



Les Essais de la Géotechnique Routière

ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE LES NORMES

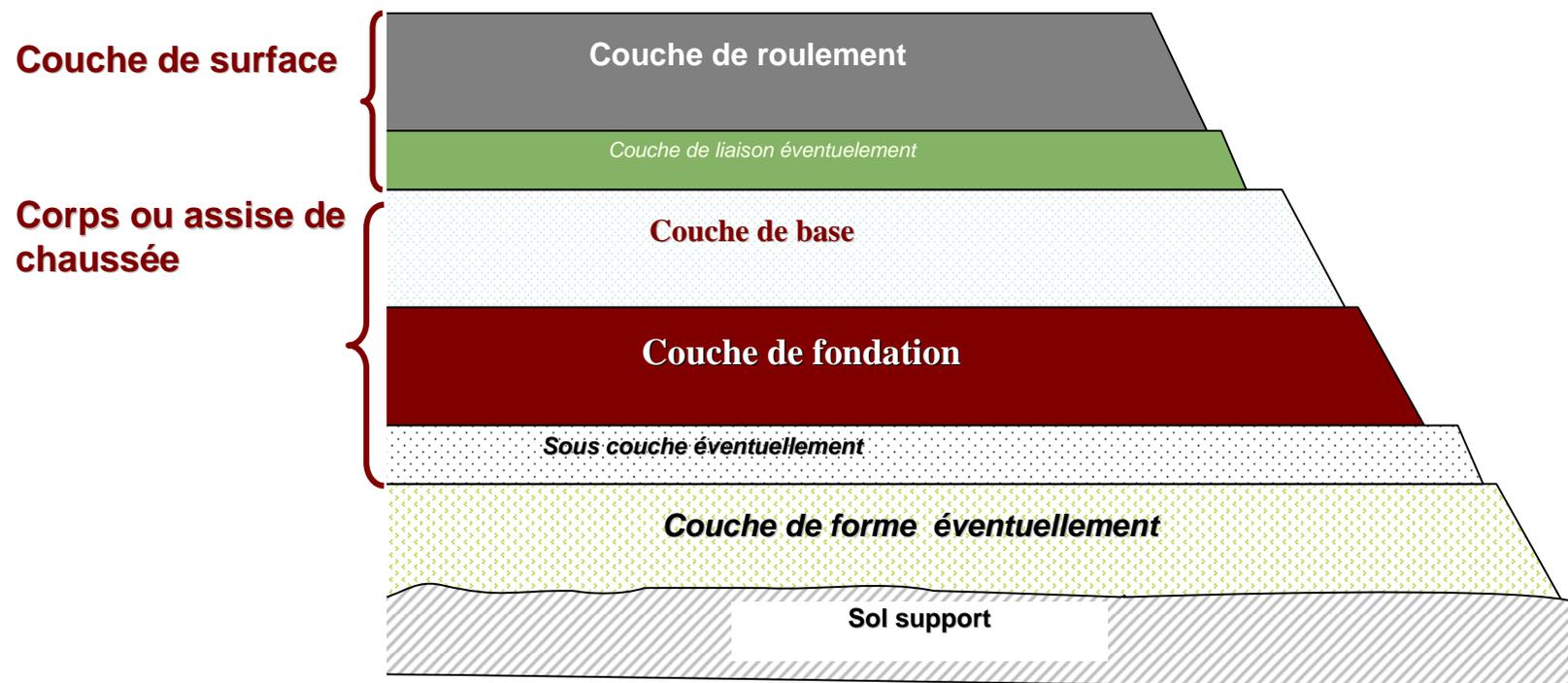
Mehrez KHEMAKHEM

ISSET de Sfax – ATMS - AIT

LES CHAUSSEES



La chaussée peut être schématisée par une succession d'un certain nombre de couches de natures et d'épaisseurs différents.















Le compactage se définit comme un procédé permettant d'augmenter la densité et la capacité de charge d'un matériau grâce à l'application de forces extérieures statiques ou dynamiques.

