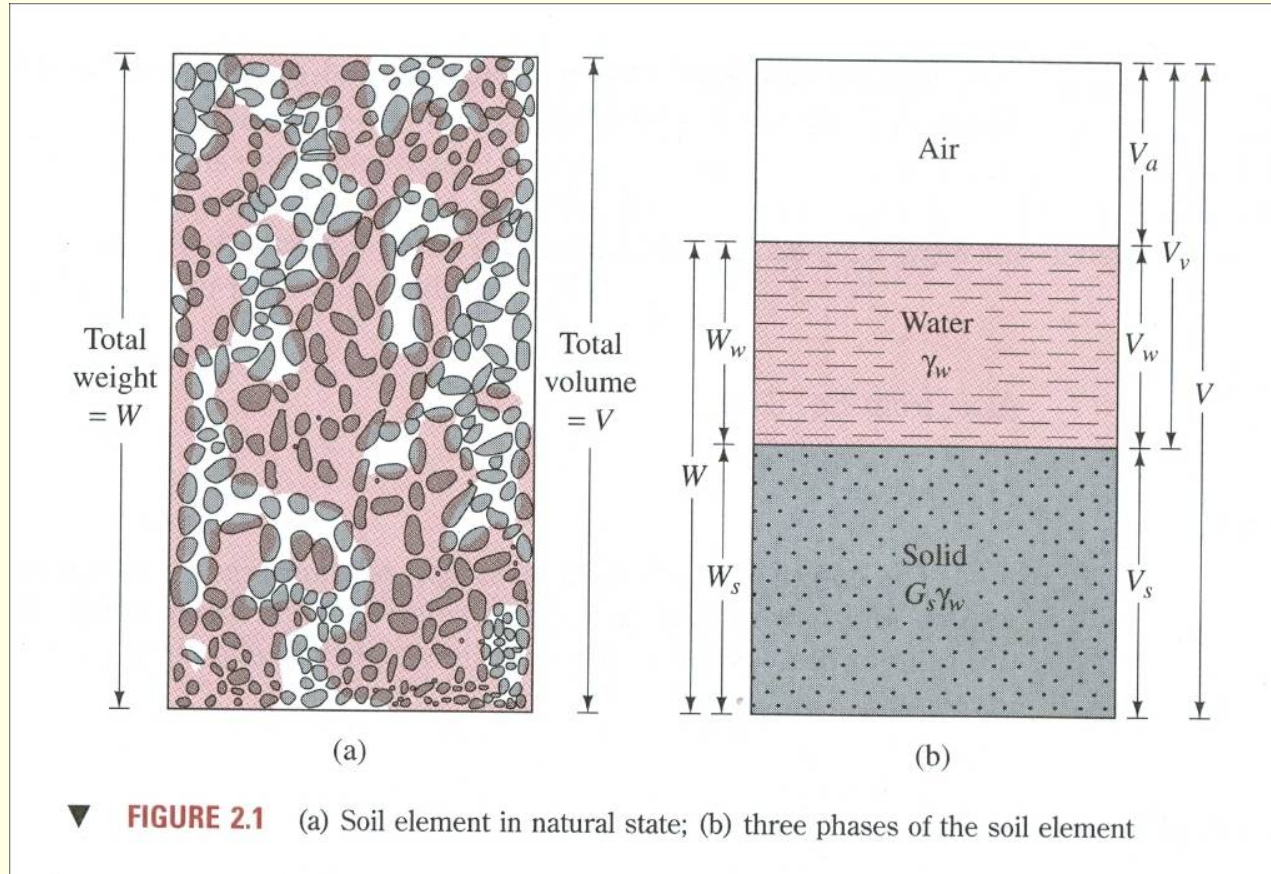


Volumétrie et compacité

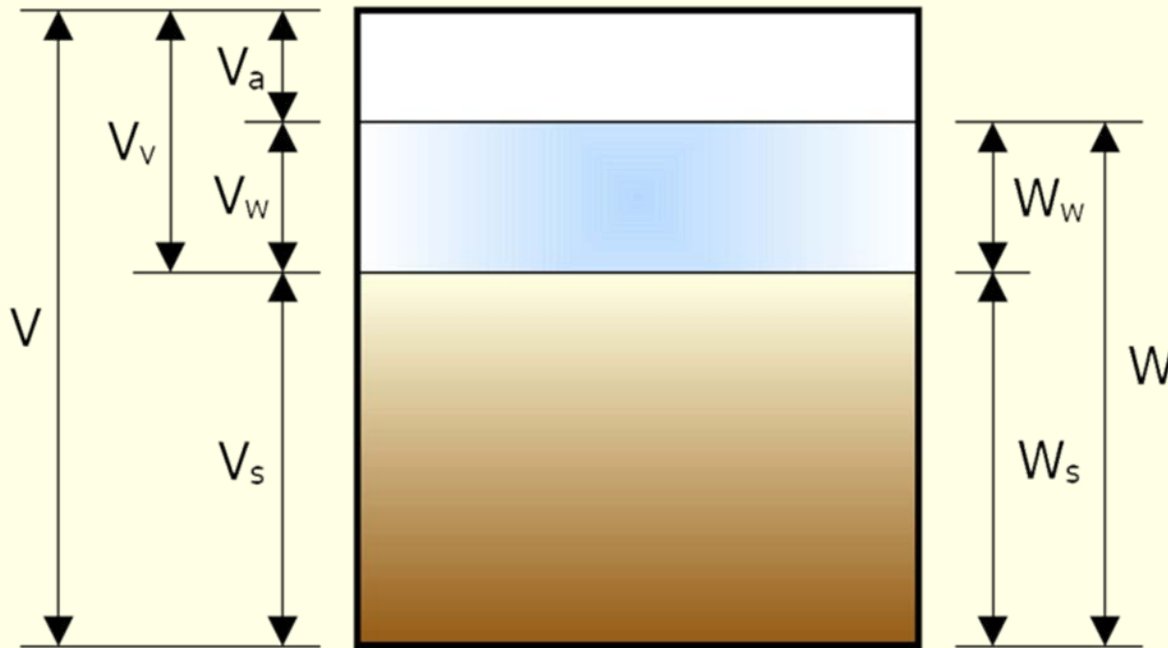
AUCE 1172

Cours 2

3 phases : solide, eau, gaz



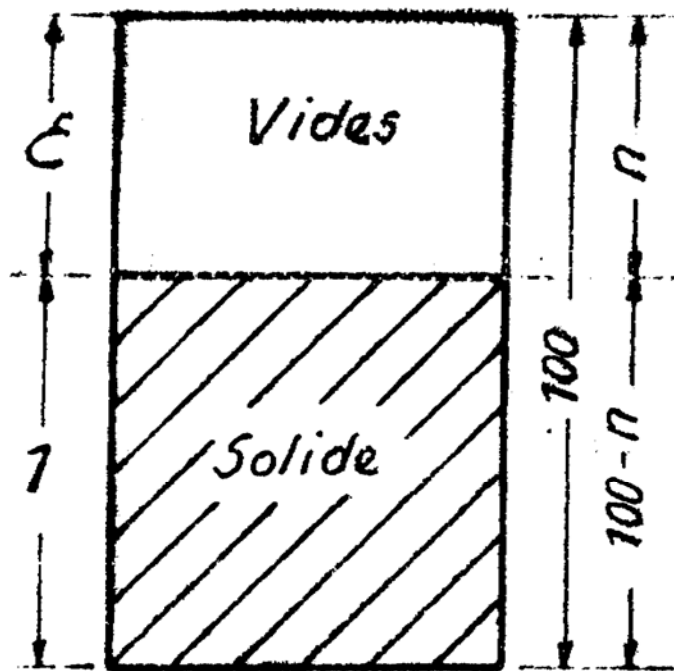
Analyse volumétrique



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

$$W = W_s + W_w$$

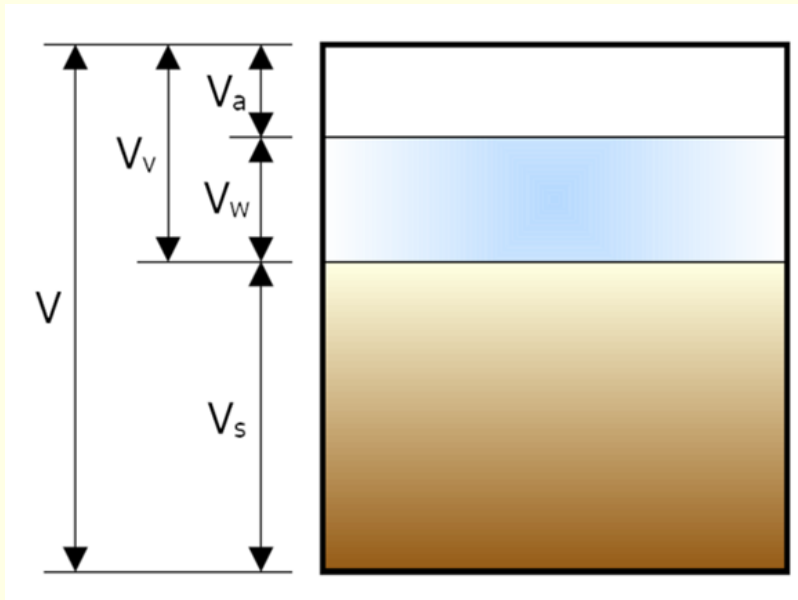
Porosité (n) et indice des vides (e)



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

$$e = \frac{V_v}{V_s} = \frac{V_v}{V - V_v} = \frac{\frac{V_v}{V}}{1 - \frac{V_v}{V}} = \frac{n}{1 - n}$$

Saturation



- Sol sec

$$si \quad V_w = 0 \Rightarrow V_a = V_v$$

- Sol saturé

$$si \quad V_w = V_v \Rightarrow V_a = 0$$

- Degré de saturation

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

Teneur en eau

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

$$w = \frac{W_i - W_f}{W_f - W_t}$$

$$W_i = W_s + W_w + W_t$$

$$W_f = W_s + W_t$$

Séchage de l'échantillon à l'étuve

Entre 105 et 110°C

Jusqu'à plus évolution du poids

Généralement 24 h

Poids spécifique

- Poids spécifique des particules

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

- *specific gravity*

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

- pycnomètre

$$\gamma_s = \frac{P_{ps} - P_p}{P_{ps} - P_p + P_{pwT} - P_{pswT}} \cdot \gamma_w$$



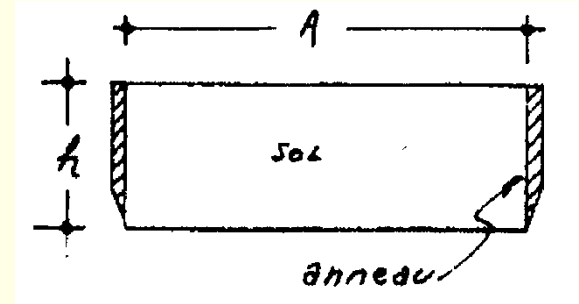
Poids volumique

- Anneau volumétrique et pesée

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

- Densitomètre à membrane

- Gammamétrie: indirectement par absorption rayonnement gamma à travers échantillon



Poids volumique sec

