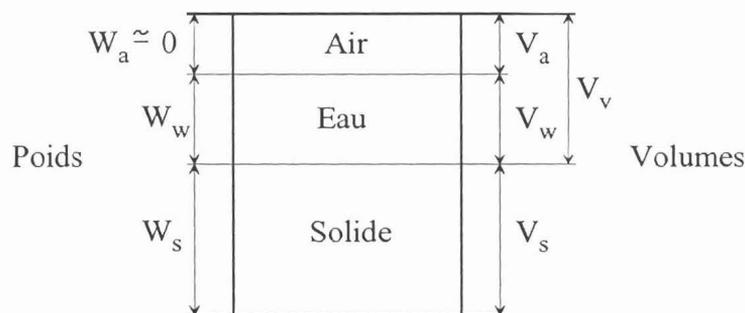


Figure 2. Schématisation d'un échantillon de sol

Pour un échantillon de sol, on définit les grandeurs suivantes:

W_s : poids des grains solides	V_s : volume des grains solides
W_w : poids de l'eau	V_w : volume d'eau
W : poids total	V_a : volume d'air
	V_v : volume des vides
	V : volume total

On écrit facilement les relations suivantes:

$$\begin{aligned} W &= W_s + W_w \\ V &= V_s + V_v \\ V_v &= V_a + V_w \end{aligned}$$

A partir des grandeurs précédentes, on définit pour l'échantillon considéré :

le poids volumique total du sol :

$$\gamma = \frac{W}{V}$$

le poids volumique des grains solides :

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s}$$

le poids volumique du sol sec :

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V}$$

le poids volumique de l'eau :

$$\gamma_w = \frac{W_w}{V_w} ; (\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3)$$

le poids volumique du sol déjaugé :

$$\gamma' = \gamma - \gamma_w$$

Le poids volumique déjaugé n'est défini que lorsque le sol est saturé d'eau; c'est le poids volumique du sol immergé en tenant compte de la poussée d'Archimède sur les grains.

On définit aussi d'autres paramètres sans dimension qui indiquent l'état dans lequel se trouve un sol ; il s'agit de :

la teneur en eau : c'est le rapport entre le poids de l'eau et le poids des grains solides d'un volume de sol donné; il est exprimé en pourcentage :

$$\omega = \frac{W_w}{W_s}$$

l'indice des vides : c'est le rapport entre le volume des vides et le volume des grains solides pour un échantillon de sol donné :

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

cet indice renseigne sur la proportion des vides par rapport à celle des grains solides dans un sol ;

la porosité : c'est le rapport entre le volume des vides et le volume total d'un échantillon de sol donné :

$$n = \frac{V_v}{V}$$

sa signification est similaire à celle de l'indice des vides ;

le degré de saturation : c'est le rapport entre le volume d'eau et le volume des vides; il est exprimé en pourcentage :

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

Ce degré indique dans quelle proportion les vides sont remplis d'eau ;

la gravité spécifique : c'est le rapport entre le poids volumique des grains solides et le poids volumique de l'eau :

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w}$$

Remarque :

L'étude des propriétés physiques des sols devrait inclure en particulier l'analyse de structure des sols. Ce point est fondamental pour étudier surtout le comportement des sols fins dont la structure est complexe ; il sera développé en détail dans le chapitre suivant.

1.4 Identification et classification des sols

Les essais d'identification, indépendamment de la nature des sols, sont relatifs à la détermination :

- des paramètres d'identification à savoir le poids volumique des grains solides γ_s , l'indice des vides e et la teneur en eau ω . Pour réaliser ces essais on peut consulter les modes opératoires du LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) {5} ;
- de la composition granulométrique des sols pour laquelle on donne ici un bref aperçu. On décrira ensuite les essais relatifs aux sols grenus d'une part, et les essais relatifs aux sols fins d'autre part.

Deux grandes classes de sols sont considérées :

- les sols pulvérulents constitués par des grains non solidaires ;
- les sols fins constitués d'éléments fins présentant entre eux des liaisons.

1.4.1 Essais granulométriques

Ils consistent à classer les sols suivant la taille de leurs éléments constitutifs. Deux types d'essais sont réalisés: par tamisage et par sédimentométrie.

