

ETUDE GEOTECHNIQUE

Hafid SOUNNY / DAH

www.GenieCivilPDF.com

PLAN

- ◆ INTRODUCTION
- ◆ ETUDE DES FONDATIONS
- ◆ ESSAIS SUR LES FONDATIONS
- ◆ MATERIAUX DE CONSTRUCTION
 - Matériaux fins
 - Matériaux grossiers

INTRODUCTION

L'étude géologique ne permet pas de définir les caractéristiques et les comportements mécaniques et hydrodynamiques des sols

→ La Géotechnique ou Mécanique des sols

Aptitude des sols à fournir les matériaux nécessaires à la construction d'une digue ou à constituer des fondations suffisamment stables et imperméables.

INTRODUCTION

L'étude géotechnique des barrages intervient dans :

∅ **Le comportement de la fondation:**

Suite aux nouvelles contraintes:

- ✓ poids du barrage
- ✓ poussées hydrauliques.

∅ **La recherche des matériaux de construction**

- ✓ Meuble : terrasses (fins), ballastières(alluvions).
- ✓ Rocheux : carrières, éboulis de pentes

ETUDE DES FONDATIONS

Du point de vue mécanique : les études permettent de :

- s'assurer que : contraintes dues au poids du barrage et aux poussées hydrauliques ne dépassent pas la résistance au cisaillement des terrains de fondation
- prévoir les tassements des fondations meubles sous la charge du barrage
- choisir le rythme de construction pour que les pressions interstitielles ne dépassent pas les limites admissibles, dans le cas des fondations mal drainées

ETUDE DES FONDATIONS

Du point de vue hydraulique : l'étude géologique et géotechnique permettra de :

- déterminer la perméabilité des couches de fondation
- prévoir les mesures à envisager pour assurer une étanchéité suffisante des fondations dans la partie amont de l'ouvrage et leur drainage dans la partie aval

ETUDE DES FONDATIONS

On distingue :

- Fondations meubles (terrains de couverture meubles)
- Fondations rocheuses

ETUDE DES FONDATIONS

Fondations meubles :

Les barrages fondés sur les alluvions sont en général, des barrages souples en terre ou en enrochement

Les fondations alluvionnaires se présentent en général sous forme :

- Perméable sableux-graveleuse plus ou moins homogène jusqu'au substratum: bonne résistance mécanique mais perméables (précautions spéciales pour éviter les fuites)

ETUDE DES FONDATIONS

Fondations meubles (suite):

- couche limono-argileuse plus ou moins imperméable : étanchéité suffisante (! à vérifier la résistance et à calculer les tassements sous le poids du barrage)
- alternances de strates perméables et imperméables : importantes sous pressions et entraînement de fuites si les passages sableuses sont en communication avec la retenue (mise en place de dispositifs spéciaux)
- Vase ou tourbe à dégager ou à exclure le site si quantités importantes

ETUDE DES FONDATIONS

Fondations rocheuses :

➤ Dans le cas de construction de barrages souples, il n'est pas nécessaire de se livrer à des études géotechnique approfondies. Il reste néanmoins, le soucis de délimitation des couches trop altérées à enlever.

➤ les études de fondation pour les barrages en béton doivent être bcp plus poussées :

- plus de sollicitations
- précision dans l'implantation de l'axe pour avoir la position la plus judicieuse du voile d'injection

ETUDE DES FONDATIONS

Fondations rocheuses (suite) :

➤ les points les plus essentiels à étudier : la fracturation : fissures, joints de stratification ou schistosité, zones broyées accompagnant les failles peuvent :

- former des surfaces de glissement préférentielles suivant leur positions dans les appuis et en fondation, notamment s'il sont garnis de matériaux argileux provenant de l'altération de la roche
- Constituer des cheminements préférentiels d'eau



ESSAIS COURAMMENT UTILISES POUR LES FONDATIONS

Essais géotechniques

- ◆ Objectif : Connaissance des caractéristiques physiques et du comportement mécanique des matériaux constituant la fondation de l'ouvrage et des matériaux de construction
- ◆ Mode opératoire : (matériel spécifique, procédures normalisées)
- ◆ Norme AFNOR 1995, norme expérimentale XP P 94.202 – Sols :reconnaisances et essais – prélèvements des sols et des roches ; méthodologie et procédures

FONDATIONS MEUBLES

Identification

On identifie les sols par:

- ✓ L'Analyse granulométrique;
- ✓ Les Limites d'Aterberg;
- ✓ Les Densités.

Ces essais permettent de:

- ✓ Classer les sols;
- ✓ Déterminer leurs plasticités;
- ✓ Apprécier la résistance et la compressibilité

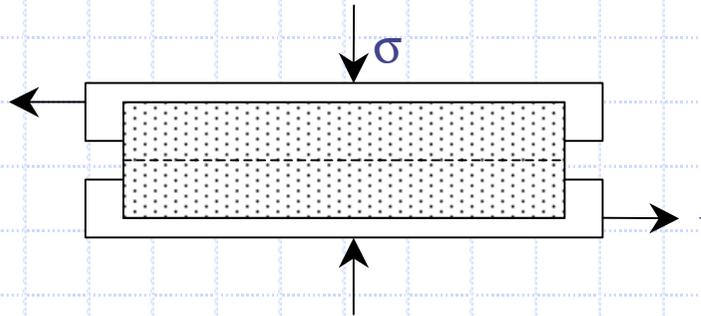
FONDATIONS MEUBLES

Cohésion et frottement

- Paramètres très utiles dans les calculs de stabilité des barrages;
- Obtenus par **l'essai de cisaillement à la boîte**, et **l'essai Triaxial**

l'essai de cisaillement à la boîte

Consiste à cisailer un échantillon soumis à une contrainte normale :

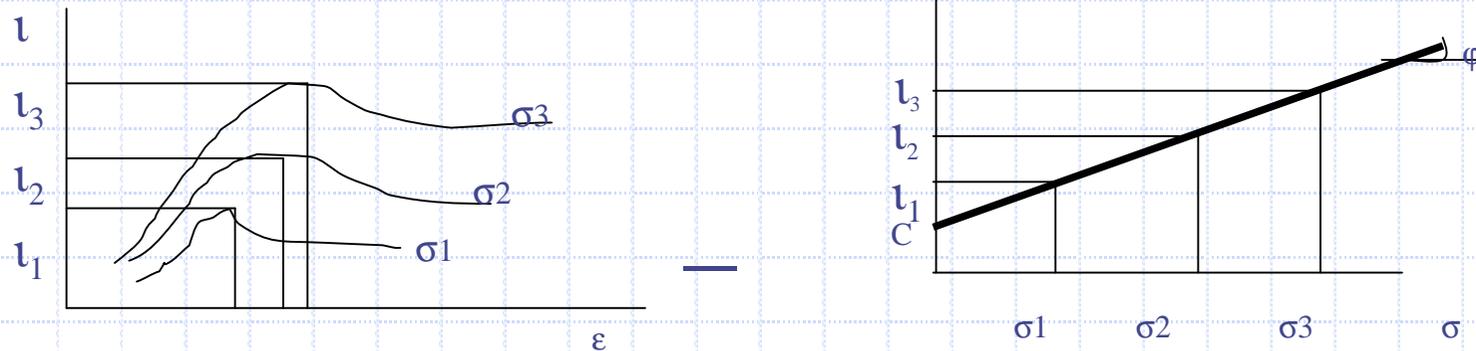


FONDATEIONS MEUBLES

l'essai de cisaillement à la boite

τ et σ sont liées par :

$$\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi \quad (\text{loi de Coulomb})$$



FONDATIONS MEUBLES

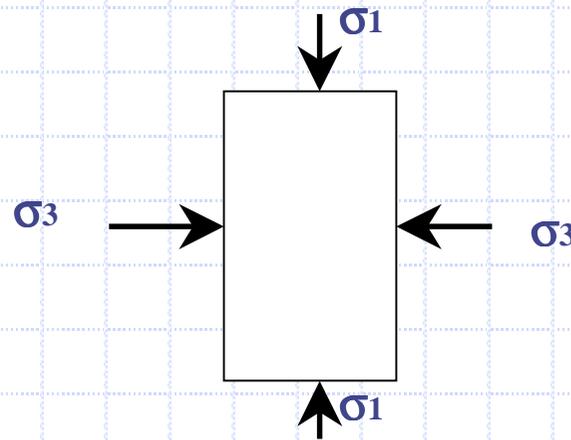
L'essai triaxial



FONDITIONS MEUBLES

L'essai triaxial

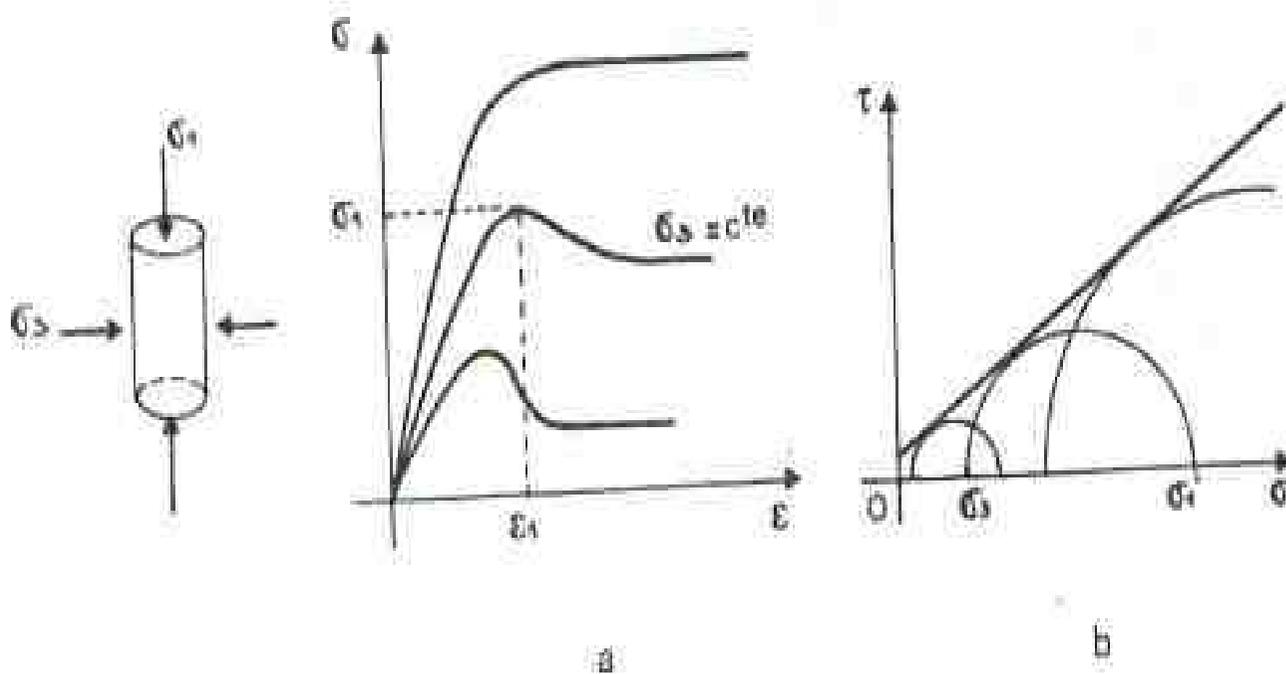
un échantillon cylindrique est soumis à la fois à une étreinte radiale (contrainte latérale) et une pression verticale :



FONDATIONS MEUBLES

L'essai triaxial

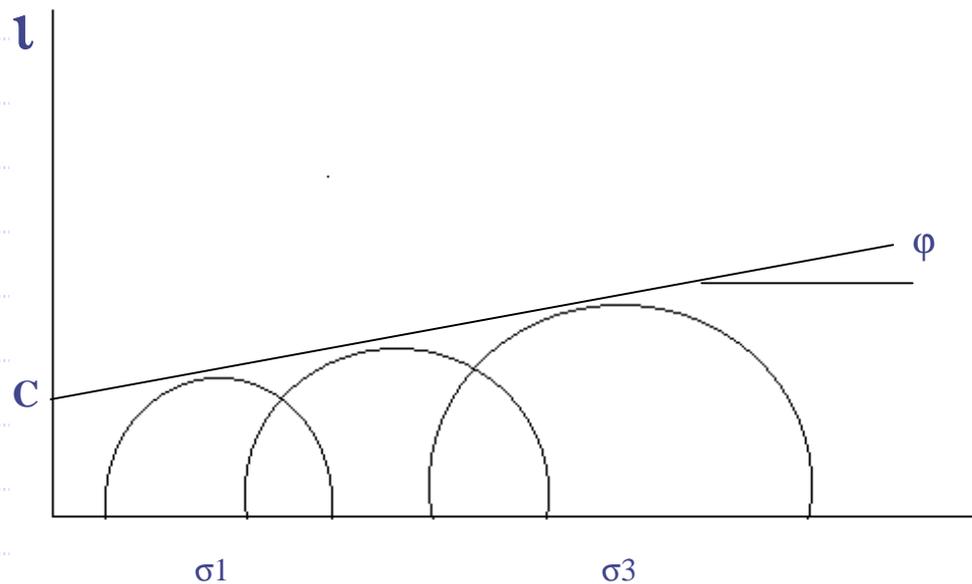
Pour 3 échantillons on obtient 3 cercles. :



FONDATIONS MEUBLES

L'essai triaxial

Pour 3 échantillons on obtient 3 cercles. :



FONDATIONS MEUBLES

L'essai triaxial

Parmi les avantages importants de l'essai triaxial,

- la détermination correcte des propriétés mécaniques du matériau
- la possibilité de reconsolidation des matériau avant l'essai, ce qui permet de mieux s'approcher des conditions réelles in situ (pour les matériaux de la fondation)
- La possibilité d'étudier les différents cas de chargement possibles pour les matériaux utilisés dans les remblai.