Dans les domaines de la construction, la capacité de charge et la stabilité d'un empierrement, d'un sol ou d'un revêtement bitumineux, leur imperméabilité et leur aptitude à supporter les charges dépendent de la qualité du compactage auquel le matériau est soumis.



A titre d'exemple, une augmentation de 1% de la densité équivaut normalement à une augmentation d'au moins 10 à 15% de la capacité de charge.

Si un compactage est mal exécuté ou impropre, des affaissements ou autres défauts sont à craindre, avec pour conséquence des travaux de rénovation et/ou d'entretien très importants.



Les applications du compactage sont

- les routes, les autoroutes,***
- les barrages,***
- les remblais,***
- les fondations des bâtiments,***
- les stades,***
- les parkings, les chemins de fer, ..***

La nature des matériaux et l'épaisseur de la couche à compacter varient suivant la nature de l'ouvrage



LES CARACTÉRISTIQUES ET L'APTITUDE D'UN SOL AU COMPACTAGE DÉPENDENT EN GRANDE PARTIE

- **DES PARAMÈTRES DE NATURE**
- **DES PARAMETRES D'ÉTAT**

LES RÉSULTATS DU COMPACTAGE INFLUENCENT CONSIDÉRABLEMENT LES :

- **PARAMÈTRES DE COMPORTEMENT MÉCANIQUE**
- **LES PARAMETRES DE COMPORTEMENT HYDRAULIQUE.**



OBJECTIFS DU COMPACTAGE

Compacter un sol, un remblai, une plate-forme, une couche de forme, un corps de chaussée, un noyau de barrage en terre, un enrobé, c'est réduire le volume des vides entre les grains.

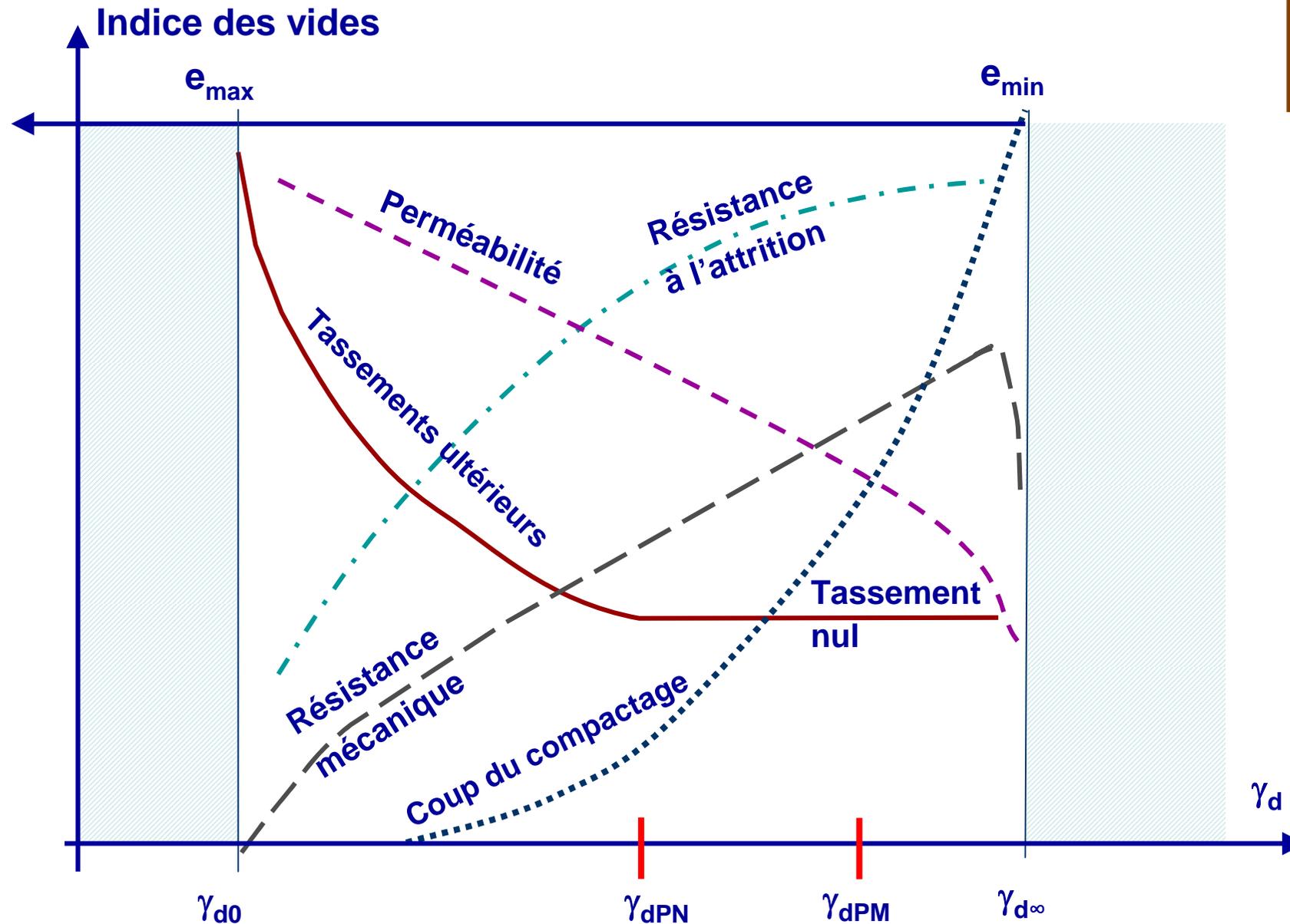
Le compactage est, d'une manière générale, l'ensemble des mesures prises afin de densifier le sol pour améliorer ses propriétés mécaniques.