* Essai granulométrique par tamisage : Il est réalisé sur les sols pulvérulents dont la plus petite dimension est de 0,1 mm environ. L'échantillon de sol de poids W est versé sur une série de tamis (figure 3a) qu'on fait vibrer à l'aide d'un vibrotamis; à la fin de l'essai toute quantité passant par un tamis s'appelle « tamisât », toute quantité retenue sur ce tamis s'appelle « refus ».

Pour les graviers, dont la granulométrie est supérieure à 2 mm, on utilise les passoirs (fonds à mailles circulaires) pour l'analyse granulométrique par tamisage.

** Essai granulométrique par sédimentométrie : Il est réalisé sur les sols fins (argiles) dont la plus grande dimension des grains est égale à 0,1 mm. Cet essai est basé sur la mesure de la vitesse de décantation des particules du sol qui sont supposées sphériques.

Courbe granulométrique : d'un sol: Elle est établie en portant sur un papier semi-logarithmique :

- en abscisses, le logarithme de la dimension de la maille des tamis;
- en ordonnées le pourcentage en poids des éléments plus fins (tamisats cumulés) pour chaque maille.

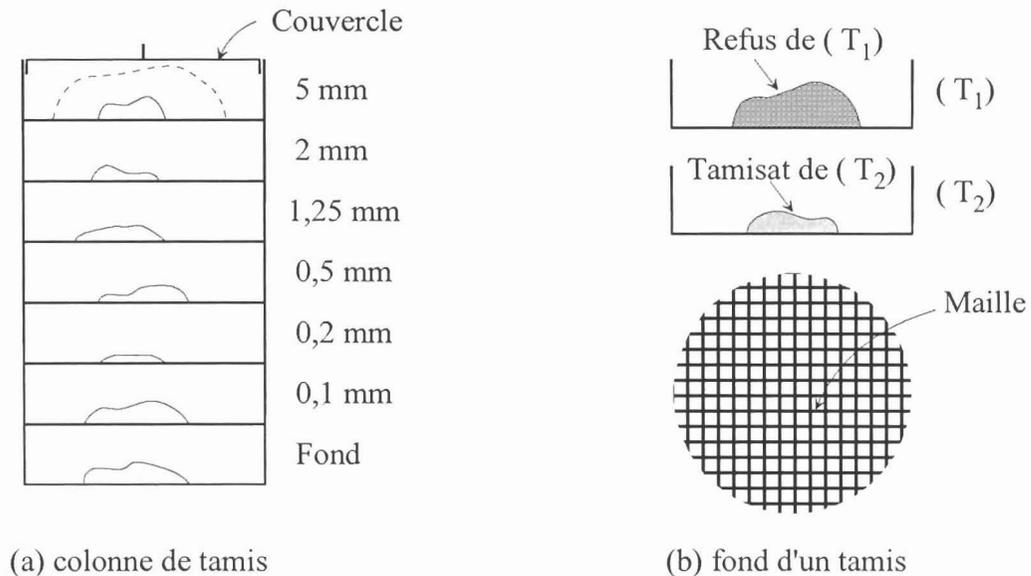


Figure 3. Essai granulométrique par tamisage

A partir de la position de la courbe, on peut attribuer au sol considéré une nomenclature de la façon suivante (figure 4) :

- * toute catégorie de sol dont la quantité est inférieure à 5% est négligée, le sol représenté par la courbe (1) est du gravier pur (ou gravier) ;
- * toute catégorie de sol dont la quantité est comprise entre 5 et 12% est citée en la précédant par le mot "légèrement" suivi par l'adjectif approprié à la catégorie du sol en question, le sol représenté par la courbe (2) est un sable légèrement limoneux;
- * Toute catégorie de sol dont la quantité est comprise entre 12 et 30-40% est citée comme dans le cas précédent en éliminant le mot légèrement, le sol représenté par la courbe (3) est un limon argileux sableux ;
- * toute catégorie de sol dont la quantité est supérieure à 40% est citée par son nom; le sol représenté par la courbe (4) est un gravier et sable.