FONDATIONS MEUBLES

L'essai triaxial

Suivant les conditions de drainage on obtient:

- Les paramètres UU (calculs à court terme);
- Les paramètres CU (vidange rapide);
- Les paramètres CD (calculs à long terme)

FONDATIONS MEUBLES

Cohésion et frottement

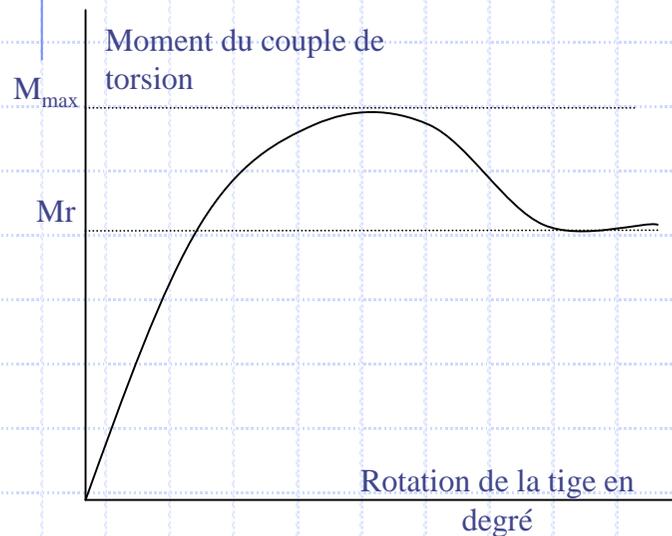
Pour les ordres de grandeur

	C' (KPa)	ϕ' (°)	Cu
Sables	0	30 à 40	-
Marnes	20	18	150
argiles	19	20	120
Limons	0	39	50

FONDATIONS MEUBLES

l'essai au scissomètre

Consiste à cisailer un sol le long d'une surface cylindrique par 4 lames soudées en croix



A partir de cette courbe on obtient :

♦ Cohésion non drainée du sol (C_u) par

$$C_u = M_{max} / C_{st}$$

♦ Cohésion résiduelle du sol (C_r) par

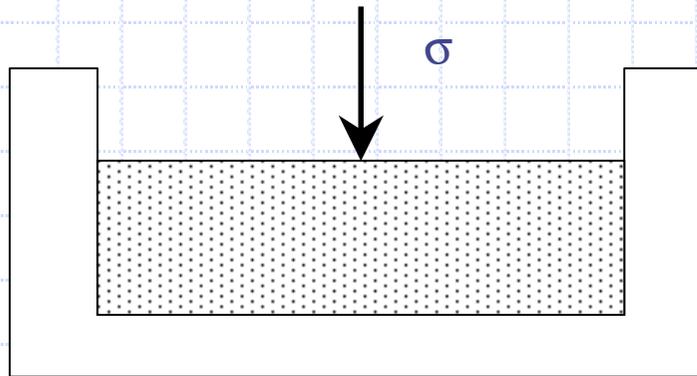
$$C_r = M_r / C_{st}$$

Où C_{st} est une constante qui dépend de l'appareil

FONDITIONS MEUBLES

CONSOLIDATION, TASSEMENT ET PERMEABILITE

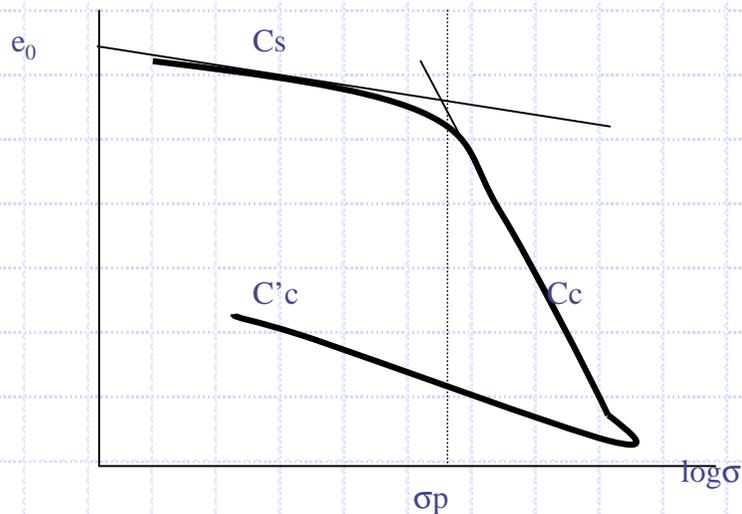
Paramètres obtenus par l'essai à l'oedomètre qui consiste à écraser un échantillon maintenu latéralement par une paroi rigide.



FONDATIONS MEUBLES

l'essai à l'oedomètre

Paramètres obtenus par l'essai à l'oedomètre qui consiste à écraser un échantillon maintenu latéralement par une paroi rigide.



A partir de cette courbe on obtient :

- ◆ Indice de compression (C_c) qui est la pente de la droite inclinée ;
- ◆ Indice de décompression (C'_c) qui est la pente de la droite de décompression ;
- ◆ Pression de préconsolidation (σ_p) qui est la plus grande pression effective à laquelle a été soumis l'échantillon au cours de son histoire ;
- ◆ Coefficient de perméabilité $K = f(C_c, \sigma, e)$ elle dépend ainsi de la charge appliquée ;
- ◆ Indice de vide initial (e_0).
- ◆ Tassement $s = f(e_0, C_c, \sigma, \sigma_p)$

FONDATIONS MEUBLES

l'essai à l'oedomètre

Pour les ordres de grandeur:

	σ_p (KPa)	C_c
Sables	-	-
vase	44	1.2
argiles	85	0.05
Limons	60	0.1

FONDITIONS MEUBLES

Résistance à la compression

Consiste à un écrasement sous charge axiale d'un échantillon.

consistance	Rc (bars)	Identification in situ
Très molles	< 0.25	On peut enfoncer le poing sur plusieurs centimètres
moles	0.25 à 0.5	On peut enfoncer le pouce sur plusieurs centimètres
Moyennement raide	0.5 à 1	On peut enfoncer avec effort le pouce sur plusieurs centimètres
Relativement raide	1 à 2	Pénétration du pouce avec grand effort
Très raide	2 à 4	Facile à rayer avec l'angle
Dure	4 à 8	Difficile à rayer avec l'angle
très dures	>8	

FONDATIONS MEUBLES

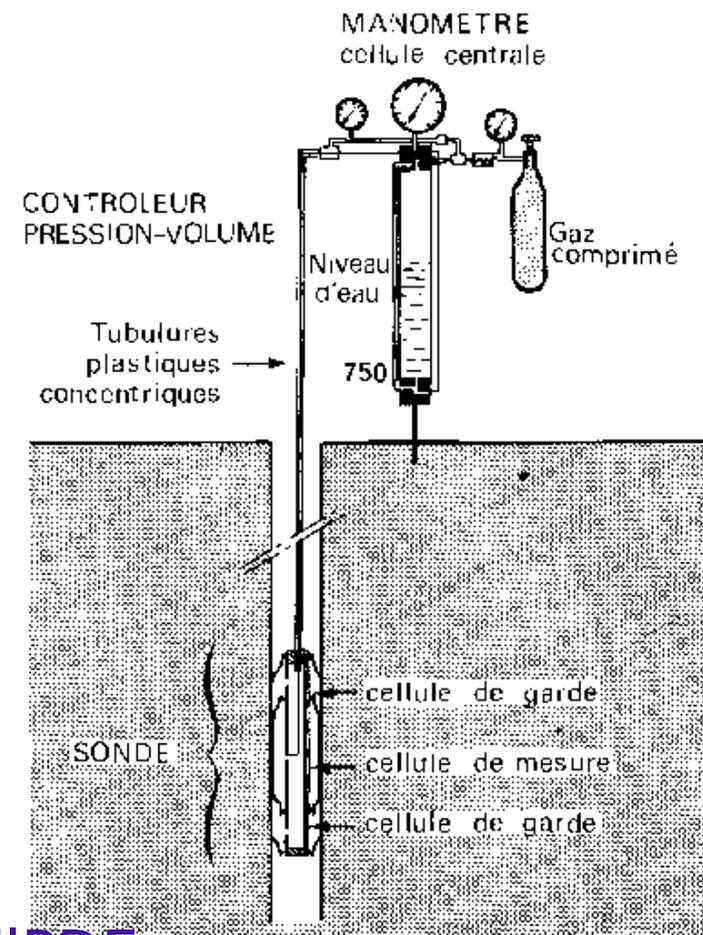
Le module de déformation

Essai préssiométrique :

Essai in situ qui consiste à une expansion d'une sonde cylindrique dans un sol.

↘ courbe :

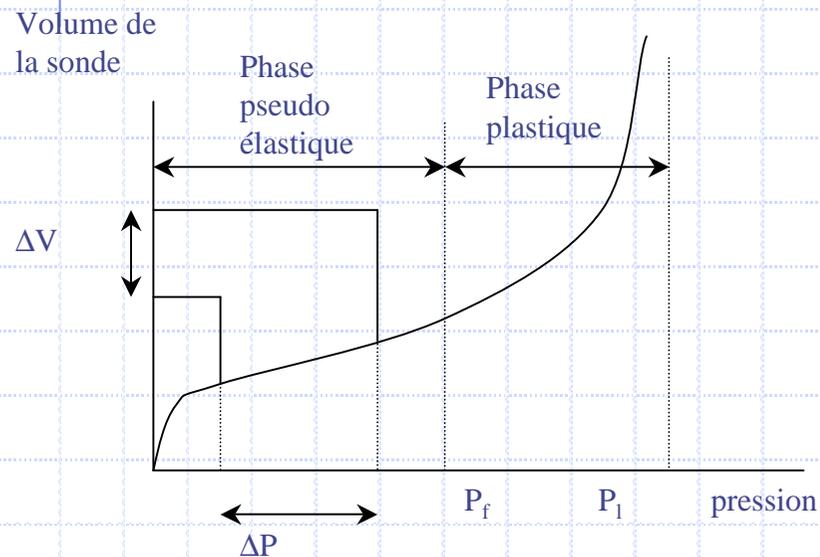
volume de la sonde - pression



FONDATIONS MEUBLES

Le module de déformation

Obtenu par l'essai préssiométrique essai in situ qui consiste à une expansion d'une sonde cylindrique dans un sol, on trace la courbe volume de la sonde- pression .



A partir de cette courbe on obtient :

- ◆ Module pressiométrique (E_p) obtenu à partir de la Phase pseudo élastique par $E_p = Cst * \Delta P / \Delta V$;
- ◆ Pression de fluage (P_f) qui sépare la phase pseudo élastique et la Phase plastique;
- ◆ Pression limite (P_l) lorsque les déformations deviennent grandes la pression tend vers cette pression limite

FONDATIONS MEUBLES

Le module de déformation

Pour les ordres de grandeur :

Sol	Ep (bars)	PI
Vases et tourbes	2 à 15	0.2 à 1.5
Argiles molles	5 à 30	0.5 à 3
Argiles plastiques	30 à 80	3 à 8
Argiles raides	80 à 400	6 à 20
Marnes	50 à 600	6 à 40
Sables vaseux	5 à 20	1 à 5
Limons	5 à 100	2 à 15
Sables et graviers	80 à 400	12 à 50
Sables sédimentaires	75 à 400	10 à 50
Roches calcaires	800 à 200.000	30 à plus que 1.000
Remblais récents	5 à 50	0.5 à 3
Remblais anciens	40 à 150	4 à 10

FONDATIIONS ROCHEUSES

Identification

On commence par identifier le rocher de la fondation en déterminant sa **densité** et sa **porosité** et sa composition par **analyse chimique**.

FONDATIONS ROCHEUSES

LES VITESSES DU SON

L'essai consiste à émettre une onde dans l'échantillon et mesurer les temps de parcours de l'onde de pression et cisaillement. On détermine ainsi:

- ✓ Les vitesses de pression et cisaillement (V_p et V_s);
- ✓ Le module d'élasticité dynamique;
- ✓ Le coefficient de poisson.