Les autres procédés d'amélioration consistent à remplir les vides par un liant (ciment, chaux, bitume,...), ils sont connus sous le nom de stabilisation.



L'amélioration des qualités d'un sol a pour objet:

- **pour un remblai, d'éviter des tassements et des possibilités de glissement;**
- **pour un noyau de barrage, de réaliser un massif étanche, non fissurant;**
- **pour une couche de fondation de chaussée d'améliorer la force portante et la rigidité;**
- **lors de la réalisation d'une piste ou d'une route en terre, d'adapter les qualités du sol en place ou de la couche d'amélioration;**
- **dans tous les cas, de réduire la perméabilité et la susceptibilité à l'absorption de l'eau.**



Objectifs du compactage



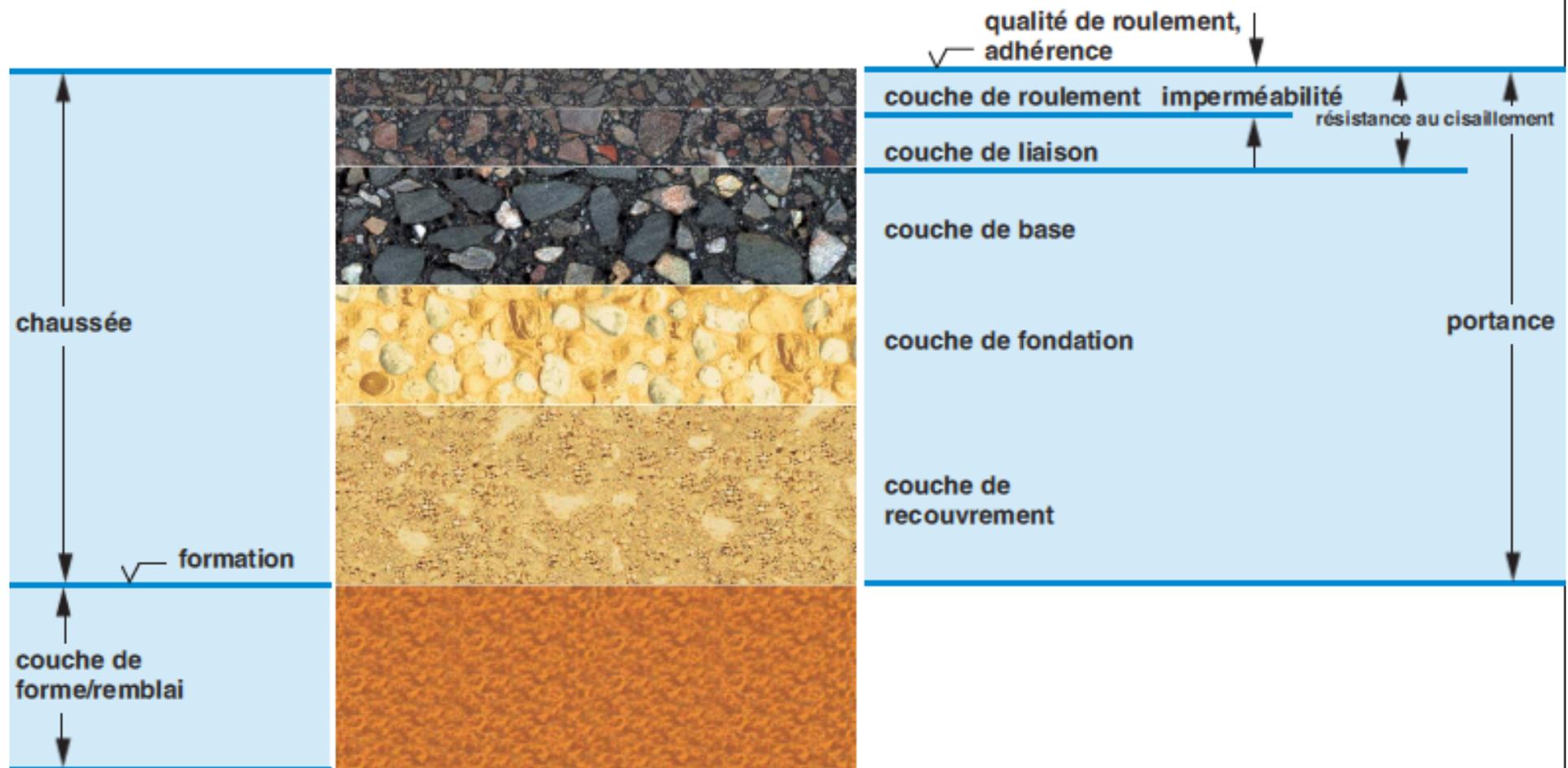
Objectifs du compactage

Type d'ouvrage Objectifs	Remblai	Couche de forme de routes ou voies ferrées	Assises de chaussée	Enrobé de chaussée	Plate-forme pour ouvrages et bâtiments	Noyau de barrage en terre	Corps de barrage en terre
Minimisation ou suppression des tassements	P	S	S	P	P	P	S
Suppression des tassements différentiels	E				E		
Amélioration des caractéristiques mécaniques	S	P	E	E	E	P	E
Diminution de la perméabilité	M	M	S	P		E	
Diminution de l'attrition			S	S			

**E : objectif essentiel ; P: objectif principal ;
S: objectif secondaire ; M: objectif accessoire**



Structure et propriétés d'une chaussée souple



BA01f-03/03



Compactage des sols

Granulat fin		Gros granulat		Enrochements en vrac	
Argile	Limon	Sable	Gravier	Pierres	Rochers
Applications:		Applications:		Applications:	
<ul style="list-style-type: none"> • la construction de barrages • les remblais pour la construction de routes, voies ferrées et aéroports, • les tranchées et remblayages, • la construction des remblais sanitaires. 		<ul style="list-style-type: none"> • les couches de fondation des remblais pour la construction de routes, voies ferrées et aéroports, • les fondations d'immeubles, • les tranchées et remblayages. 		<ul style="list-style-type: none"> • la construction de barrages, • les remblais pour la construction de routes, voies ferrées et aéroports, • fondations d'immeubles. 	
argile < 0,002mm limon 0,002-0,06mm		sable 0,06 - 2 mm gravier 2 - 60 mm		pierres > 60 mm rochers > 100 mm	
					