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

$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{W_s + W_w}{V} = \frac{W_s + w \cdot W_s}{V} = (1 + w) \frac{W_s}{V} = (1 + w) \cdot \gamma_d$$

$$\gamma_d = \frac{\gamma}{1 + w}$$

A la saturation ...

- Poids volumique saturé $\gamma_{sat} = \gamma_d (1 + w_{sat})$

- Poids volumique déjaugé $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$

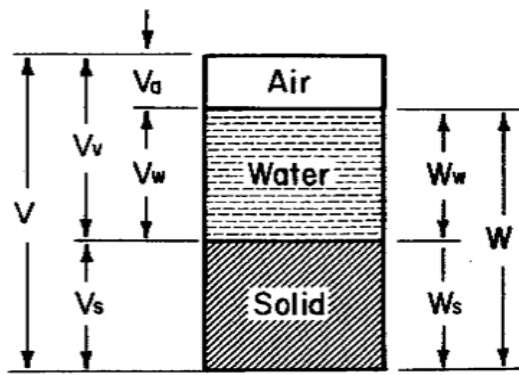
Relations entre γ_d , n et γ_s ou entre γ_d ,
 e et γ_s

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{\gamma_s V_s}{V} = \gamma_s \frac{V - V_v}{V} = \gamma_s (1 - n) \rightarrow n = 1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}$$

$$\gamma_d = \gamma_s (1 - n) = \gamma_s \left(1 - \frac{e}{1 + e}\right) = \gamma_s \left(\frac{1}{1 + e}\right) \rightarrow e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1$$

Relations entre paramètres

V = total volume
 V_v = volume of voids
 V_a = volume of air
 V_w = volume of water
 V_s = volume of solids



W = total weight
 W_w = weight of water
 W_s = weight of solids

Volume Relationships

Void ratio

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

Porosity

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

Degree of saturation

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

Weight-Volume Relationships

Total unit weight (Moist Unit Weight)

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

$$\gamma = \frac{G(1 + w)}{1 + e} \gamma_w$$

$$\gamma = \frac{G + S_r e}{1 + e} \gamma_w$$

$$\gamma_{\text{sat}} = \frac{(G + e)}{1 + e} \gamma_w$$

Quelques valeurs...