FONDATIONS ROCHEUSES

LES VITESSES DU SON

Pour les ordres de grandeur :

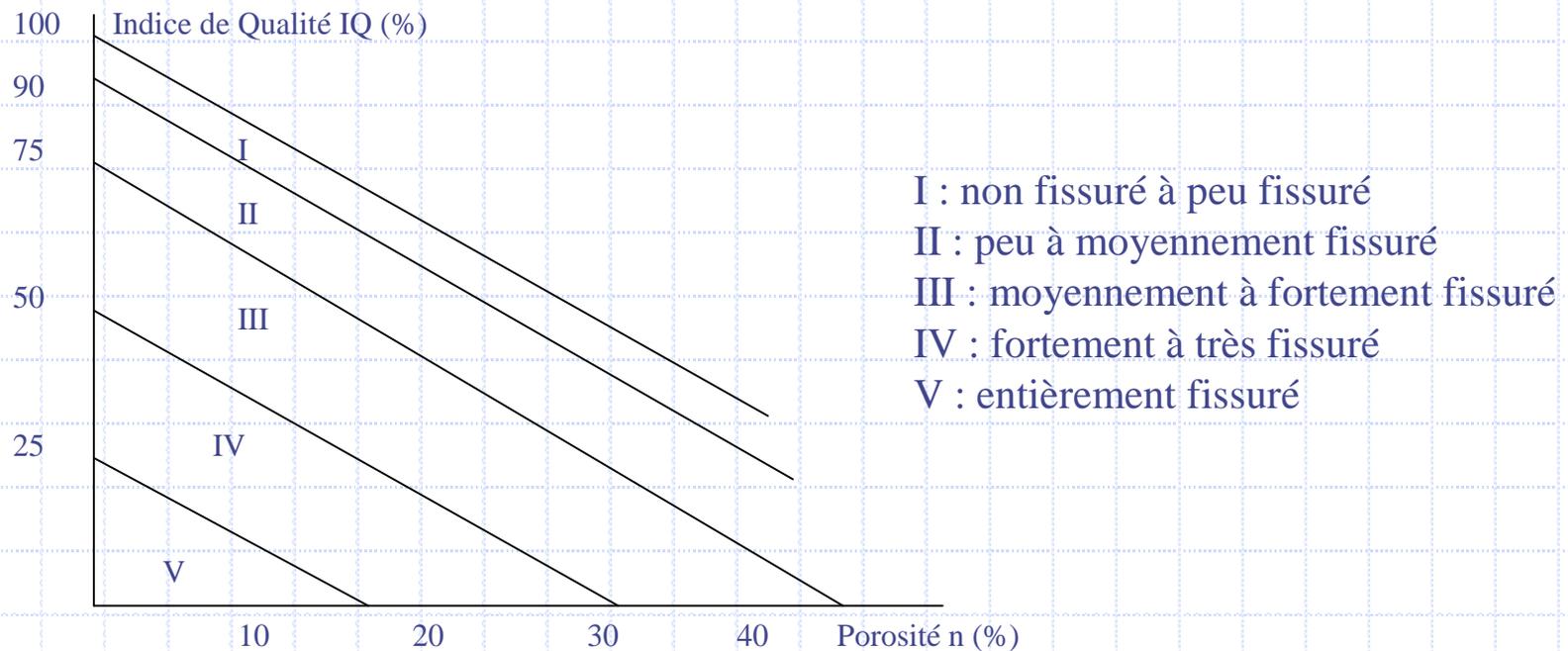
Type de roche	V*p (m/s)
Gabros	7000
Basaltes	6500 à 7000
Calcaires	6000 à 6500
Calcaires dolomitiques	6500 à 7500
Grès et quartzites	6000
Granites et roches granitiques	5500 à 6000

FONDATEIONS ROCHEUSES

LES VITESSES DU SON

On détermine aussi l'indice de la qualité de la roche par la relation:

$$IQ = (V_p/V^*p) \times 100$$



FONDATIONS ROCHEUSES

LA RESISTANCE A LA COMPRESSION

l'essai de compression simple qui consiste à un écrasement sous charge axiale d'un échantillon

Pour les ordres de grandeur :

Rc (Mpa)	Résistance
> 200	Très forte
60 à 200	Forte
20 à 60	Moyenne
6 à 20	Faible
< 6	Très faible

FONDATIONS ROCHEUSES

L'ESSAI FRANKLIN

L'essai Franklin consiste à écraser un fragment de roche entre 2 pointes coniques.

Une corrélation existe entre l'indice Franklin (I_s) et R_c :

$$R_c = 23 I_s \quad \text{pour} \quad \varnothing = 50\text{mm.}$$

$\varnothing \# 50\text{mm}$ _ Abaques

FONDATIONS ROCHEUSES

L'ESSAI FRANKLIN

Pour les ordres de grandeur :

Is (Mpa)	Résistance
> 8	Très forte
4 à 8	Forte
2 à 4	Moyenne
1 à 2	Faible
< 1	Très faible

FONDATIONS ROCHEUSES

COHESION ET FROTTEMENT

- **Obtenue sur les joints par l'essai de cisaillement à la boîte;**
- **Pour la matrice on utilise l'essai triaxial à haute pression.**

FONDATIONS ROCHEUSES

LE MODULE DE DEFORMATION

Obtenu par:

- l'essai au dilatomètre;
- l'essai au vérin.

FONDATIONS ROCHEUSES

L'essai au dilatomètre

consiste à une expansion d'une sonde cylindrique dans un forage.

Les étapes pour réaliser cet essai sont les suivantes:

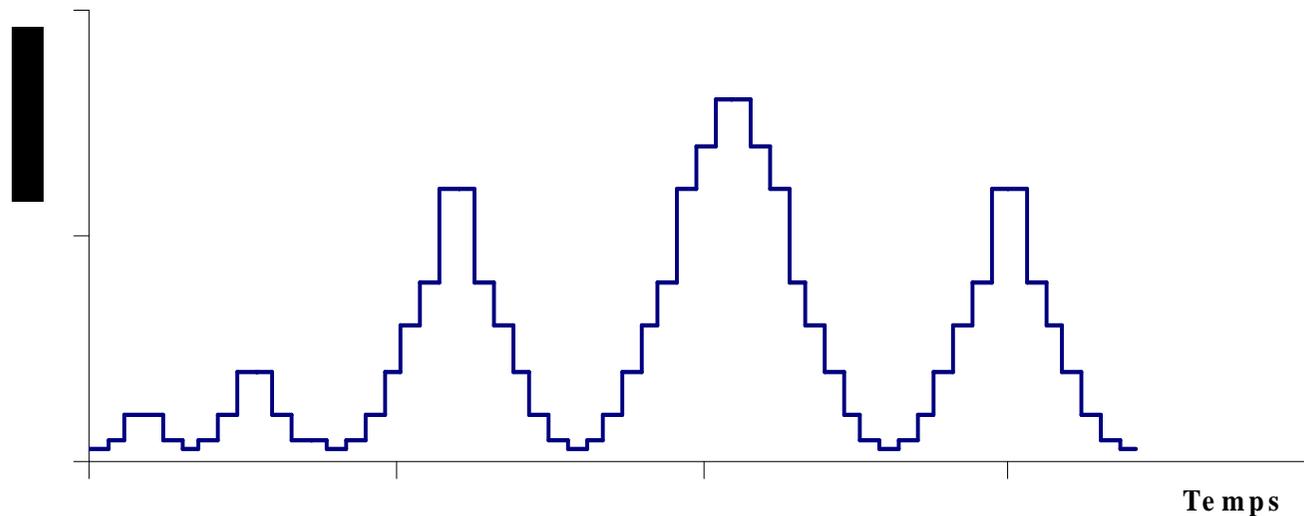
- Réalisation du forage à un diamètre de 101mm (le diamètre de la sonde la plus utilisée est de 95mm) ;
- Préparation du forage en le cimentant et le reperforant au même diamètre initial (101mm), afin d'avoir une paroi lisse qui évitera l'éclatement de la sonde ;
- Emplacement de la sonde à la cote voulue et détermination de la pression de placage ;

FONDATIONS ROCHEUSES

L'essai au dilatomètre

- Réalisation de l'essai en 5 cycles de chargement - déchargement et mesures des déformations qui résultent des pressions.

Programme de mise en pression







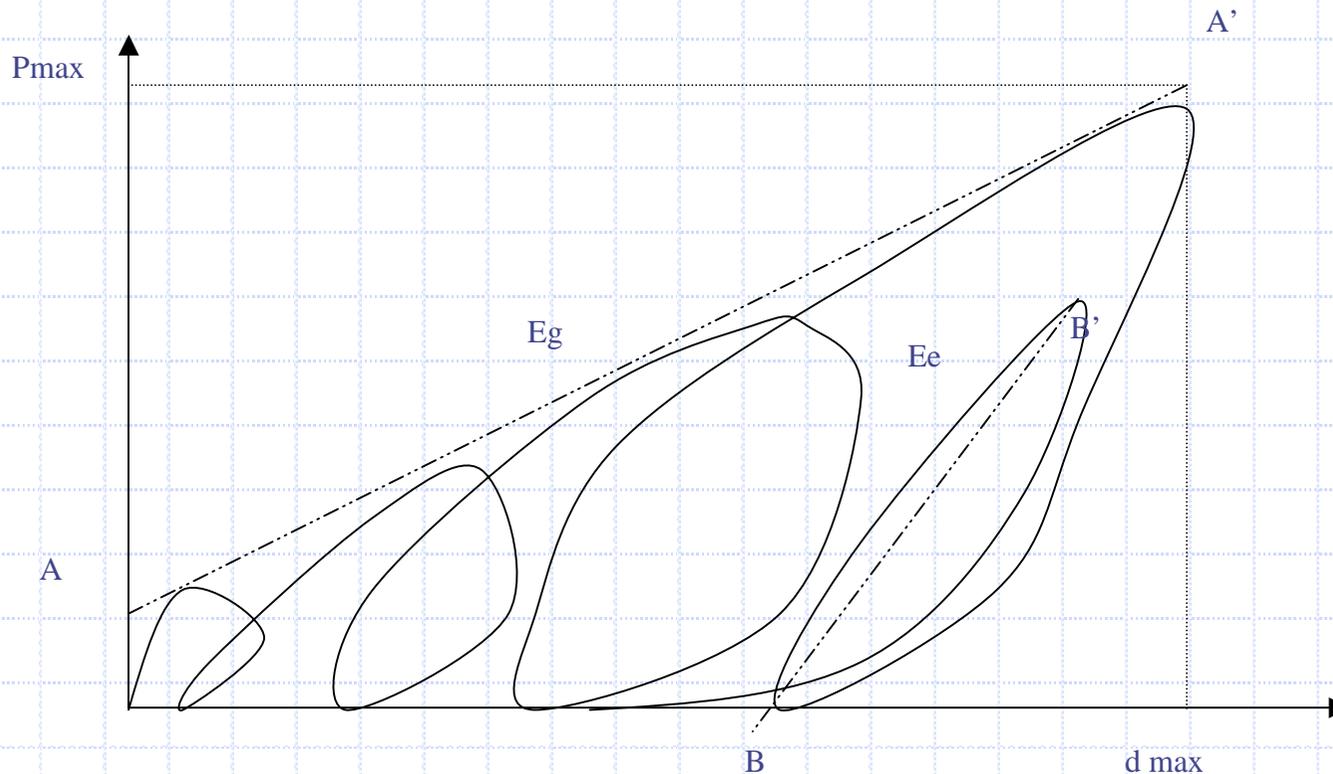




FONDATIONS ROCHEUSES

L'essai au dilatomètre

A partir des courbes pressions – déformations, on détermine les modules et les coefficients de déformabilité.



FONDATIONS ROCHEUSES

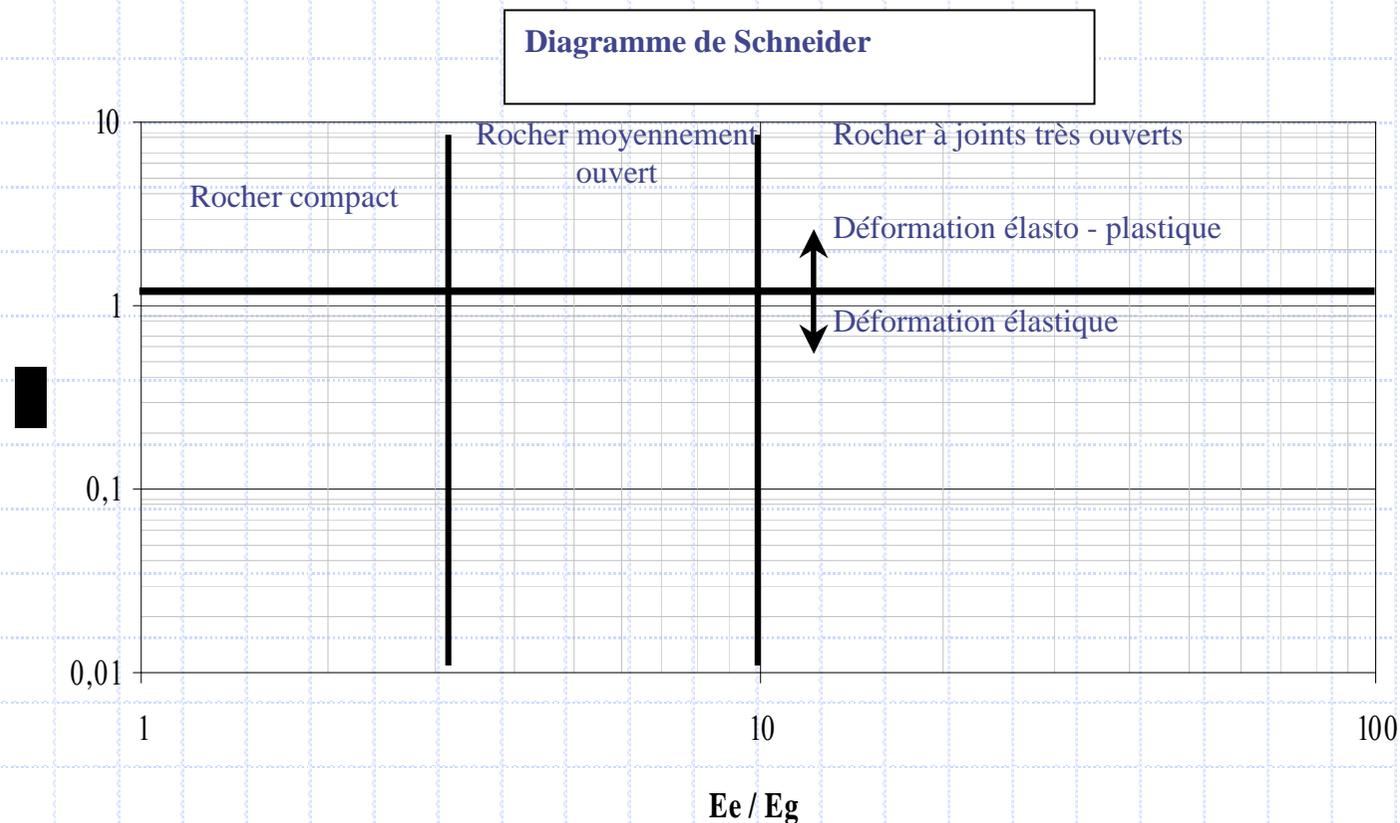
L'essai au dilatomètre

Paramètre	Définition
E_g	Module de déformation globale obtenu par la formule suivante pour AA'. $E = (1 + \nu) \phi P / d$
E_e	Module de déformation élastique obtenu pour BB'.
C_p	Coefficient de déformation permanente obtenu par le rapport de la déformation permanente et la pression maximale correspondante.