On définit à partir d'une courbe granulométrique le coefficient d'uniformité donné par le rapport :

$$c_u = \frac{d_{60}}{d_{10}}$$

où :

d_{60} est la côte du tamis à travers lequel est passé 60% de tamisât;

d_{10} est la côte du tamis à travers lequel est passé 10% de tamisât;

si : $1 < c_u < 2$, le sol est uniforme;

si : $c_u \geq 2$, le sol est bien gradué ou à granulométrie étalée.

1.4.2 Essais sur sols pulvérulents

Densité relative : D_r (ou indice de densité: I_d)

Expérience 1 :

On fait tomber le sable dans un récipient d'une façon très étendue et relâchée (figure 5a), dans cet état le sable est lâche et son foisonnement est maximum, donc son indice des vides est maximum: soit e_{\max} .

Expérience 2 :

On continue l'expérience 1 en faisant vibrer le récipient, les grains du sable vont se réarranger en occupant le maximum de vides existant entre eux (figure 5b), donc l'indice des vides est minimum: soit e_{\min} .



Figure 5. Essai de densité relative

Ces deux expériences correspondent aux états de foisonnement extrêmes dans lesquels le sol peut se trouver. A l'état naturel on détermine l'indice des vides correspondant soit e ; on définit la densité relative par :

$$D_r = \frac{(e_{\max} - e)}{(e_{\max} - e_{\min})} \times 100 (\%)$$

- si $e = e_{\min}$, alors $D_r = 1$: le sol est très bien compacté;

- si $e = e_{\max}$, alors $D_r = 0$: le sol est très relâché.

N.B. Le calcul pratique de D_r s'effectue à partir de son expression, en fonction de : γ_d ,

γ_d^{\min} , γ_d^{\max} que l'on établit aisément.

Cas pratique : Barrage Sidi El Barrak.

Equivalent de sable : ES

C'est un essai qui renseigne sur la quantité de sol fin ou fines qui existe dans un sable. Il détermine la propreté ou le degré de pollution du sable. L'essai est réalisé sur les sols dont la dimension des éléments est inférieure à 5 mm.

Principe: On introduit dans une éprouvette une quantité de sol bien déterminée à laquelle on ajoute un flocculant qui a la propriété de rassembler les fines (éléments dont la dimension est inférieure à 2 microns). L'éprouvette est agitée énergiquement selon un procédé déterminé pour que les fines se détachent des grains solides et puissent entrer en suspension. On laisse les grains se décanter dans l'éprouvette pendant un temps donné et on mesure (figure 6):

H_1 : La hauteur de sable propre déposé au fond du tube,

H_2 : La hauteur à laquelle sont situés les éléments fins en suspension.

L'équivalent de sable, exprimé en pourcentage, est défini par:

$$ES = \frac{H_1}{H_2}$$

Suivant les valeurs de ES on distingue les cas suivants:

- ES = 100% : sable parfaitement propre
- ES = 70 - 80% : sable propre utilisable pour la construction
- ES = 20% : sable contenant beaucoup de fines
- ES = 0% : argile pure, l'essai ne devrait pas être fait

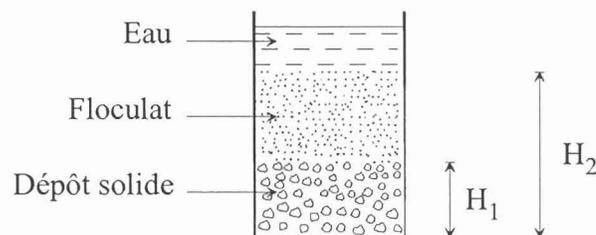


Figure 6. Essai d'équivalent de sable

1.4.3 Essais sur sols fins

Le comportement d'un sol fin dépend énormément de sa teneur en eau. La consistance (ou le degré de maniabilité) du sol varie dans des limites très larges avec:

- la quantité d'eau interstitielle contenue dans ses pores;
- l'épaisseur des couches d'eau adsorbée.

Pour classer les sols fins, Atterberg a défini arbitrairement, en fonction de la teneur en eau, des limites qui marquent la transition d'un état donné du sol à un autre. Il s'agit des limites de retrait, de plasticité, et de liquidité.