▼ **TABLE 2.2** Void Ratio, Moisture Content, and Dry Unit Weight for Some Typical Soils in a Natural State

Type of soil	Void ratio, e	Natural moisture content in a saturated state (%)	Dry unit weight, γ_d	
			lb/ft ³	kN/m ³
Loose uniform sand	0.8	30	92	14.5
Dense uniform sand	0.45	16	115	18
Loose angular-grained silty sand	0.65	25	102	16
Dense angular-grained silty sand	0.4	15	121	19
Stiff clay	0.6	21	108	17
Soft clay	0.9–1.4	30–50	73–93	11.5–14.5
Loess	0.9	25	86	13.5
Soft organic clay	2.5–3.2	90–120	38–51	6–8
Glacial till	0.3	10	134	21

Teneur en eau à la saturation

$$V_w = V_v \qquad V_a = 0 \qquad S_r = \frac{V_w}{V_v} = 1$$

$$w_{sat} = \frac{W_w}{W_s} = \frac{V_w \gamma_w}{V_s \gamma_s} = e \frac{\gamma_w}{\gamma_s} = \frac{e}{G_s}$$

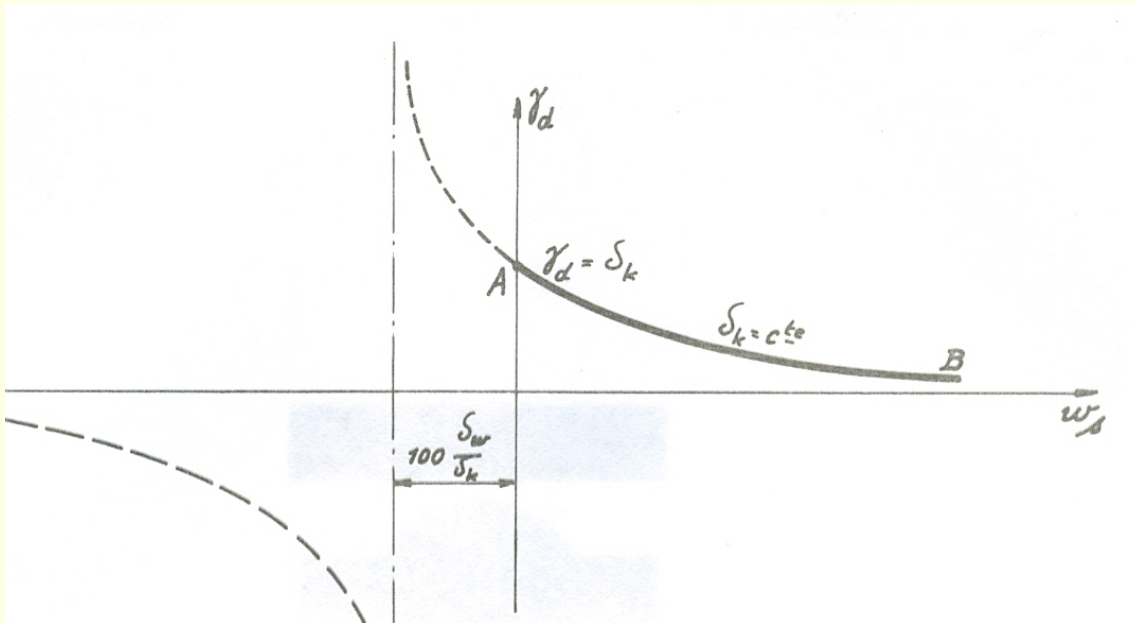
Relations à la saturation

$$w_{sat} = \frac{\gamma_w}{\gamma_s} e = \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \cdot \frac{n}{1-n} = \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \cdot \frac{1 - \frac{\gamma_d}{\gamma_s}}{1 - 1 + \frac{\gamma_d}{\gamma_s}}$$

$$w_{sat} = \gamma_w \left(\frac{1}{\gamma_d} - \frac{1}{\gamma_s} \right) \quad \gamma_d = \frac{1}{\frac{w_{sat}}{\gamma_w} + \frac{1}{\gamma_s}}$$

Courbe de saturation

$$\gamma_d = \frac{1}{\frac{w_{sat}}{\gamma_w} + \frac{1}{\gamma_s}}$$




















Relations à la saturation

- En éliminant γ_d

$$\frac{\gamma_{sat}}{1 + w_{sat}} = \frac{1}{\frac{w_{sat}}{\gamma_w} + \frac{1}{\gamma_s}}$$

$$w_{sat} = \frac{1 - \frac{\gamma_{sat}}{\gamma_s}}{\frac{\gamma_{sat}}{\gamma_w} - 1}$$