FONDATIONS ROCHEUSES

L'essai au dilatomètre

Le diagramme de Schneider permet de qualifier l'ouverture des joints du rocher et sa déformabilité.



FONDATIONS ROCHEUSES

L'essai au vérin

- Essai in situ qui consiste à mesurer les déformation du rocher sous des charges exercées à travers des plaques circulaires par un vérin.
- Cet essai s'exécute dans les galeries de reconnaissances.
- L'essai se déroule en 5 cycles de chargement - déchargement et mesures les déformations qui résultent des pressions.
- A partir des courbes pressions – déformations on détermine les paramètres définis pour l'essai dilatométrique et on utilise la même classification de Schneider.



MATERIAUX DE CONSTRUCTION

MATERIAUX DE CONSTRUCTION

- ◆ Les matériaux qui doivent servir à la construction d'un barrage en terre sont prélevés dans les zones d'emprunt ou ballastières
- ◆ Nature et propriétés physiques déterminent la conception et le mode de réalisation du barrage
 - √ Quantité et Qualité ? Avant conception de l'ouvrage
- ◆ Les zones d'emprunt sont localisées au moment des études géologiques

MATERIAUX DE CONSTRUCTION

- ◆ Zone d'emprunt idéale : Emprise de la cuvette
(√ Capacité de stockage, → coût transport et remise en état, Occupation de durée restreinte)
! matériaux participant à l'étanchéité de la cuvette
- ◆ Au cours des premières reconnaissances ~ 1 tranchée/ha
- ◆ L'étude en laboratoire permettra de confirmer les zones d'emprunt à retenir et d'en évaluer approximativement l'importance

MATERIAUX DE CONSTRUCTION

- ◆ Pour établir l'APD, reconnaissances complémentaires des zones retenues : plus de tranchées selon l'hétérogénéité de la zone
- ◆ Répartition régulière des tranchées : profils topographiques parallèles, perpendiculaires aux courbes de niveau
- ◆ Informations à relever : épaisseur des terrains inexploitable, profondeur de la nappe, épaisseur des horizons intermédiaires à purger

MATERIAUX DE CONSTRUCTION

- ◆ Quantité recherchée : 1,5 à 2 fois le volume du barrage
- ◆ Tenir compte :
 - Présence de nappe phréatique ce qui limitera les possibilités d'exploitation ou nécessitera des travaux de drainage
 - ! Situation des ballastières vis à vis des zones instables
 - ◆ ex. exploitation des pieds d'éboulis – précautions (respect des pentes naturelles, recharge des stériles...)

MATERIAUX DE CONSTRUCTION

◆ Prélèvement des échantillons :

- 1 échantillon / m d'épaisseur ou selon les changements de la nature du terrain
- Poids suffisant pour la réalisation des essais géotechniques (2kg pour les essais d'identification, 20 kg pour les autres essais)

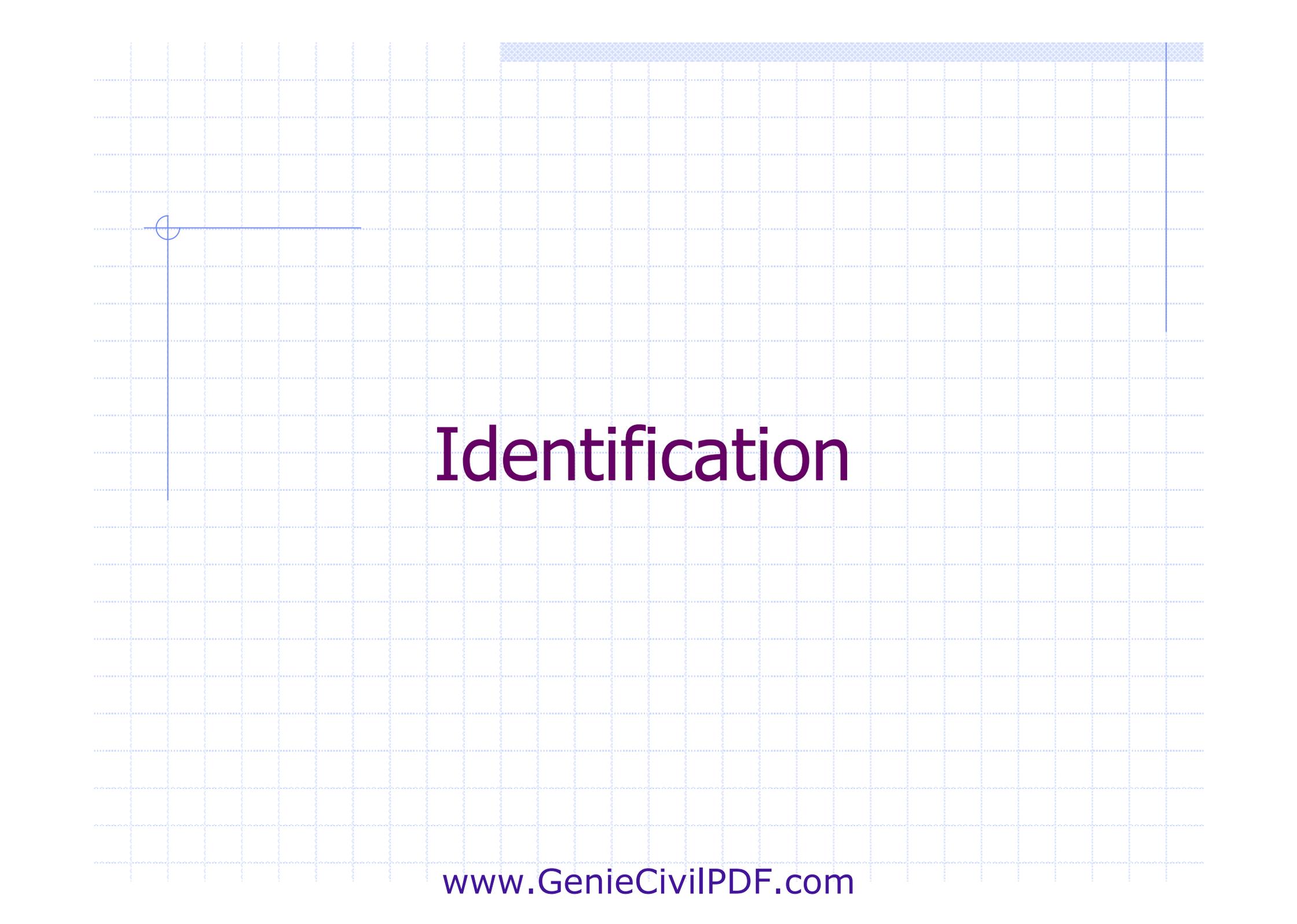
◆ L'étude des échantillons consiste en premier lieu à identifier les sols et à les classer √ éliminer les sols inaptes à la construction du barrage

◆ Puis détermination des caractéristiques des sols retenus

MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Prélèvement des échantillons





Identification

IDENTIFICATION

MATERIAUX FINS - TEXTURE

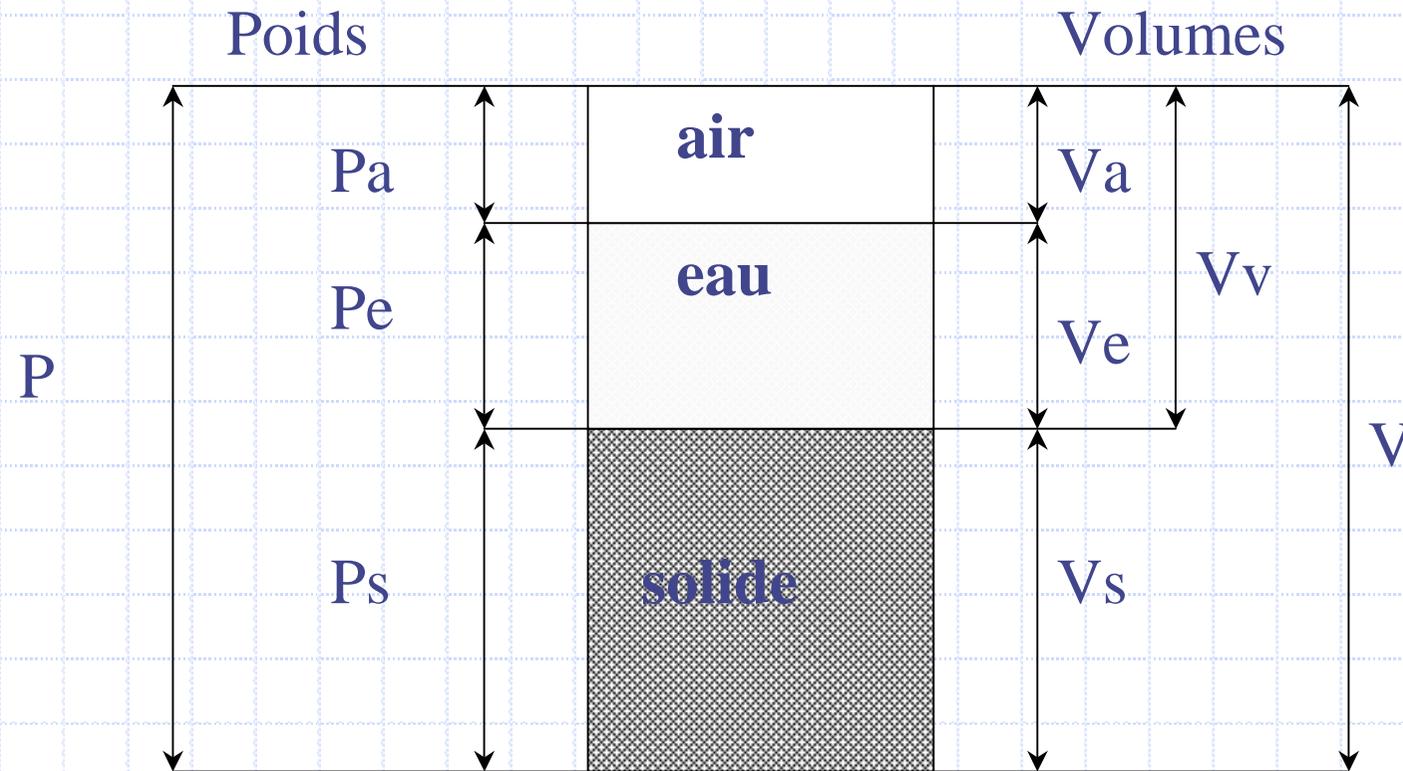
- ◆ Le sol est formé de grains solides entre lesquels se trouvent de l'air et de l'eau

<i>Classification décimale (Atterberg)</i>		<i>Classification anglo-saxonne (MIT)</i>	
Enrochements	> 200 mm		
Cailloux	200 - 20 mm	Gobbles	> 63 mm
Gravier	20 - 2 mm	Gravels	63 - 2 mm
Sable grossier	2 - 0.2 mm		
Sable fin	0.2 - 0.02 mm	Sands	2 - 0.06 mm
Limon	0.02 - 2 μ	Silts	0.06 - 2 μ
argile	<2 μ	clay	<2 μ

IDENTIFICATION

DENSITE, POROSITE ET TENEUR EN EAU

Un échantillon de sol peut se représenter comme suit :



IDENTIFICATION

DENSITE, POROSITE ET TENEUR EN EAU

On définit ainsi:

Densité totale : $\gamma = P / V$

Densité des grains solide : $\gamma_s = P_s / V_s$ (varie de 2,6 à 2,8 g/cm³)

Densité sec : $\gamma_d = P_s / V$

Teneur en eau : $W = (P_e / P_s) \times 100$

Indice des vides : $e = V_v / V_s$

Porosité : $n = V_v / V$ (toujours inférieur à 1)