Limite de retrait (LR) : Elle marque le passage du sol de l'état solide sans retrait à l'état solide avec retrait. Elle est déterminée sur un échantillon de sol fin auquel on ajoute de l'eau (jusqu'à l'obtention d'une pâte de consistance moyenne), en évaluant la variation de volume relative de l'échantillon avant et après séchage.

Limite de plasticité (LP): Elle marque le passage du sol de l'état solide avec retrait à l'état plastique. Elle est déterminée en ajoutant de l'eau au sol en le rendant sous forme d'une pâte plus facile à modeler. On forme manuellement des boudins (ou rouleaux) de longueur variant entre 10 et 15 cm et de diamètre égal à 3 mm environ. La limite de plasticité du sol est atteinte lorsque l'un des deux cas suivants est réalisé:

- le boudin présente des fissures ou il se casse éventuellement;
- le boudin est cassé en le soulevant de 1 à 2 cm par son milieu.

Limite de liquidité (LL): Elle marque le passage du sol de l'état plastique à l'état liquide. Elle est déterminée en ajoutant davantage d'eau au sol de façon à obtenir une pâte homogène qu'on répartit, selon un mode opératoire donné, dans une coupelle de Casagrande. A l'aide d'un outil à rainurer on réalise une rainure dans la pâte suivant l'axe de la coupelle. Puis on soumet la coupelle à une série de chocs selon une cadence donnée, lorsque la fermeture de la rainure est réalisée sur 1 cm environ on note le nombre de coups N correspondants, et on détermine la teneur en eau sur un échantillon pris de la rainure. La limite de liquidité est la teneur en eau correspondant à 25 coups. Si le nombre de coups est compris entre 15 et 35, on peut déterminer cette limite à partir de l'expression:

$$LL = \omega \left(\frac{N}{25} \right)^{0,121}$$

Remarque : Les limites d'Atterberg sont exprimées en pourcentage.

Pour avoir une idée de l'étendue du domaine plastique, on a défini l'indice de plasticité qui est donné par :

$$I_p = LL - LP$$

On a défini aussi l'indice de consistance qui indique la teneur en eau relative par rapport aux limites de liquidité et de plasticité :

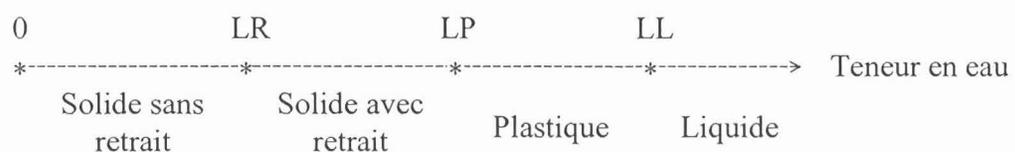
$$I_c = \frac{(LL - \omega)}{LP}$$

- pour un sol très mou, on a : $I_c = 0$;
- pour un sol très raide, on a : $I_c > 1$.

On définit de même l'indice de liquidité, par :

$$I_L = \frac{(\omega - LP)}{I_p}$$

En résumé, on donne la représentation schématique suivante des limites d'Atterberg séparant les différents états pour un sol fin :



En plus des limites d'Atterberg, on effectue les essais suivants sur les sols fins, {9} :

- l'analyse minéralogique qui renseigne sur la sensibilité à l'eau ;
- la teneur en matières organiques qui renseigne sur la compressibilité ; des argiles notamment.
- la teneur en carbonate de calcium (CaCO_3) qui renseigne sur la résistance mécanique.

1.4.4 Classification des sols

Deux classifications ont été établies en mécanique des sols:

- la classification triangulaire, établie par les agronomes, qui est déterminée à partir des pourcentages en poids de sable, de limon et d'argile dans le sol considéré ;
- la classification établie à partir de la granulométrie du sol et des limites d'Atterberg (pages 18 et 19), elle est la plus utilisée actuellement en géotechnique.