Limites de porosité selon les types de sols

Sands $G=2.65$	Well graded	$D_r=100\%$ $n=36.5\%$ $e=0.57$ $w=21.5\%$ $\gamma_d=105.5$ $\gamma'=65.5$ 	$D_r=0\%$ g/cm^3 $n=44.7\%$ $e=0.81$ $\gamma_d=91.5$ lb per cu ft = 1.46 $w=30.5\%$ $\gamma'=57.0$ lb per cu ft = 0.91 
	Uniform	$D_r=100\%$ $n=41.2\%$ $e=0.72$ $w=27.2\%$ $\gamma_d=96.5$ $\gamma'=60.0$ 	$D_r=0\%$ $n=48.7\%$ $e=0.95$ $\gamma_d=85.0$ lb per cu ft = 1.36 $w=35.9\%$ $\gamma'=53.0$ lb per cu ft = 0.83 
Normal inorganic clays $G=2.70$	$I_p=10\%$	$w_p=25\%$ $n=40.2\%$ $e=0.675$ $\gamma_d=100.5$ $\gamma'=63.5$ 	$W_L=35\%$ $n=48.5\%$ $e=0.945$ $\gamma_d=86.5$ lb per cu ft = 1.38 $\gamma'=54.5$ lb per cu ft = 0.88 
	$I_p=20\%$	$w_p=27\%$ $n=42.2\%$ $e=0.730$ $\gamma_d=97.3$ $\gamma'=61.5$ 	$W_L=47\%$ $n=56.0\%$ $e=1.270$ $\gamma_d=74.0$ lb per cu ft = 1.18 $\gamma'=46.8$ lb per cu ft = 0.75 
	$I_p=40\%$	$w_p=30\%$ $n=44.7\%$ $e=0.810$ $\gamma_d=93.0$ $\gamma'=58.5$ 	$W_L=70\%$ $n=65.4\%$ $e=1.890$ $\gamma_d=58.2$ lb per cu ft = 0.93 $\gamma'=36.7$ lb per cu ft = 0.59 
	$I_p=60\%$	$w_p=35\%$ $n=48.5\%$ $e=0.945$ $\gamma_d=86.5$ $\gamma'=54.5$ 	$W_L=95\%$ $n=72.0$ $e=2.570$ $\gamma_d=47.0$ lb per cu ft = 0.75 $\gamma'=29.7$ lb per cu ft = 0.43 
Diatomaceous earth $G=2.65$ $I_p=0\%$	$w_p=115\%$ $n=75.2\%$ $e=3.05$ $\gamma_d=40.7$ $\gamma'=25.4$ 	$W_L=115\%$ $n=75.2\%$ $e=3.05$ $\gamma_d=40.7$ lb per cu ft = 0.65 $\gamma'=25.4$ lb per cu ft = 0.41 	
Mexico City clay $I_p=375\%$	$w_p=125\%$ $n=76.8\%$ $e=3.31$ $\gamma_d=38.4$ $\gamma'=23.9$ 	$w=325\%$ $n=89.5\%$ $e=8.62$ $\gamma_d=17.2$ $\gamma'=10.7$ 	$w_L=500\%$ $n=93.0\%$ $e=13.25$ $\gamma_d=11.6=0.18$ $\gamma'=7.3=0.12$ 

Compacité relative

Dense, serré, très compact (dense) ↔ Lâche, très peu compact (loose)

Porosité minimale ↔ Porosité maximale

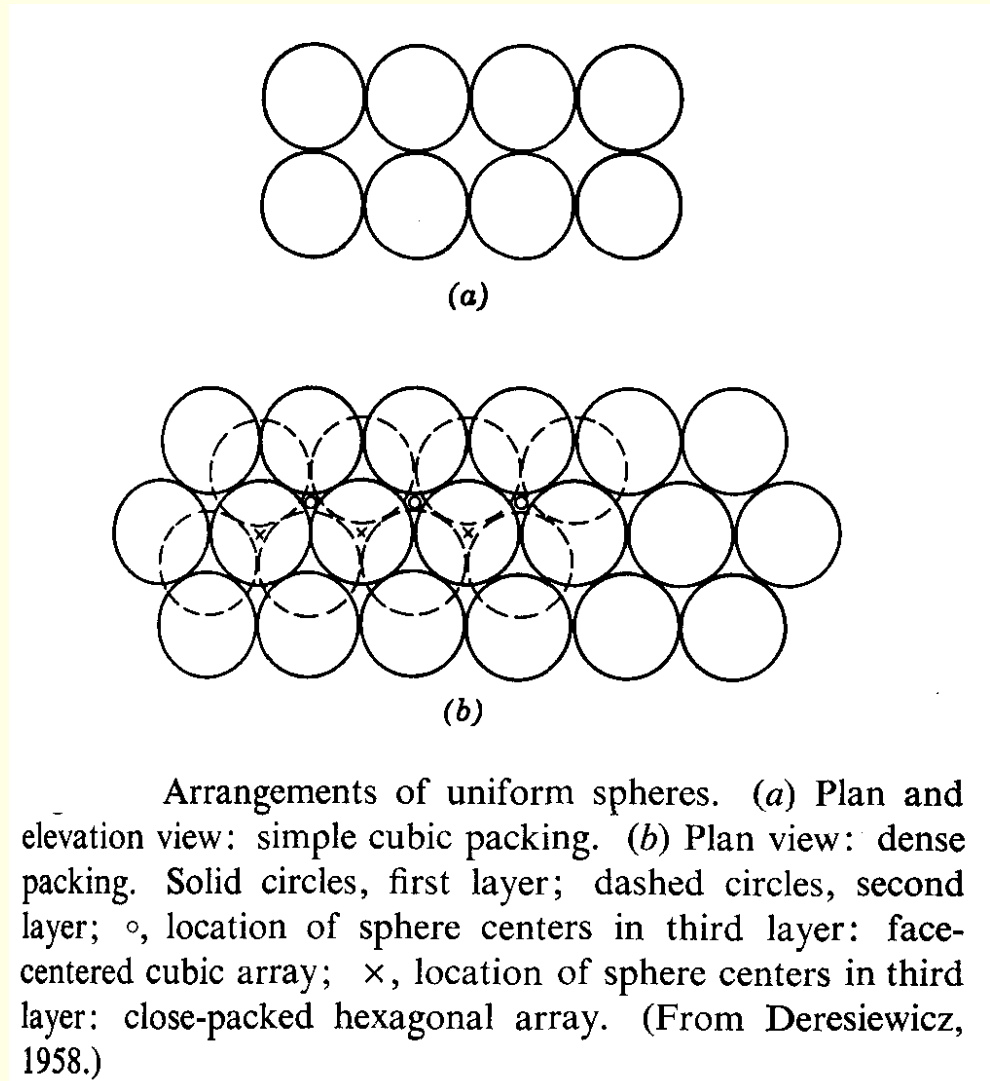
Indice de vides minimale ↔ Indice de vides maximale

Poids volumique sec maximale ↔ Poids volumique sec minimale





État le plus dense possible ↔ Etat le plus lâche possible

Limites de porosité

- Empilements théoriques de sphères
- Le plus dense : $e=0.35$; $n=25.9\%$
- Le moins dense : $e=0.91$; $n=47.6\%$