Aptitude au compactage		Aptitude au compactage		Aptitude au compactage	
<ul style="list-style-type: none"> • difficile à compacter en raison de la cohésion, • l'effet du compactage dépend fortement du degré d'humidité, • le matériau exige une forte énergie de compactage. 		<ul style="list-style-type: none"> • dépend de la granulométrie, • un compactage trop important peut être gênant. 		<ul style="list-style-type: none"> • l'épaisseur de la couche doit être trois fois supérieure à la taille maximale des particules • le matériau réclame une énergie de compactage élevée. 	
Engins de compactage:		Engins de compactage:		Engins de compactage	
<ul style="list-style-type: none"> • rouleaux monocylindre lourds et moyens (cylindre lisse et à pieds dameurs), • compacteurs de tranchées et plaques lourdes. 		<ul style="list-style-type: none"> • rouleaux tandem vibrants et rouleaux monocylindres (cylindre lisse), • plaques lourdes et moyennes. 		<ul style="list-style-type: none"> • rouleaux monocylindre lourds, • plaques lourdes. 	



Facteurs qui influencent le compactage :

- *Teneur en eau :*

- si sol trop sec : difficulté de compactage → on doit arroser le sol
- si sol avec bonne teneur en eau : facilité de compactage
- si sol trop humide : difficulté de compactage → le mélanger avec un sol sec ou l'assécher par aération ou par scarification.

- *Nombre de passes du compacteur :*

La masse volumique du sol augmente avec une augmentation du nombre de passes, est atteint un maximum. Un trop grand nombre de passes peut avoir pour effet de briser les particules, donc de produire des fines susceptibles d'augmenter la capillarité des matériaux. Ceci a également pour effet de faire augmenter les coûts du compactage.



- Vitesse du compacteur :

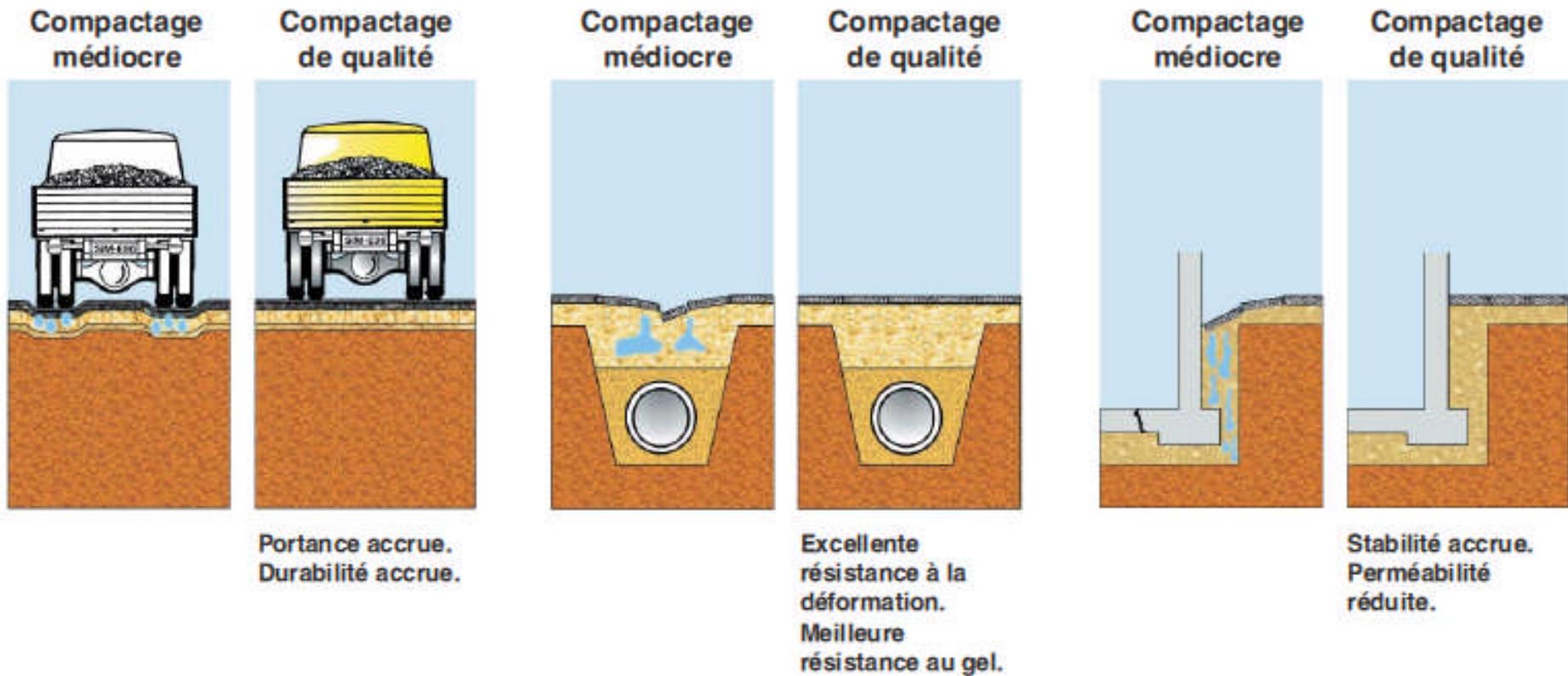
Avec les compacteurs vibrants pour un nombre de passes données, la masse volumique sera plus grande avec une faible vitesse. Par contre, si cette vitesse est trop faible, ceci a pour effet de faire augmenter les coûts du compactage.