Diagramme de plasticité

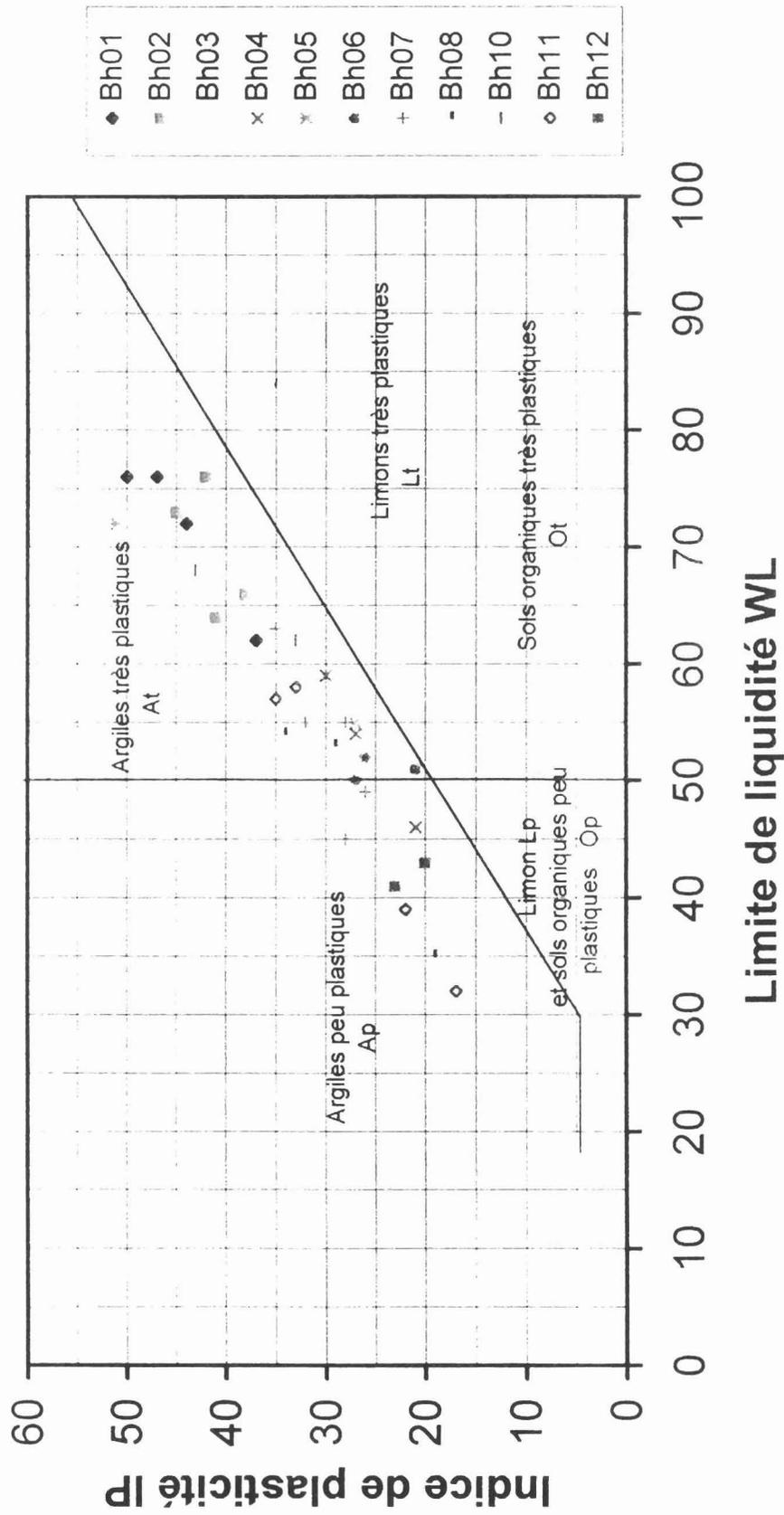
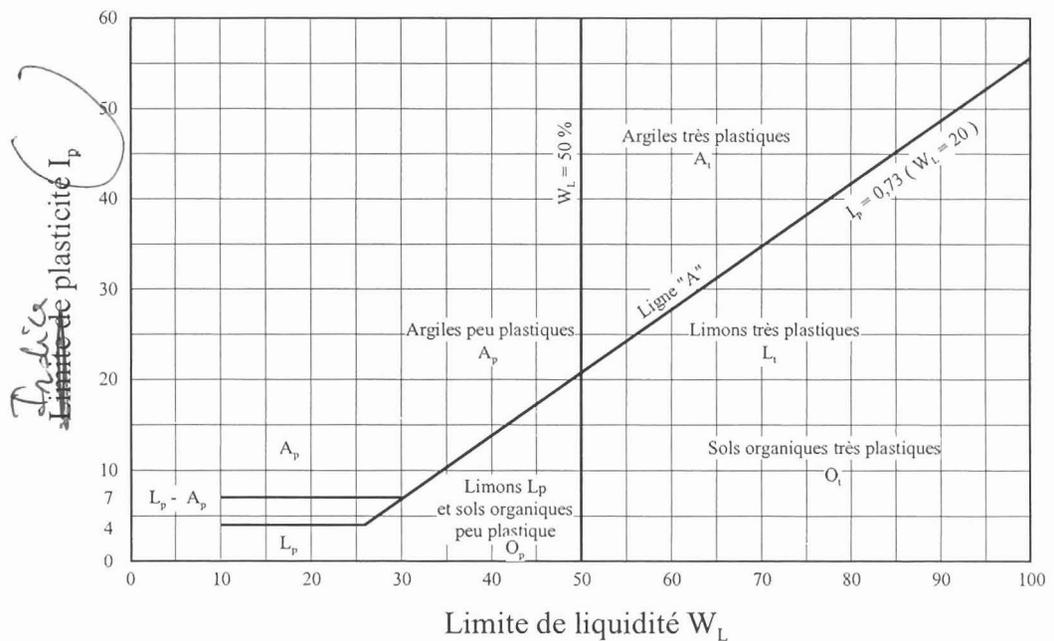