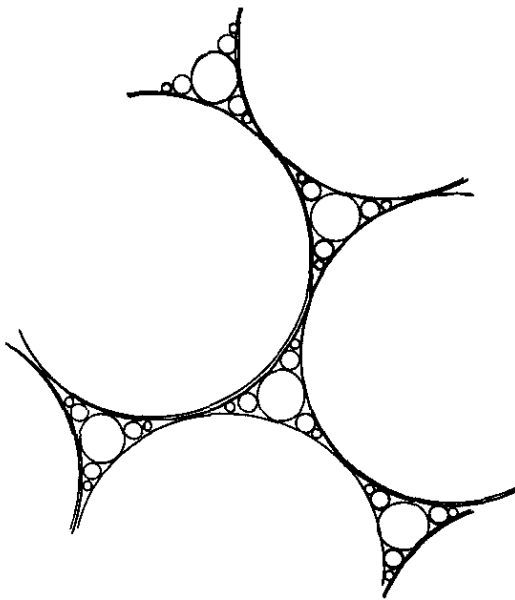
Limites de compacité des sables

Sands $G = 2.65$	Well graded	$D_r = 100\%$ $n = 36.5\%$ $e = 0.57$ $w = 21.5\%$ $\gamma_d = 105.5$ $\gamma' = 65.5$ 	 $n = 44.7\%$ $e = 0.81$ $D_r = 0\%$ $\gamma_d = 91.5 \text{ lb per cu ft} = 1.46$ $w = 30.5\%$ $\gamma' = 57.0 \text{ lb per cu ft} = 0.91$
	Uniform.	$D_r = 100\%$ $n = 41.2\%$ $e = 0.72$ $w = 27.2\%$ $\gamma_d = 96.5$ $\gamma' = 60.0$ 	 $n = 48.7\%$ $e = 0.95$ $D_r = 0\%$ $\gamma_d = 85.0 \text{ lb per cu ft} = 1.36$ $w = 35.9\%$ $\gamma' = 53.0 \text{ lb per cu ft} = 0.83$

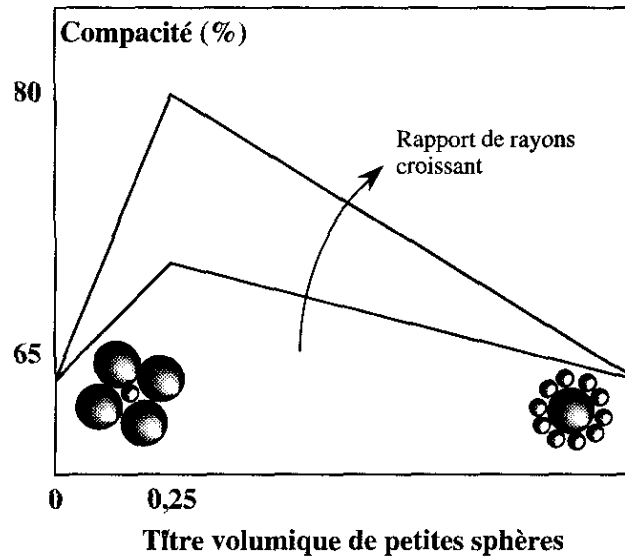
- Coefficient d 'uniformité
 - plus uniforme → plus de vides
- Sphéricité et rondeur
 - plus angulaire → plus de vides

Influence de la granulométrie

- Empilements théoriques de sphères

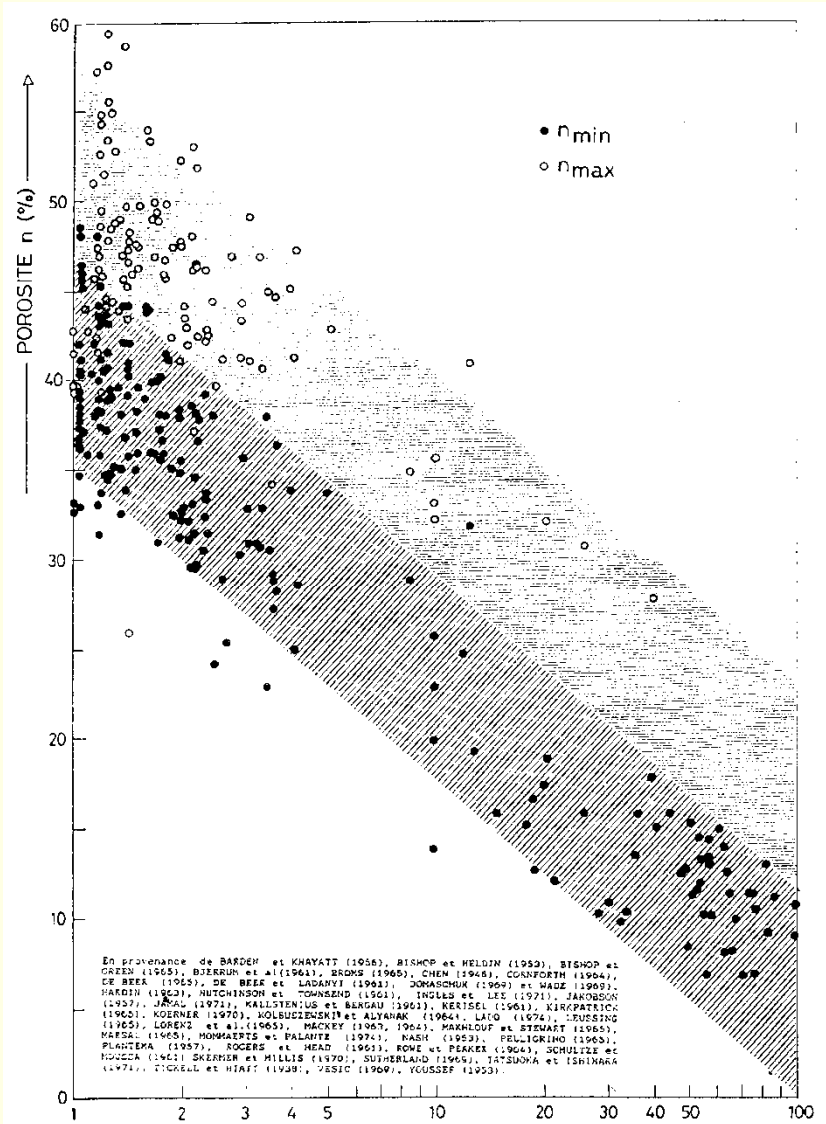


(a)



(b)

(a) Le remplissage apollonien de disques est construit de façon itérative en partant des plus gros disques en contact et en remplissant les vides par les disques les plus grands possibles d'une classe inférieure. (b) La compacité d'un mélange binaire de sphères présente un maximum pour une teneur en petites sphères de l'ordre de 25%. Cette compacité maximale augmente quand le rapport des rayons croît.