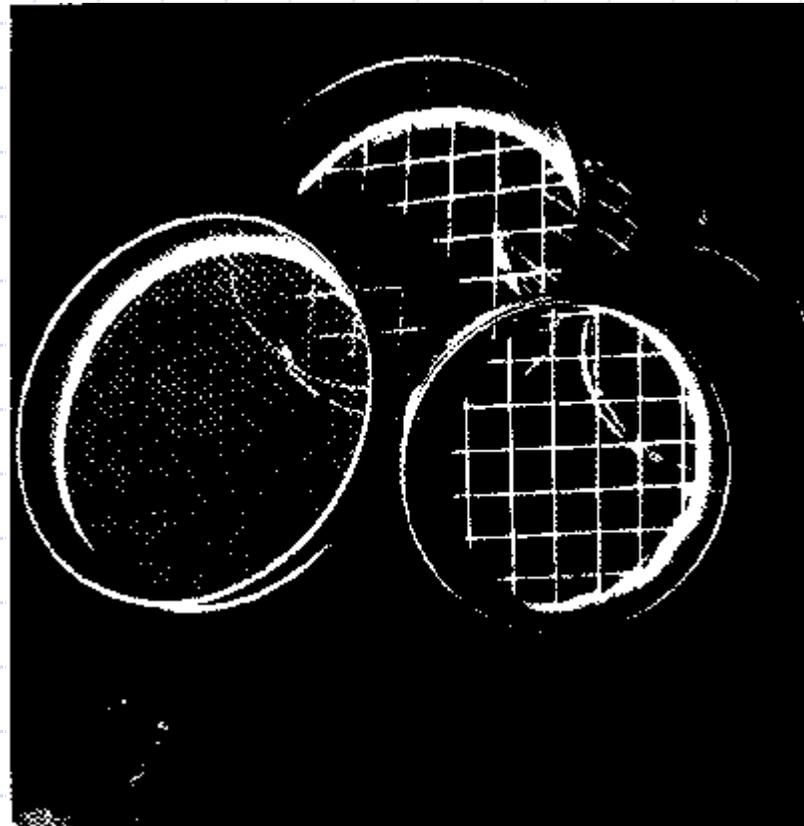
IDENTIFICATION

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

- ◆ Consiste à déterminer la distribution en poids des particules des matériaux suivant leur dimension
- ◆ La Granulométrie s'effectue par tamisage et pesage sur les particules de 63mm à 80 μ
- ◆ La Sédimentométrie s'effectue par sédimentation dans l'eau des particules <80 μ (mesure du temps de sédimentation)
- ◆ La Blocométrie s'effectue in-situ sur la fraction dont la dimension des grains est supérieur à 63m.

IDENTIFICATION

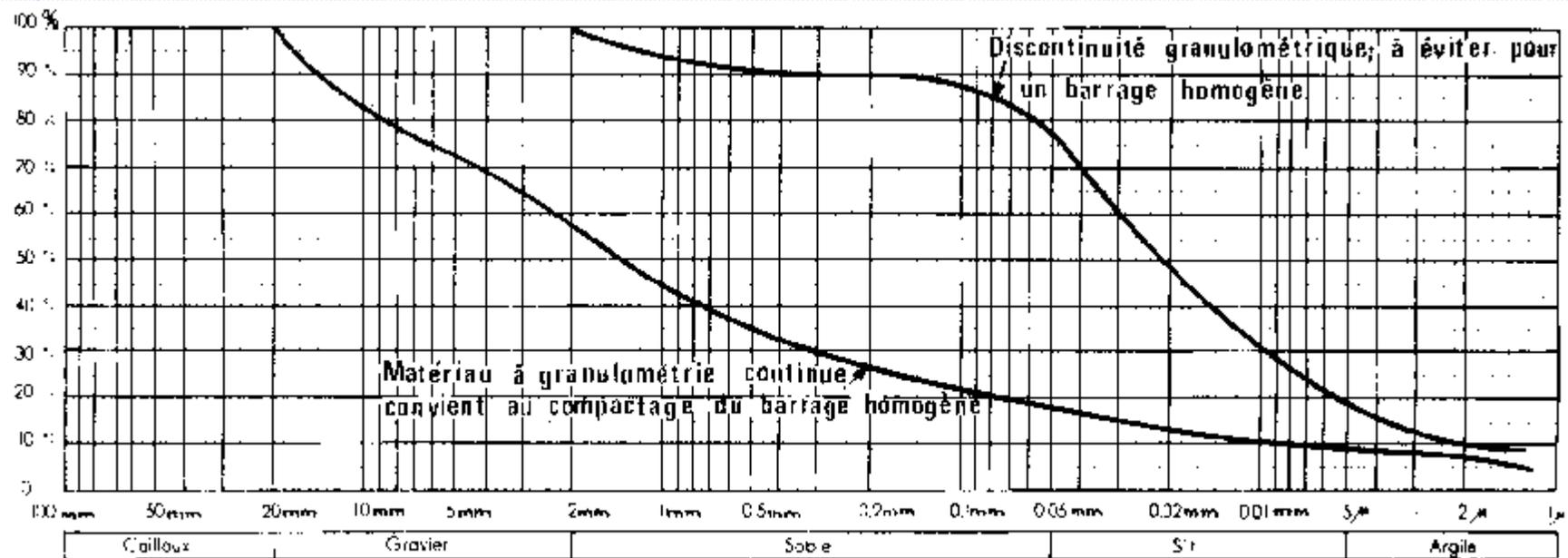
ANALYSE GRANULOMETRIQUE



IDENTIFICATION

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

- ◆ La granulométrie caractérise la texture d'un sol.
- ◆ Courbe représentant les pourcentages cumulés des parties du matériaux formées de grains de diamètre $<$ une dimension donnée

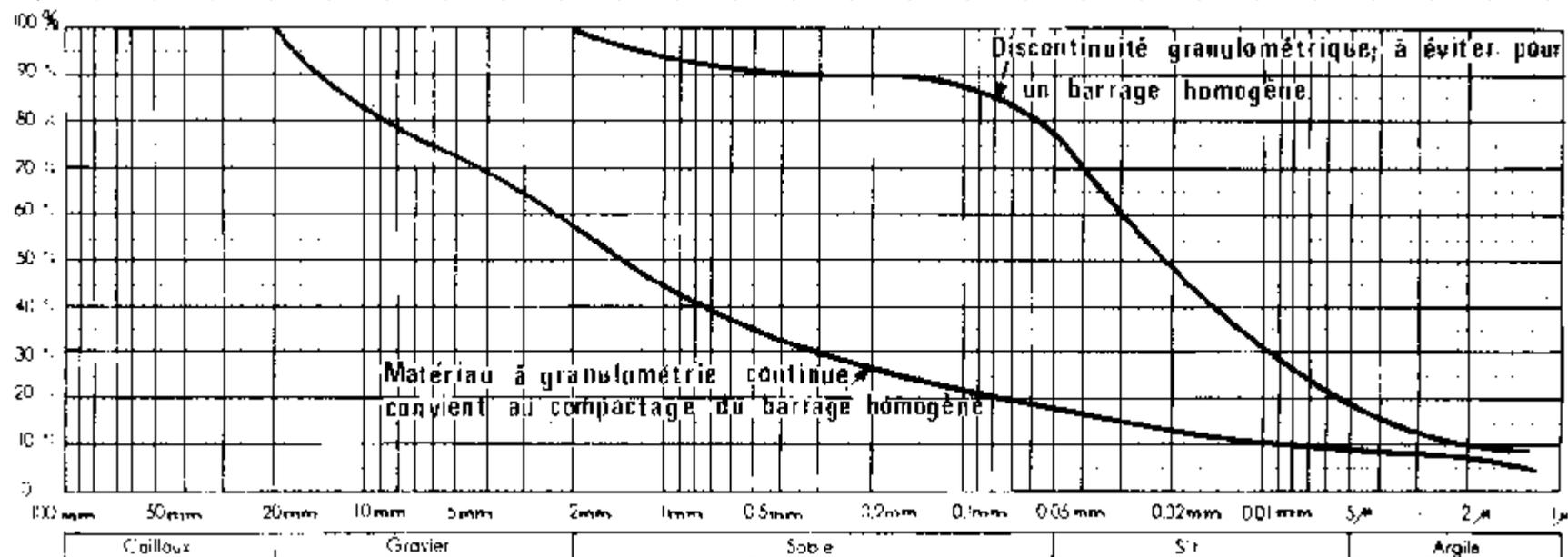


IDENTIFICATION

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

Caractéristiques granulométriques :

- Coefficient d'uniformité : $C_u = d_{60}/d_{10}$
- Coefficient de courbure : $C_c = d_{230}^2/d_{60} \cdot d_{10}$
- Sol bien gradué : $C_u > 4$ et $1 < C_c < 3$

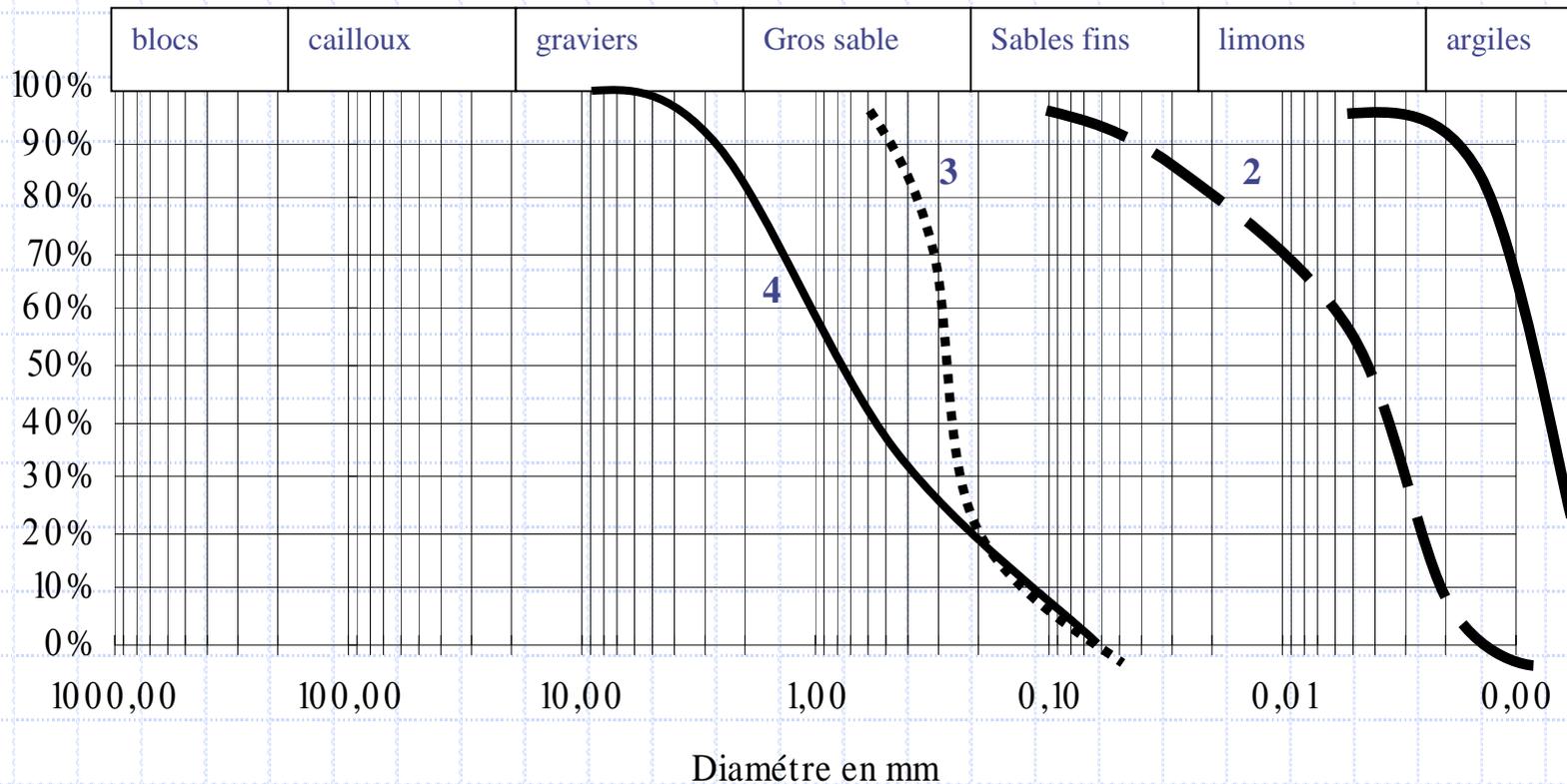


IDENTIFICATION

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

1. argile
2. limon
3. sable à granulométrie serrée
4. sable à granulométrie étalée

Courbes granulométriques typiques:



IDENTIFICATION

- ◆ Les sables : perméables, pas de cohésion mais forte résistance mécanique grâce aux frottements entre grains. Leur propriétés mécaniques contribuent souvent à la stabilité des massifs
- ◆ Les sols à prédominance argileuse : imperméables, cohérents mais pratiquement pas de frottement entre grains. Les propriétés mécaniques sont mauvaises pour la stabilité des digues en terre (étude des argiles complexe, changement de cohésion avec le temps)
- ◆ Les limons ont des propriétés intermédiaires entre celles de sables et des argiles

IDENTIFICATION

MATERIAUX FINS - Limites d'Atterberg

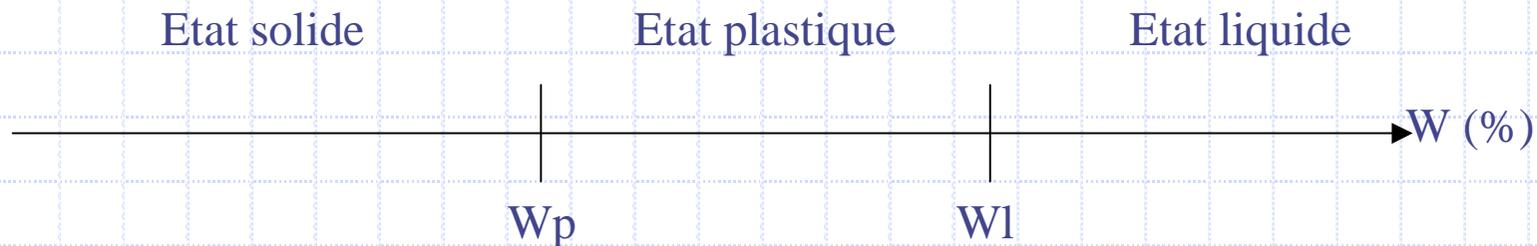
on définit de manière arbitraire:

La **limite de liquidité** (Wl) qui sépare l'état plastique et l'état liquide d'un sol ;

La **limite de plasticité** (Wp) qui sépare l'état plastique de l'état solide.