Figure 4. Diagramme de plasticité des argiles

PROCEDURE D'IDENTIFICATION SUR CHANTIER (poids des fractions estimés)			Symbole	Désignation géotechnique			
					Détermination de la plasticité sur chantier		
					Agitation	Consistance	Résistance à sec
La moitié des éléments ou davantage sont < 0,08 mm Sols fins – ARGILE et LIMON	Limite de liquidité < 50%	Rapide à lente	Nulle	Nulle	L_p (ML)	Limons peu plastiques	
		Nulle à lente	Moyenne	Moyenne à grande	A_p (OL)	Argiles peu plastiques	
		Lente	Faible	Faible à moyenne	O_p (OL)	Limons et argiles organiques peu plastiques	
	Limite de liquidité > 50%	Lente à nulle	Faible à moyenne	Faible à moyenne	L_t (MH)	Limons très plastiques	
		Nulle	Grande	Grande à très grande	A_t (CH)	Argiles très plastiques	
		Nulle à très lente	Faible à moyenne	Moyenne à grande	O_t (OH)	Limons et argiles organiques très plastiques	
Les matières Organiques prédominent		Reconnaisable à l'odeur, couleur sombre, texture fibreuse, faible densité humide			T (Pt)	Tourbes et autres sols très organiques	

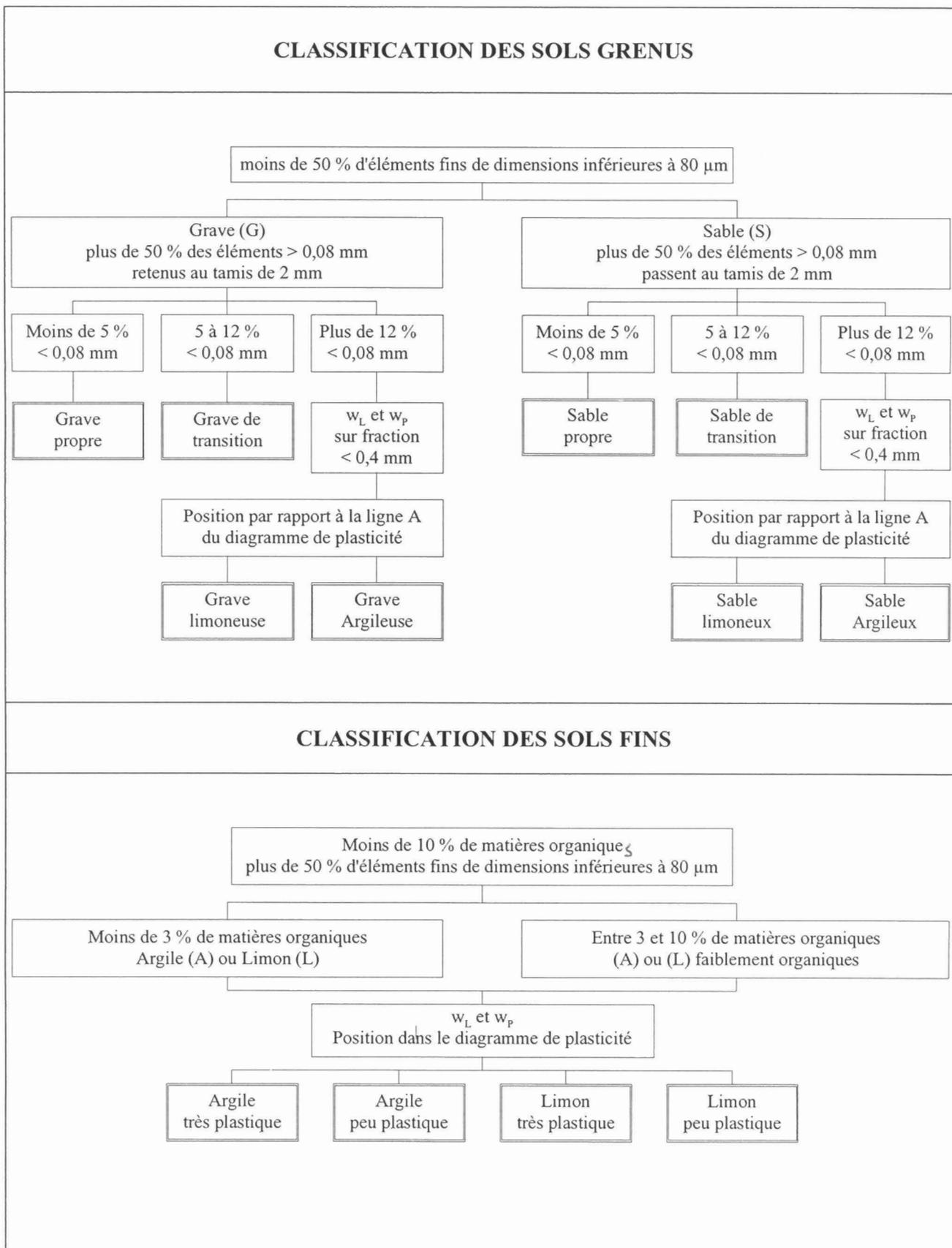
DIAGRAMME DE PLASTICITE

IDENTIFICATION AU LABORATOIRE



CLASSIFICATION DES SOLS GRENUS

SOLS GRENUS : Plus de la moitié des éléments sont > 0,08 mm							
PROCEDURE D'IDENTIFICATION SUR CHANTIER		Symbole (USCS)	DESIGNATION GEOTHECNIQUE		CLASSIFICATION DU LABORATOIRE		
Eléments > 60 mm exclus Poids des fractions estimés.							