En présence de BARDH et KNAVATT (1968), BISHOP et HELDIN (1959), BISHOP et GREEN (1965), BIERRUN et al (1961), BRONS (1965), CHEN (1968), COMFORT (1964), DE BEER (1965), DE BEER et LADANYI (1961), DONASCHUK (1969) et MAZE (1969), HAREN (1962), HUTCHINSON et TOMANEND (1961), INGLE et LES (1971), JAROSON (1952), JACO (1971), KALLISTENIUS et BANGAU (1961), KREISEL (1961), KIRKPATRICK (1960), KOERNER (1970), KOLBUZDZINSKI et ALYAHAK (1964), LAO (1974), LEUSING (1965), LORENZ et al (1965), PACEY (1967, 1962), MAKHLOUF et STEWART (1965), MARGA (1965), MORGENTHAU et PALANTE (1972), RABIE (1953), PELLICERINO (1960), PLANTEMA (1957), ROGERS et HEAD (1961), ROME et PEAKER (1964), SCHULTZ et BOUCCA (1961), SKERMER et MILLIS (1970), SUDBERLAND (1964), TATSUNOKA et ISHINARA (1971), TIGHELL et HERAT (1968), ZESIC (1969), VOUSSEF (1953).

Influence de l'uniformité

- Empilements réels

Indice de densité ou densité relative

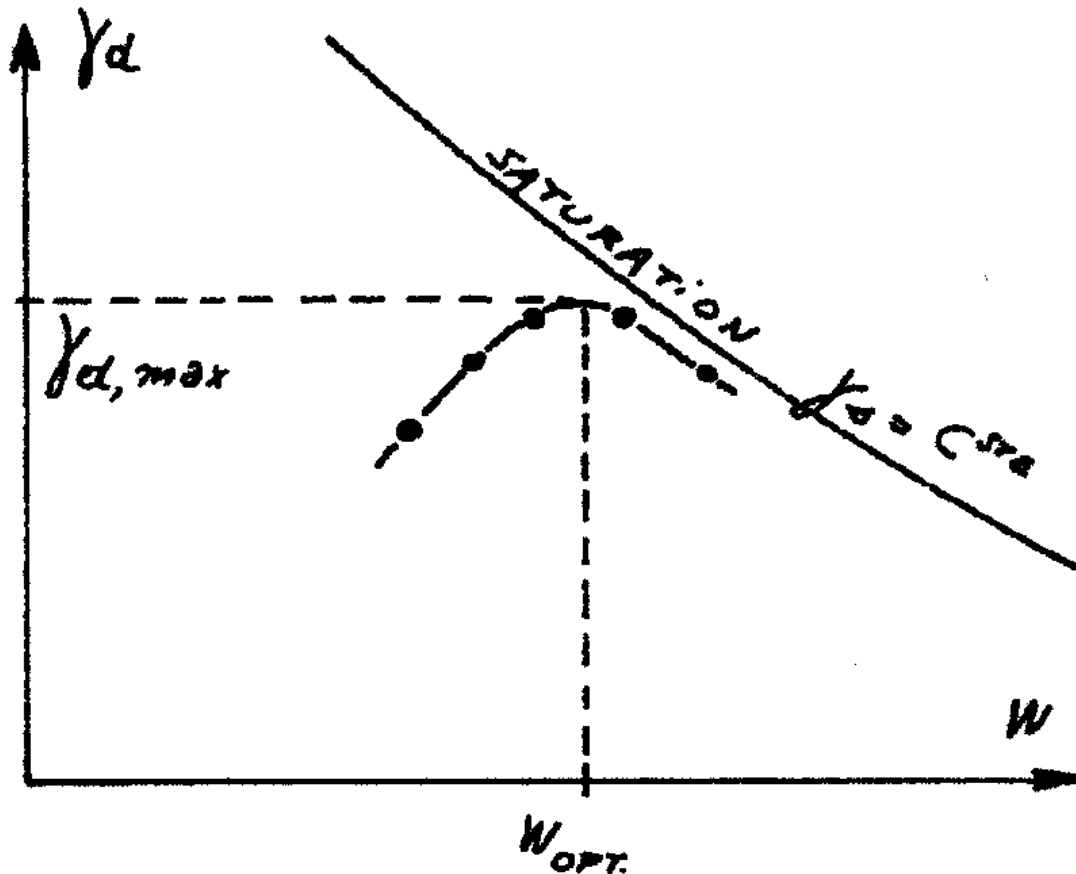
$$I_{D,e} = D_{r,e} = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}}$$

e_{\min} est l'indice de vides du sol à l'état le plus lâche possible
 e_{\max} est l'indice de vides du sol à l'état le plus serré possible
 e est l'indice de vides réel du sol