L'indice de plasticité $I_p = Wl - Wp$

($\Rightarrow I_p$: sol \Rightarrow argileux) ($20 < IP < 60$)



IDENTIFICATION

MATERIAUX FINS - Limites d'Atterberg

Pour les ordres de grandeurs:

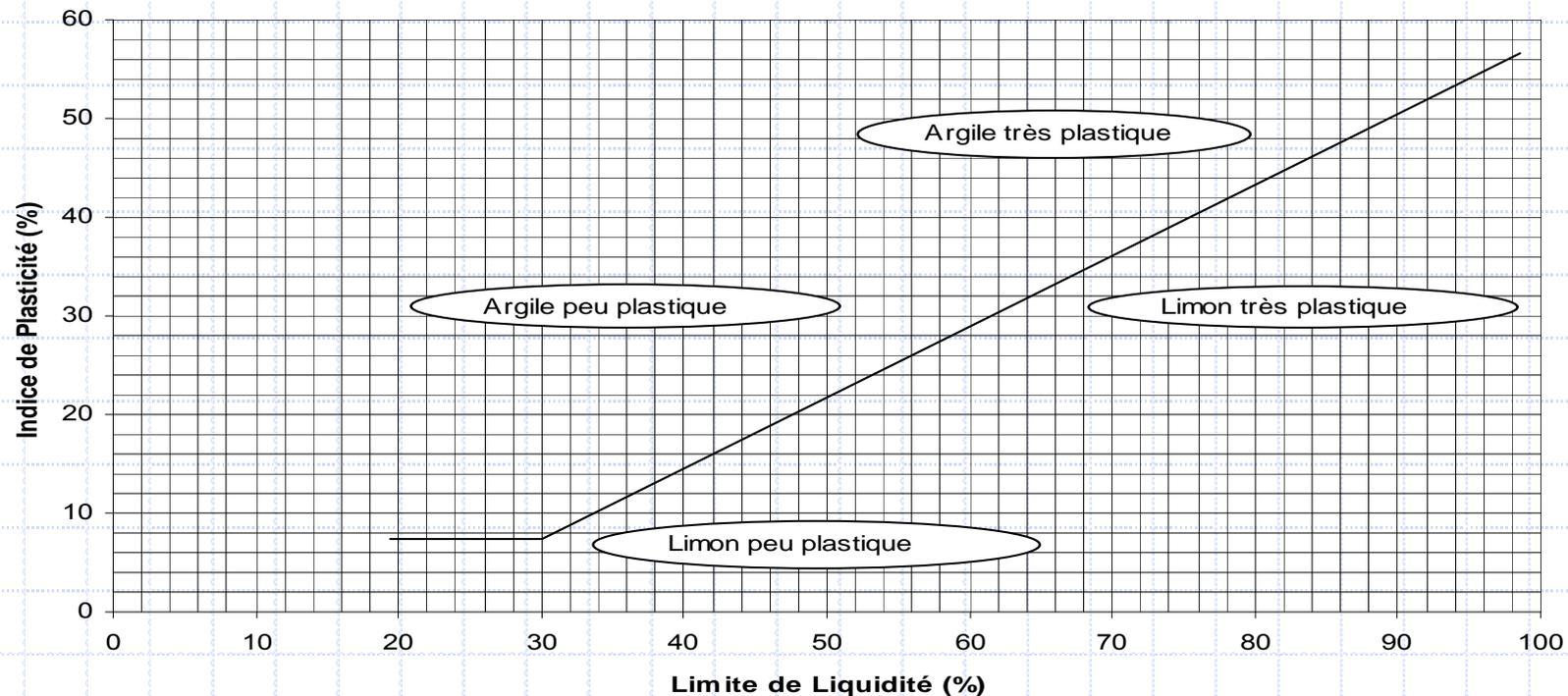
SOL	Wl	Wp	Ip
Limon	36	24	12
Argile	67	30	37
Tourbe	66	37	29
vase	83	38	45
Plasticité		Ip	
Non plastique		0 - 5	
Peu plastique		5 - 15	
Plastique		15 - 40	
Très plastique		>40	

IDENTIFICATION

MATERIAUX FINS - Limites d'Atterberg

On peut classer les sols en utilisant W_L et I_p :

Diagramme de casagrande



Droite de séparation: $I_p = 0.73(W_L - 20)$

IDENTIFICATION

MATERIAUX FINS

- Poids volumique : indispensable pour le calcul
- Teneur en matière organique : ne doit pas dépasser 5%. Une teneur supérieure caractérise un sol évolutif pouvant présenter des tassements dangereux

Droite de séparation: $IP = 0.73 (WL - 20)$

CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES SOLS

CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE

Densité sèche : Un massif de terre est d'autant plus résistant qu'il contient moins de vide (densité sèche élevée)

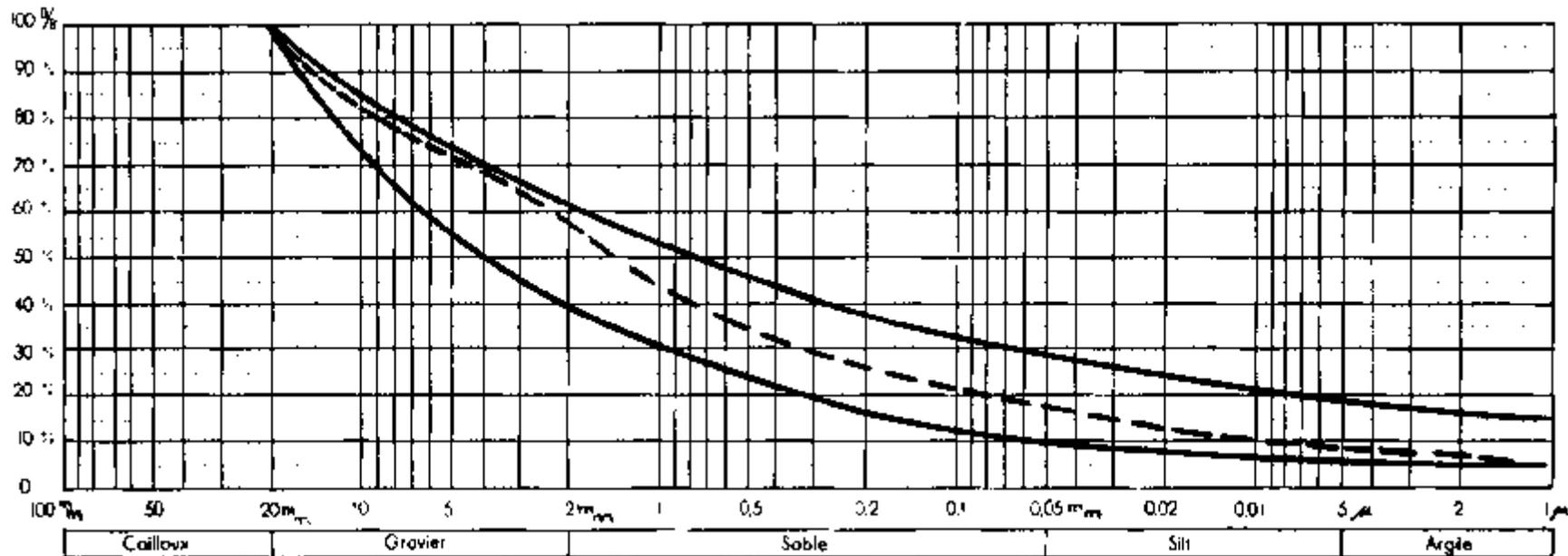
Le but du compactage d'un sol est de lui donner l'indice des vides le plus bas possible (la densité la plus élevée)

Un sol est d'autant plus apte au compactage qu'il est fait de grains dont les dimensions relatives permettent des arrangements aboutissant au meilleur remplissage des vides : sol dont la courbe granulométrique est contenue dans le fuseaux de 'TALBOT'

Les résultats du compactage dépendent de la teneur en eau du sol et de l'énergie avec laquelle on le serre

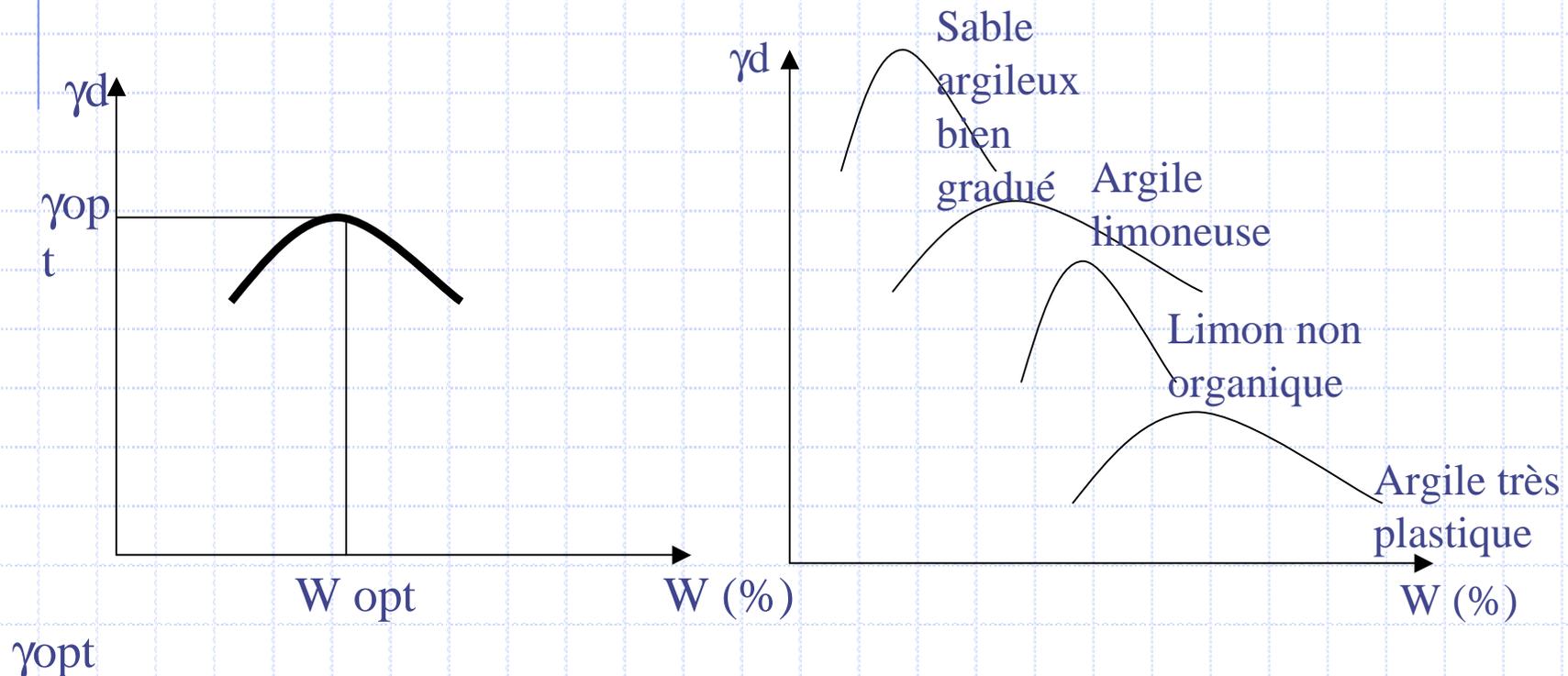
CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE

fuseaux de 'TALBOT'



CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE - ESSAI PROCTOR

Consiste à déterminer pour un compactage d'intensité donnée, la densité sèche maximale et la teneur en eau correspondant, on les appelle optimums Proctor.



CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE - ESSAI PROCTOR

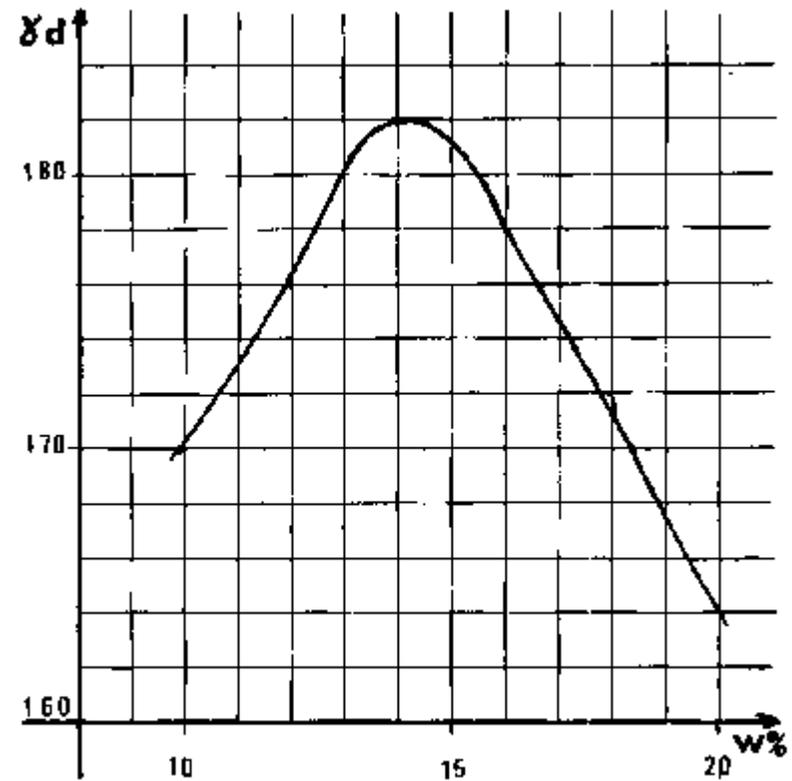
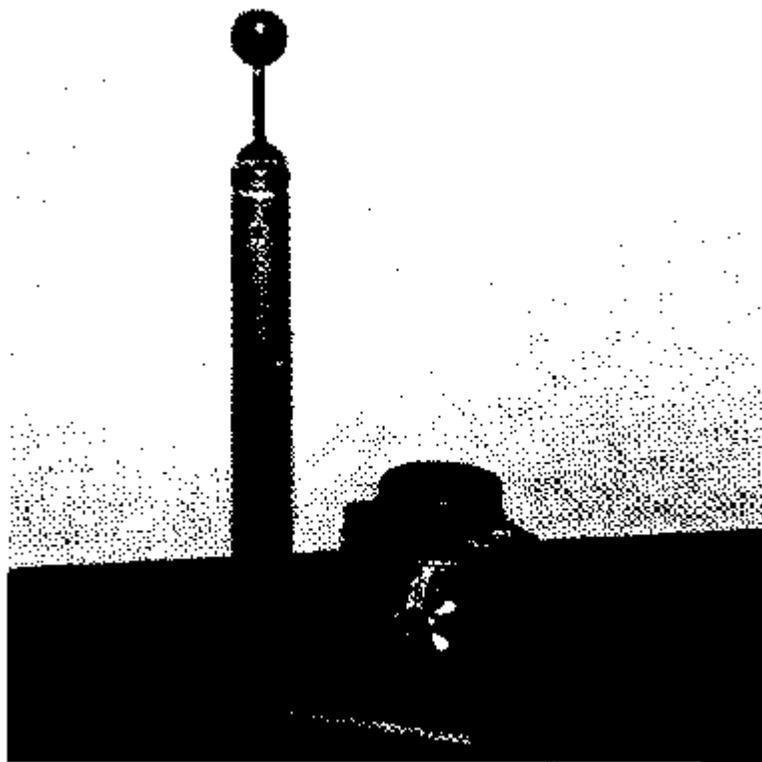
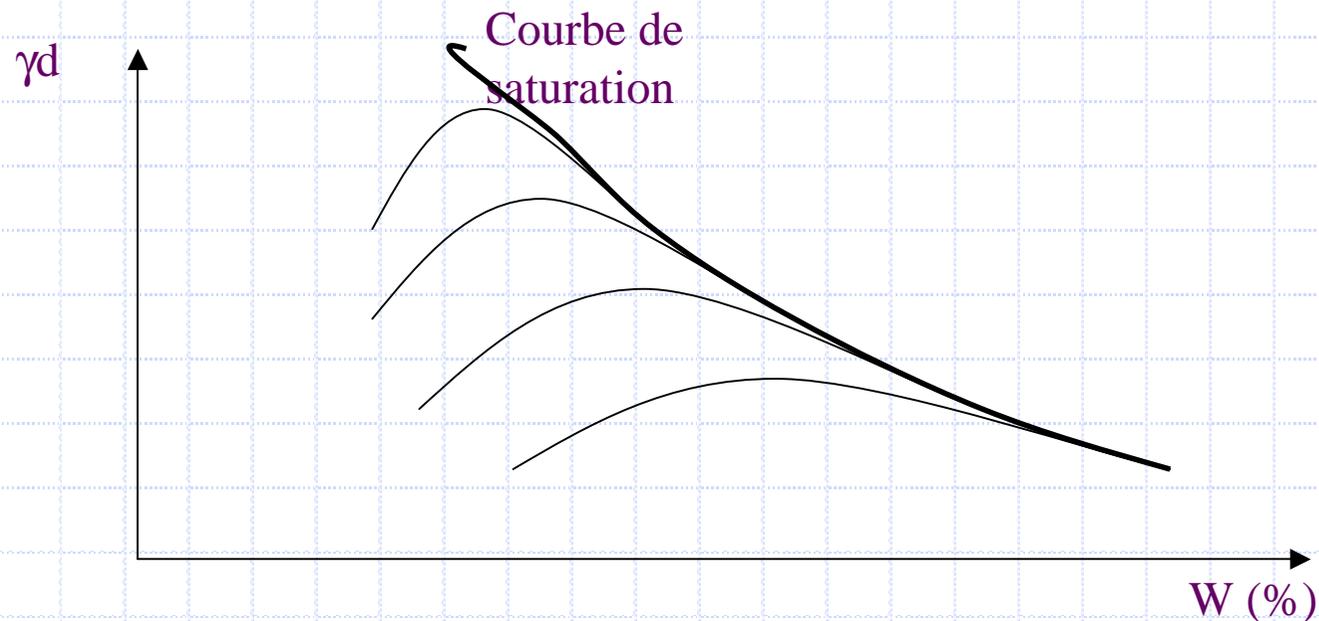


Figure II.10. – Matériel d'essais PROCTOR et son diagramme.

CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE - ESSAI PROCTOR

Pour un sol donné, si l'énergie de compactage augmente, la densité augmente et les courbes deviennent plus pointues.

Les courbes de compactage admettent pour enveloppe une courbe appelée courbe de saturation, qui correspond à l'état saturé du sol.



CARACTERISTIQUES DE COMPACTAGE - ESSAI PROCTOR

L'essai en laboratoire se fait sur la fraction des matériaux de l'échantillon ($D < 5\text{mm}$) et l'énergie de compactage par les engins de chantier peut être bcp plus forte que celle de l'essai

- difficulté de comparaison entre le compactage sur chantier et celui du laboratoire
- Nécessité de procéder à des essais en vrai grandeur

RESISTANCE AU CISAILLEMENT

COHESION ET FROTTEMENT

La résistance au cisaillement d'un sol est fonction de l'angle de frottement interne des matériaux qui le constituent et de leur cohésion

La cohésion est due aux liaisons ioniques et aux tensions capillaires

RESISTANCE AU CISAILLEMENT

COHESION ET FROTTEMENT

La résistance d'un sol est bien définie par la connaissance des deux paramètres c et φ pour un indice des vides et à une teneur en eau déterminés :

- L'indice des vides est celui de l'optimum PROCTOR pour les remblais et celui du sol naturel pour la fondation
- la teneur en eau est en générale celle de la saturation qui représente la condition la plus défavorable.

RESISTANCE AU CISAILLEMENT

La cohésion d'un matériau mis en remblai peut varier et a tendance à diminuer avec le temps

Paramètres très utiles dans les calculs de stabilité des barrages, ils sont obtenus par :

- **l'essai de cisaillement à la boîte;**
- **l'essai Triaxial.**

CONSOLIDATION, TASSEMENT, PERMEABILITE

Quand une terre saturée est soumise à une compression, les grains ont tendance à se rapprocher et l'eau interstitielle est mise sous pression et a tendance à s'échapper.

Si le matériau est drainé, au bout d'un certain temps, un nouvel équilibre s'établit, la pression interstitielle retombe à zéro, les grains sont réarrangés dans un état plus dense. Le terrain est dit consolidé

La mesure de la compressibilité se fait au laboratoire à l'aide d'un appareil appelé oedomètre.

Résultats : courbe reliant l'indice des vides d'équilibre à la pression sur l'échantillon.

CONSOLIDATION, TASEEMENT, PERMEABILITE

L'oedomètre permet aussi de déterminer la perméabilité
(coefficient de DARCY K)

(La perméabilité est aussi mesurée par le perméamètre)

Ordre de grandeur :

Sols sableux : entre 10^{-2} et 10^{-6} m/s

Sol limoneux : 10^{-5} – 10^{-8} m/s

Sol argileux : 10^{-8} - 10^{-12} m/s

Pour l'étanchéité des digues et des cuvettes, on cherche à
atteindre les 10^{-7} à 10^{-9} m/s.

CONSOLIDATION, TASEEMENT, PERMEABILITE

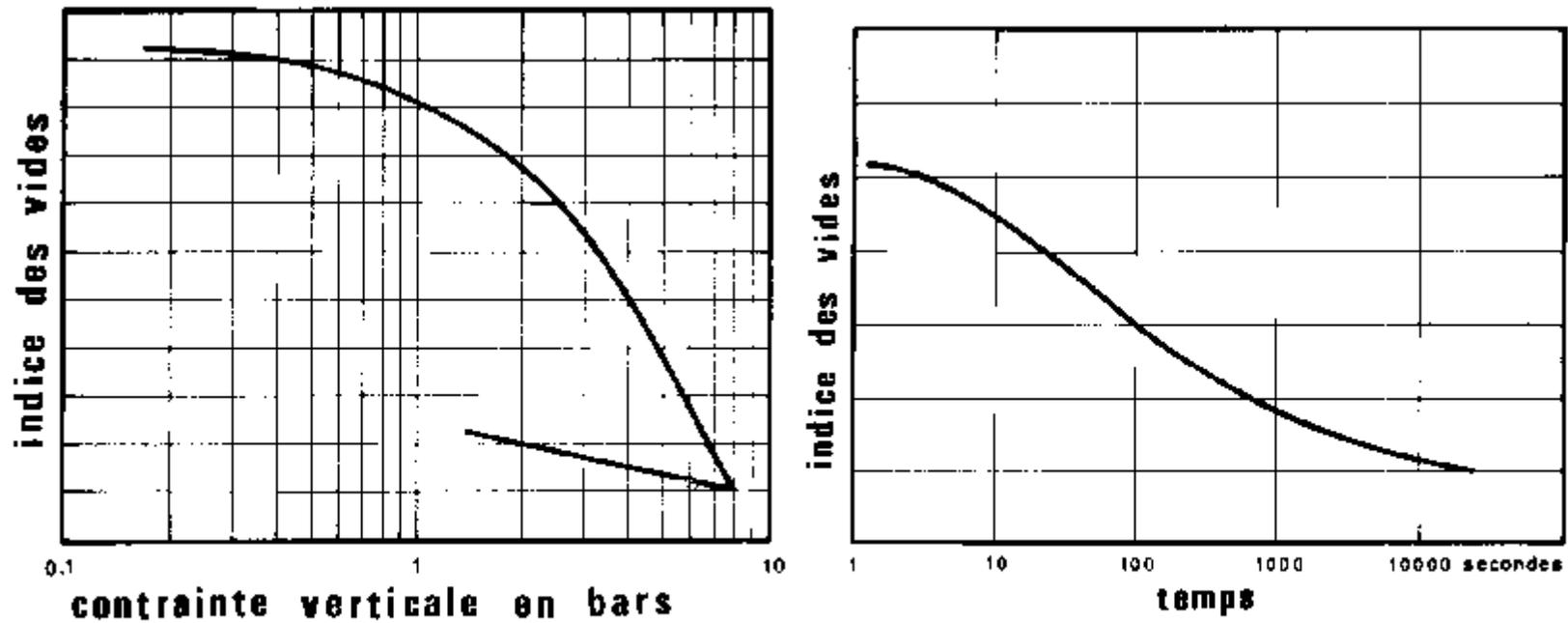
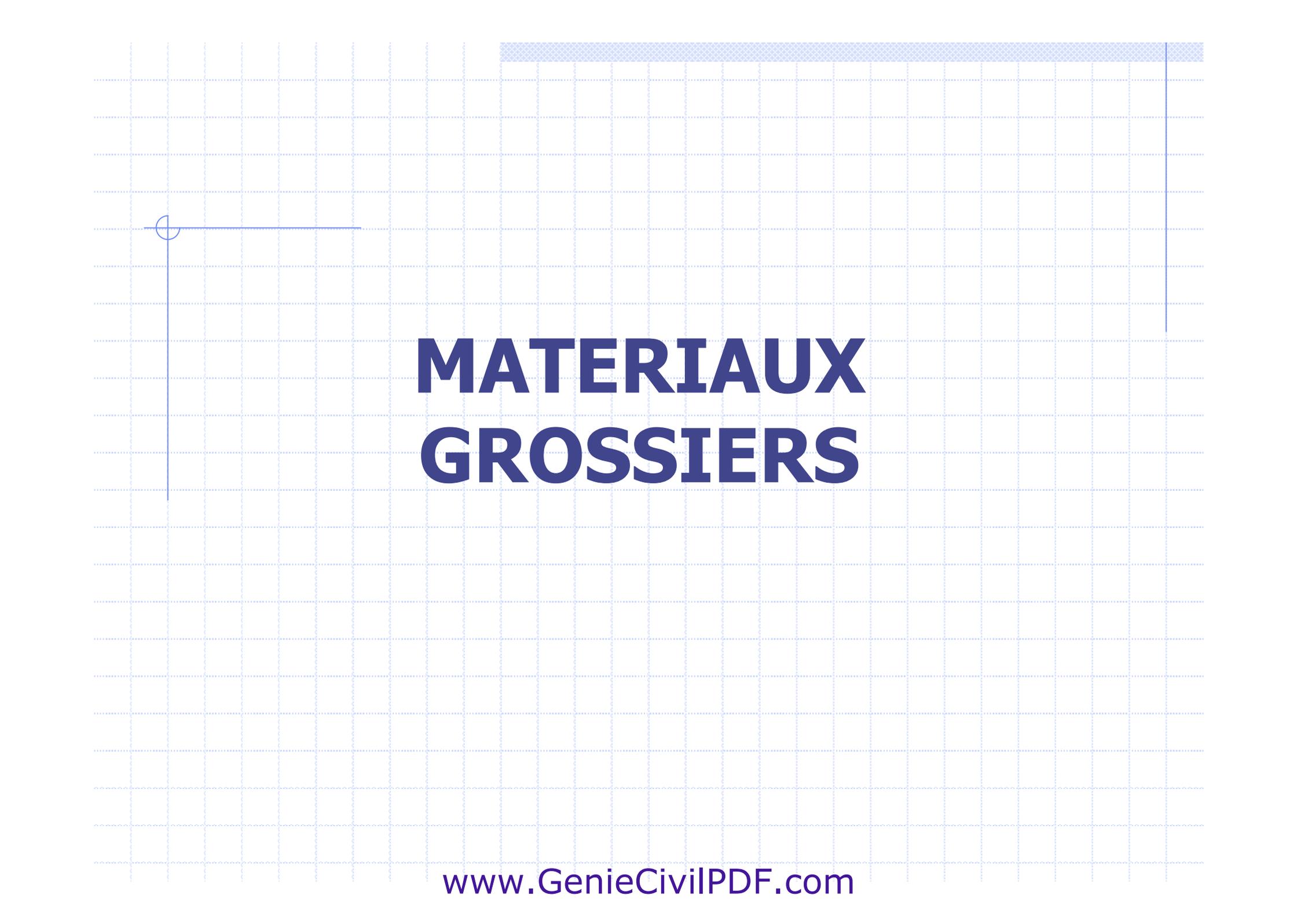