- L'épaisseur de la couche compactée :

Etant donné que la masse volumique dans une couche compactée de grande épaisseur décroît normalement du haut vers le bas, elle doit être plus élevée en surface que celle exigée dans les spécifications pour obtenir à la base de cette couche la masse volumique désirée. En réduisant l'épaisseur des couches, le surplus de compactage dans la partie supérieure peut être évité ; cette différence est plus appréciable dans les sols cohérents que granulaires. Pour ces raisons, plusieurs organismes limitent l'épaisseur des couches à 30 cm même avec de compacteurs très puissants.

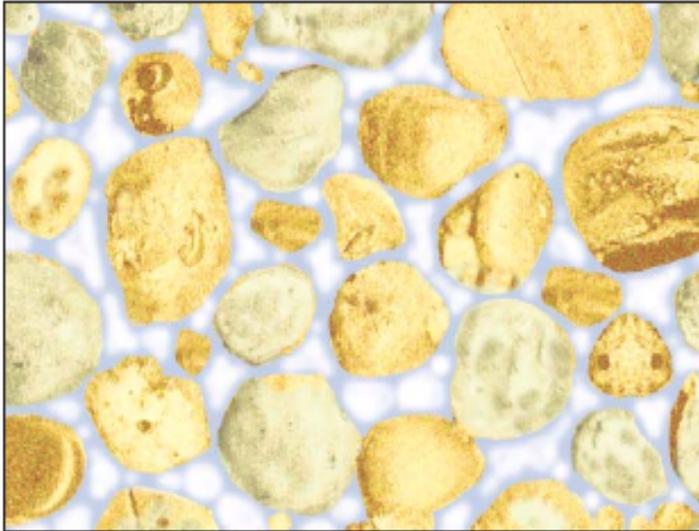


Objectifs du compactage



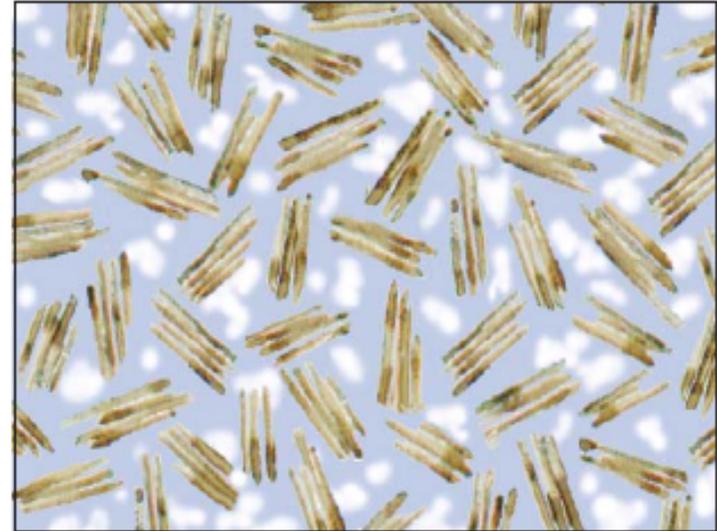