GRAVES Plus de la moitié des éléments > 0,08 mm Ont un diamètre > 2mm	sans fines	Tous les diamètre de grains sont représentés aucun ne prédomine.	Gb (GW)	Grave propre bien graduée	mois de 5% d'éléments < 0,08 mm	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $1 < C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} < 3$	
		Une dimension de grains ou un ensemble de dimensions prédominent.	Gm (GP)	Grave propre mal graduée		Une des conditions de Gb non satisfaite	
	avec fines	Les éléments fins n'ont pas de cohésion.	GL (GM)	Grave limoneuse	plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Limite d'Atterberg au dessous de A (Voir classification des sols fins)	
		Les éléments fins sont cohérents	GA (GC)	Grave argileuse		Limite d'Atterberg au dessus de A (Voir classification des sols fins)	
	SABLES Plus de la moitié des éléments > 0,08 mm Ont un diamètre < 2mm	sans fines	Tous les diamètre de grains sont représentés aucun ne prédomine	Sb (SW)	Sable propre bien gradué	mois de 5% d'éléments < 0,08 mm	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ $1 < C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} < 3$
			Une dimension de grains ou un ensemble de dimensions prédominent	Sm (SP)	Sable propre mal gradué		Une des conditions de Gb non satisfaite
avec fines		Les éléments fins n'ont pas de cohésion	SL (SM)	Sable limoneux	plus de 12 % d'éléments < 0,08 mm	Limite d'Atterberg au dessous de A (Voir classification des sols fins)	
		Les éléments fins sont cohérents	SA (SC)	Sable argileux		Limite d'Atterberg au dessus de A (Voir classification des sols fins)	