$$I_{D,n} = D_{r,n} = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}}$$

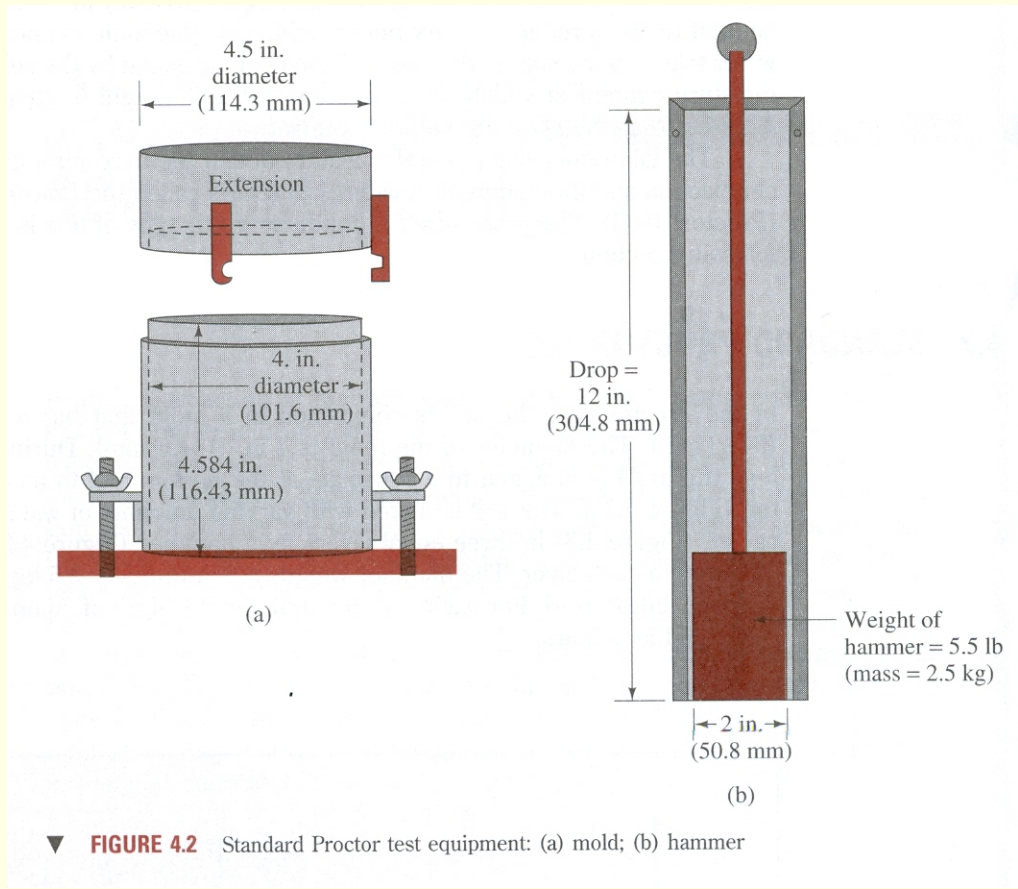
Compacité maximum → Diagramme Proctor

- courbe de saturation
- teneur en eau optimum
- énergie de compactage
- indice de compacité

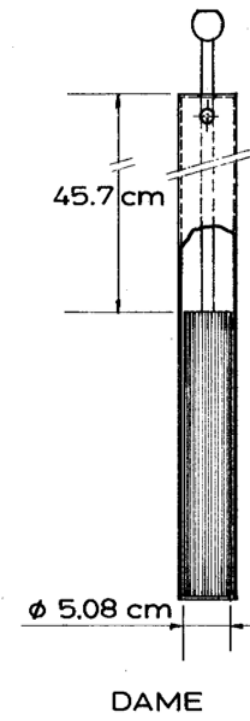
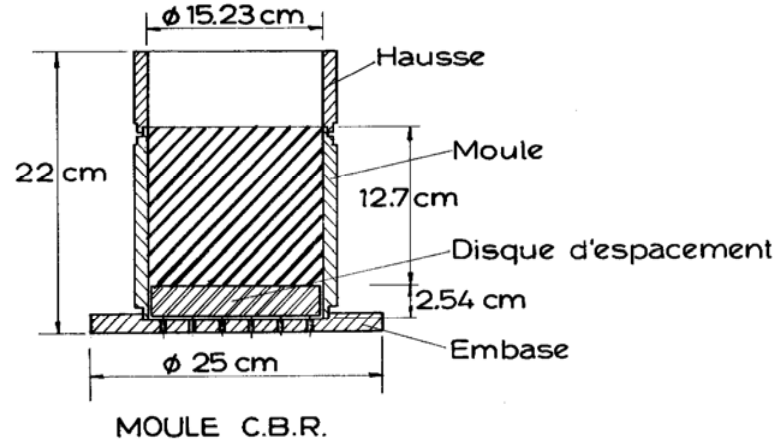