Compactage des sols

Granuleux

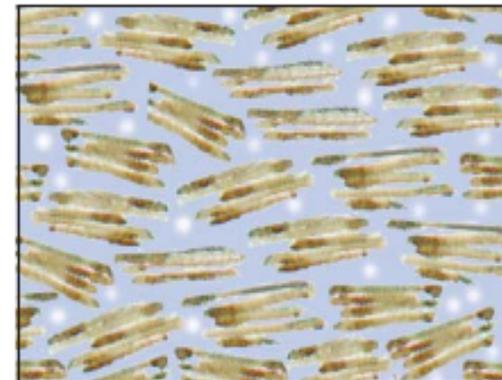
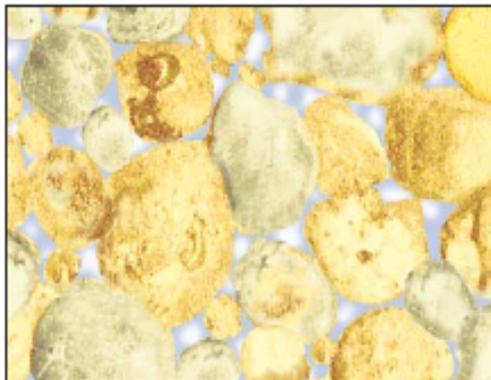


avant compactage

Cohérent



après compactage





CLASSIFICATION DES SOLS

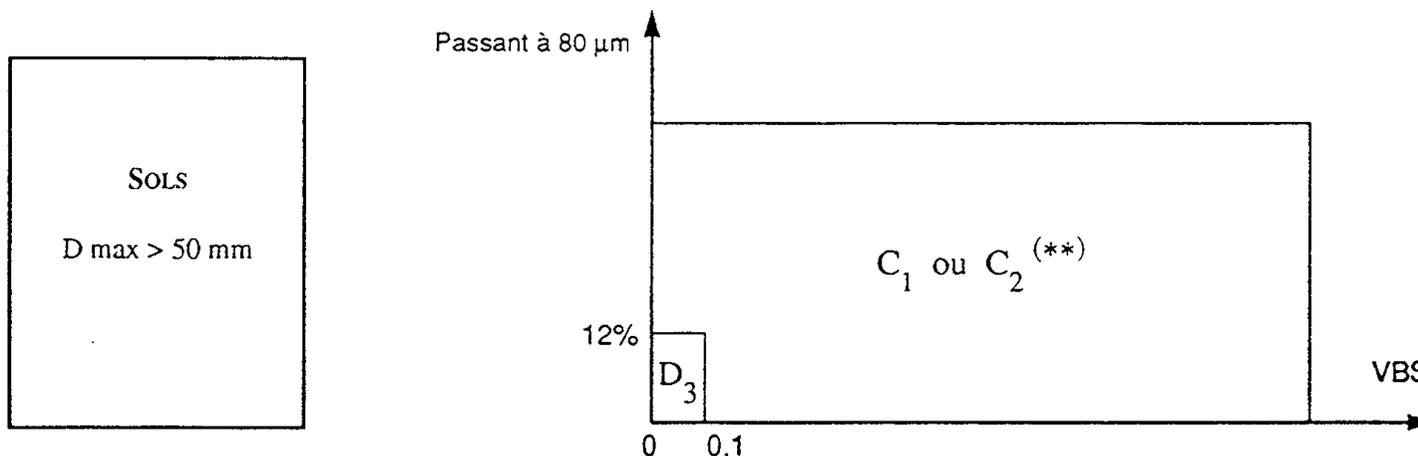
Norme NF P 11-300

Exécution des terrassements

Classification des matériaux utilisables dans la construction des remblais et des couches de forme d'infrastructures routières

La norme concerne principalement les plates-formes routières. Son emploi peut toutefois être étendu à d'autres types d'ouvrages : **voies ferrées, plates-formes industrielles, terrassements pour aéroports etc.** , sous réserve de vérifier que les paramètres pris en compte sont significatifs.