1.5 Applications

1.5.1 Etablir les relations suivantes :

$$1) n = \frac{e}{1 + e}$$

$$2) \gamma = \gamma_s \frac{1 + \omega}{1 + e}$$

$$3) S_r = \omega \frac{G_s}{e}$$

$$4) \gamma_d = \gamma_w \cdot G_s \cdot (1 - n) \text{ et } \gamma = \gamma_d \cdot (1 + \omega)$$

$$5) \gamma' = \gamma_d \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s}$$

Réponses

$$1) n = \frac{V_v}{V} = \frac{V_v}{V_s + V_v}$$

en divisant les deux termes du rapport par V_s on obtient :

$$n = \frac{e}{1 + e} \quad (1a)$$

ou encore :

$$e = \frac{n}{1 - n} \quad (1b)$$

$$2) \gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V_s + V_v} = \frac{(W_s/V_s) \cdot (1 + W_w/W_s)}{1 + V_v/V_s}, \text{ d'où}$$

$$\gamma = \gamma_s \frac{1 + \omega}{1 + e} \quad (2)$$

$$3) S_r = \frac{V_w}{V_v} S_r$$

En multipliant les deux termes du rapport par $(\gamma_w \cdot \gamma_s \cdot V_s)$, on obtient:

$$S_r = \frac{W_w \cdot G_s}{W_s \cdot e}$$

$$S_r = \frac{\omega \cdot G_s}{e} \quad (3)$$

Si le sol est saturé, donc $S_r = 1$, on aura : $e \cdot \gamma_w = \omega \cdot \gamma_s$.

$$d) \gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{\gamma_s \cdot V_s}{V_s + V_v}, \text{ d'où}$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma_s}{1 + e} \quad (4a)$$

mais on a aussi: $\gamma_s = \gamma_w \cdot G_s$, et d'après (1b) on obtient :

$$\gamma_d = \gamma_w \cdot G_s \cdot (1 - n) \quad (4b)$$

on déduit finalement d'après (2) et (4a) que:

$$\gamma = \gamma_d \cdot (1 + \omega) \quad (4c)$$

$$5) \gamma' = \gamma - \gamma_w, \text{ d'après (4c) on écrit: } \gamma' = \gamma_d \cdot \left(1 + \omega - \frac{\gamma_w}{\gamma_d}\right);$$

puis en substituant γ_d par (4a) on a :

$$\gamma' = \gamma_d \cdot \left(1 + \omega - \gamma_w \frac{1 + e}{\gamma_s}\right); \text{ comme le sol est saturé on a alors:}$$

$$e \cdot \gamma_w = \omega \cdot \gamma_s, \text{ on obtient:}$$

$$\gamma' = \gamma_d \frac{\gamma_s - \gamma_w}{\gamma_s} \quad (5)$$

1.5.2 :

Une argile saturée a un poids volumique $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$, et un poids volumique des grains solides $\gamma_s = 27 \text{ kN/m}^3$. Déterminer:

$$\gamma', \gamma_d, \omega, e \text{ et } n, \text{ sachant que } \gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3.$$

Réponses: $\gamma' = 10 \text{ kN/m}^3$; $\gamma_d = 15,9 \text{ kN/m}^3$; $\omega = 25,9\%$, $e = 0,7$, $n = 0,412$.

1.5.3 :

Un échantillon de sol a un poids volumique total de 22 kN/m^3 , et une teneur en eau de 14%. Sachant que la gravité spécifique est de 2,65, calculer le poids volumique du sol sec, l'indice des vides et le degré de saturation.

Réponses : $\gamma_d = 19,3 \text{ kN/m}^3$; $e = 0,373$, $S_r = 0,998$; (le sol est saturé).