Figure II.13. – Courbes oedométriques.



MATERIAUX GROSSIERS

Reconnaissance des gîtes

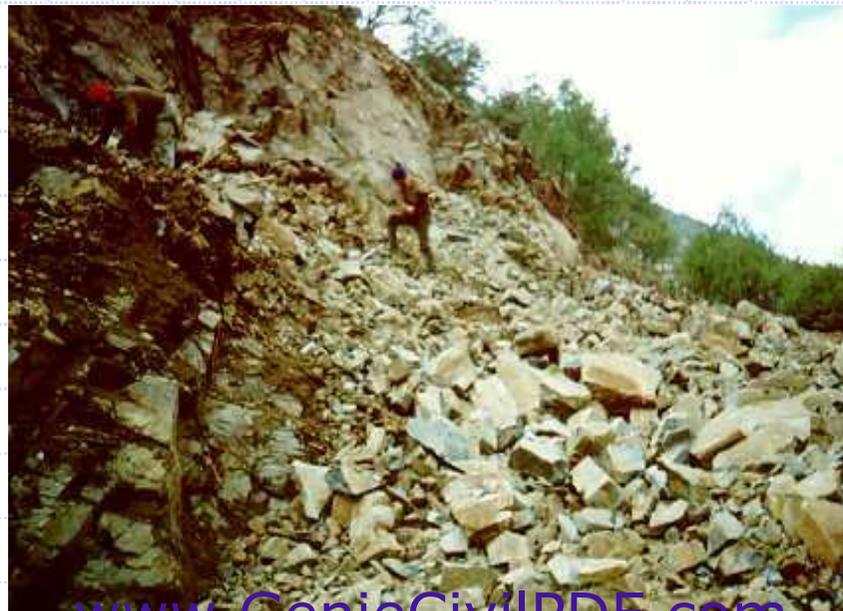
MATERIAUX GROSSIERS

- ◆ Zones d'emprunt : reconnaissances à la pelle
- ◆ Prospection de carrière : Etude des niveaux rocheux, étude structurale, densité de fracturation, épaisseur de découverte
- ◆ Prospection par forages carottés et géophysique
- ◆ Essai de sautage

Reconnaissance des gîtes *MATERIAUX GROSSIERS*



Essai de sautage pour l'exploitation des carrières



MATERIAUX GROSSIERS

Identification

Comme pour les matériaux fins, on détermine pour les matériaux grossiers:

- la granulométrie;
- les Limites d'Atterberg sur la fraction fine;
- la Densité.

MATERIAUX GROSSIERS

LA DURETE

On apprécie la dureté d'un matériau par:

- l'essai **Los Angeles**;
- Ou par l'essai **Deval**.

MATERIAUX GROSSIERS

Essais Los Angeles

Consiste à mesurer la quantité d'éléments inférieurs à 1,6mm produite en soumettant le matériau aux chocs de boulets normalisés et aux frottements réciproques dans la machine Los Angeles. La granularité du matériau soumis à l'essai est soit 3,15/6,3 6,3/10 ou 10/16mm.

L'essai s'effectue sur un échantillon de 5000g. Soit P le poids en gramme des supérieurs à 1,6mm, le coefficient Los Angeles (LA) est :

$$\text{LA} = [(5000 - P) / 5000] \times 100 \text{ (en \%)}$$

MATERIAUX GROSSIERS

Essais Los Angeles

Pour les ordres de grandeur :

Coefficient Los Angeles (LA)	Caractérisation
< 15	Très bon à bon
15 à 20	Bon à moyen
20 à 30	Moyen à faible
> 30	Médiocre

MATERIAUX GROSSIERS

Essais Deval

C'est aussi un essai de dureté qui a le même principe que l'essai Los Angeles. Il s'effectue par voie **sèche** ou par voie **Humide** sur des éléments de 2 à 5cm et un poids de $7000 \pm 5g$. On mesure les inférieurs à 1,6mm après le frottement dans la machine Deval.

Soit P le poids en gramme des inférieurs à 1,6mm, le coefficient Deval est donné par :

$$D_{\text{sec}} \text{ ou } D_{\text{humide}} = 2800 / P$$

MATERIAUX GROSSIERS

Essais Deval

Pour les ordres de grandeur :

Coefficient Deval humide (D_{humide})	Caractérisation
> 6	Très bon à bon
4 à 6	Bon à moyen
3 à 4	Moyen à faible
< 3	Médiocre

MATERIAUX GROSSIERS

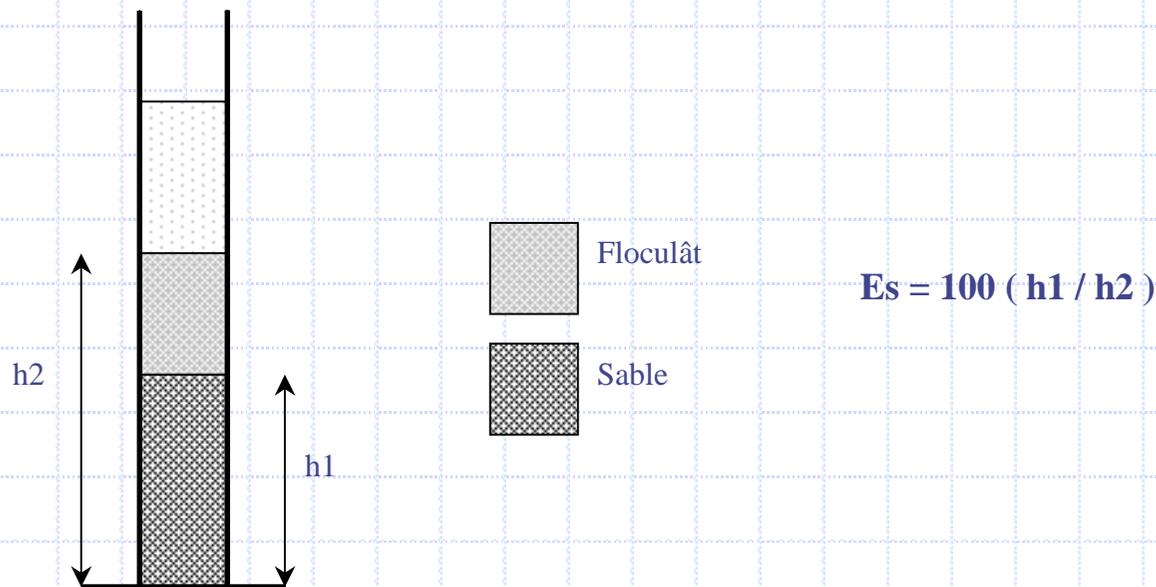
Forme des granulats

La forme des agrégats est appréciée par le **coefficient d'aplatissement** (A%), défini par le pourcentage d'élément tel que le rapport $G/E > 1.58$, G étant la dimension de la maille carrée minimale à laquelle passe l'élément et E est le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles.

Pour les bétons des barrages on exige un $A < 30\%$.

MATERIAUX GROSSIERS EQUIVALENT DE SABLE

L'essai d'équivalent de sable (Es) permet de mesurer le degré de pollution d'un sable par les matériaux fins, il consiste à la sédimentation d'un matériau granulaire dans une solution lavante.



MATERIAUX GROSSIERS EQUIVALENT DE SABLE

Pour les ordres de grandeur :

ES	Caractérisation
100	Sable pur
> 80	Sable propre pour béton
35 à 40	Grave pour couches de base
30 à 35	Grave pour couches de fondation
< 35	Sable argileux
0	Argile pure

MATERIAUX GROSSIERS

ALCALI-REACTION

L'alcali-réaction est une réaction chimique entre certaines formes de silice et de silicate, pouvant être présentes dans les granulats et les alcalins du béton. Elle correspond à une attaque du granulat par le milieu basique du béton et provoque la formation d'un gel de réaction (silicate alcalin), dont l'expansion engendre, sous certaines conditions, des gonflements.

Il est donc primordial au moment du choix des granulats et de la définition de la composition du béton, de détecter les risques éventuels d'un tel phénomène.

MATERIAUX GROSSIERS

ALCALI-REACTION

La démarche de qualification commence par une identification pétrographique du granulat :

Si le granulat ne contient pas d'espèces réactives (Exemples : Quartz à réseau déformé, présentant une extinction ondulante, minéraux feldspathiques altérés, joints de grains ouverts, verres siliceux ou verres basaltiques plus ou moins dévitrifiés, tridynite, cristobalite, ou l'opale.) en quantité néfaste et il est directement classé non réactif (NR),

MATERIAUX GROSSIERS

ALCALI-REACTION

Si le granulats contient des espèces réactives en quantité supposée critique ou néfaste ($\text{SiO}_2 > 4\%$), on vérifie que la présence et la teneur de ces espèces réactives confèrent au granulats une potentialité de réactivité (PR) qui peut être testée par les essais normalisés par l'AFNOR suivants :

- dans un premier lieu, l'essai à l'autoclave (P 18-590) rapide donnant des résultats dans un délai de l'ordre d'une semaine
- ensuite, un essai à long terme, dit essai de performance (P 18-587), qui donne des résultats en 8 mois

Tableau des essais les plus usuels utilisés dans les études des grands Barrages

N°	Paramètres à mesurer	ESSAIS	Sols	Roches	EN LABO.	IN SITU
1	Poids volumiques	Mesure de densité	X	X	X	X
2	Plasticité Wl, Wp, Ip	Limites d'Aterberg	X		X	
3	Dimensions des grains	Analyse granulométrique	X		X	
4		Pétrographie sur lame mince		X	X	
5	Minéralogie, analyse chimique	Analyse chimique et Analyse minéralogique	X	X	X	
6	Indice de la qualité I _Q	Vitesses du son		X	X	
7	Ouverture et qualité des joints	Essai au vérin		X		X
8		Essai sur les matériaux de remplissage	X		X	
9	Résistance au cisaillement	Cisaillement à la boîte	X	X	X	
10		Triaxiaux	X	X	X	
11		Scissomètre	X			X
12	Résistance à la compression	Compression simple	X	X	X	
13		Franklin		X	X	X
14	Déformation	Essai au vérin		X		X
15		Essai au dilatomètre		X		X
16		Essai au pressiomètre	X			X
17	Compressibilité	Oedomètre	X		X	
18	Dureté	Los Angeles		X	X	
19		Deval		X	X	
20	Compactage	Proctor	X		X	
21		Planches d'essais	X			X