$$D_c = \frac{\gamma_d}{\gamma_{d,max,Proctor}}$$

Essai Proctor



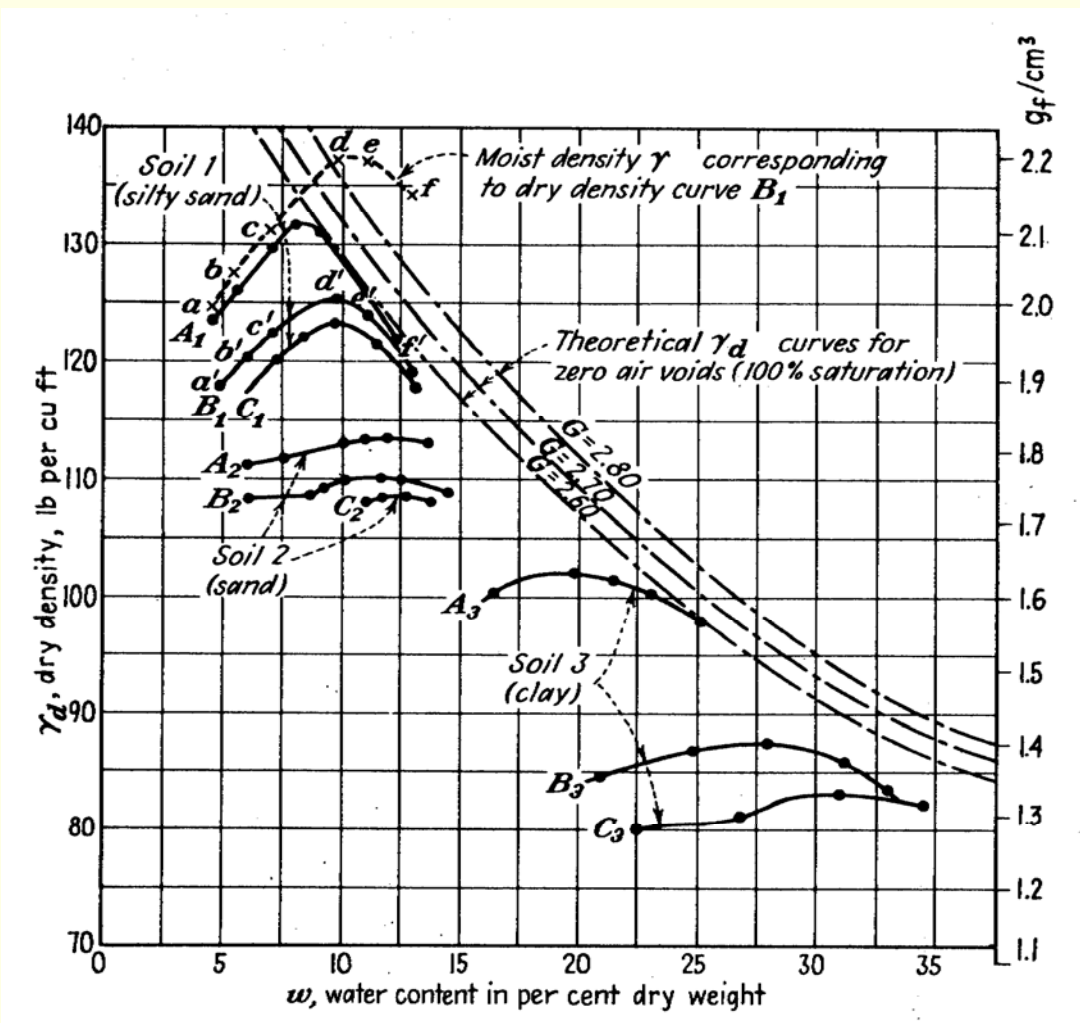
Energie de compactage



TYPE D ESSAI PROCTOR	TYPE DE MOULE	DIMENSIONS INTERIEURES DU MOULE		VOLUME DU MOULE dm3	POIDS DE LA DAME kg	HAUTEUR DE CHUTE DE LA DAME cm	NOMBRE DE COUCHES	NOMBRE DE COUPS PAR COUCHE	ENERGIE DE COM-PACTAGE kgm/dm3
		Diamètre cm	Hauteur cm						
Standard AASHO	Proctor	10.15	11.63	0.941	2.490	30.5	3	25	60.5
	C.B.R.	15.23	12.70	2.317				55	54
Modifié	Proctor	10.15	11.63	0.941	4.535	45.7	5	25	275
	C.B.R.	15.23	12.70	2.317				55	245

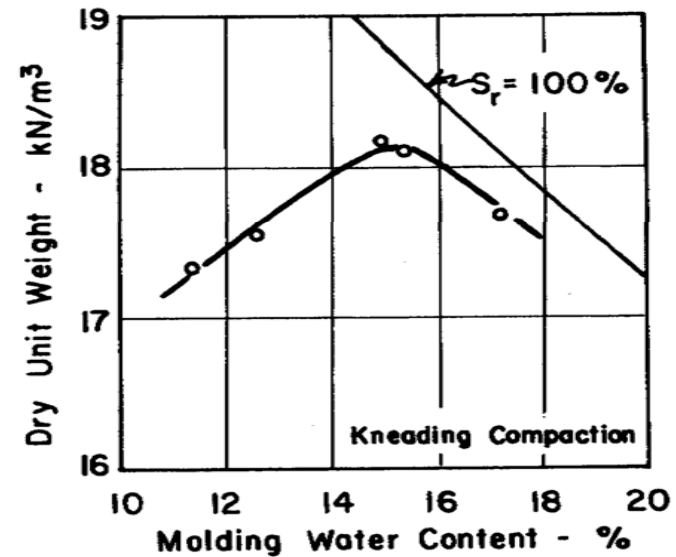
ESSAI PROCTOR

Résultats types d'essais Proctor



Relation entre courbe Proctor et résistance au cisaillement

- Maximum de résistance sur la branche sèche de la courbe Proctor

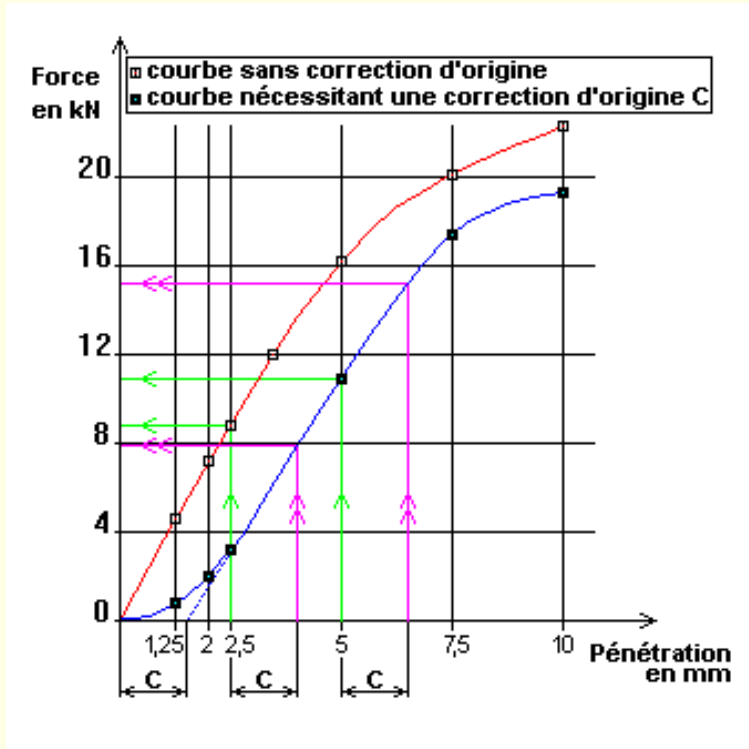


Essai CBR

- Même objectif : mesure de la compacité mais de façon statique



Détermination d'un indice CBR



• L' **indice CBR** (I.CBR) exprime en % le rapport entre les pressions produisant dans le même temps un enfoncement donné dans le sol étudié d'une part et dans un matériau type d'autre part. Par définition cet indice est pris égal à la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$- I.CBR_{25} = 100 \cdot F_{25} / 13,35$$

$$- I.CBR_{50} = 100 \cdot F_{50} / 20$$

$$- \text{et } I.CBR = \max (I.CBR_{25} ; I.CBR_{50})$$

– Où F_{25} : Force (en KN) à 2,5 mm d'enfoncement

– F_{50} : Force (en KN) à 5 mm d'enfoncement

– 13,35 : Force (en KN) à 2,5 mm d'enfoncement pour le matériau type

– 20 : Force (en KN) à 5 mm d'enfoncement pour le matériau type

Essai CBR in situ