CLASSIFICATION DES SOLS



MATÉRIAUX ROCHEUX	Roches sédimentaires	Roches carbonatées	Craies	R ₁	
			Calcaires	R ₂	
		Roches argileuses	Marnes, argilites, pélites...		R ₃
		Roches siliceuses	Grès, poudingues, brèches...		R ₄
		Roches salines	Sel gemme, gypse		R ₅
	Roches magmatiques et métamorphiques	Granites, basaltes, andésites..., gneiss..., schistes métamorphiques et ardoisiers...		R ₆	
MATÉRIAUX PARTICULIERS	Sols organiques, sous-produits industriels			F	

* Matériaux pour lesquels la mesure de I_p est à retenir comme base de classement. Pour les autres matériaux on utilisera la VBS.

** C₁ : matériaux roulés et matériaux anguleux peu charpentés (0/50 > 60 à 80 %)

C₂ : matériaux anguleux très charpentés (0/50 ≤ 60 à 80 %)

TENEUR EN EAU



Paramètres d'état :

La teneur en eau :

Elle est déterminée

- **soit par étuvage**
- **soit par la méthode du four à micro-onde et sera notée w_{mo} ,**
- **soit à la plaque chauffante et sera notée w_{pc} .**

TENEUR EN EAU



Paramètres d'état :

La teneur en eau par étuvage sera notée w,

Normes spécifiques ;

-NF P 94-050

- ASTM D 2216

- BS 1377 - 2



**Balance de
précision**



Dessiccateur



Etuve

Température 50 °C ou 105 °C

TENEUR EN EAU



MÉTHODE PAR ÉTUVAGE : *Masse minimale de matériau nécessaire pour déterminer la teneur en eau en fonction de la dimension des éléments passant à travers le tamis à maille carrée d'ouverture d_m*

NF P 94-050

d_m (μm)	400	500	630	800
Masse (g)	20	50	100	150

d_m (mm)	1	5	6,3	8	10	12,5	16	20	25	31,5	40	50	63	80	$d_m > 80$ mm
Masse (kg)	0,2	0,3	0,4	0,5	0,8	1,2	2	3	5	8	12	20	30	50	$m = 6 \cdot 10^{-6} \cdot d_m^{3,66}$

ASTM D 2215 : de 20 g (< 2 mm) jusqu'à 50 kg (> 75 mm)

BS 1377-2 : de 30 g (sols fins) jusqu'à > 3 kg (gros éléments)

TENEUR EN EAU



La teneur en eau par étuvage

Introduire l'ensemble dans une étuve à **105 °C** pour les matériaux insensibles à la chaleur et à **50 °C** pour les matériaux sensibles à la chaleur (organiques, gypsifère)



Dessiccateur pour matériaux < 400 µm



Balance de précision

TENEUR EN EAU



Paramètres d'état :

*La teneur en eau par la méthode du four à micro-
onde, sera notée W_{mo}*



Four Micro-ondes



Balance de précision



Récipients non métalliques

TENEUR EN EAU



Paramètres d'état :

*La teneur en eau par la méthode du four à micro-
onde, sera notée W_{mo}*

Normes spécifiques ;

- NF P 94-049-1
- ASTM D 4643

Four Micro-ondes

- NF P 94-049-1 : Puissance restituée mini 1.5 kW
- ASTM D 4643 : Puissance mini 700 W

TENEUR EN EAU



Paramètres d'état :

Méthode du four à micro-onde, sera notée W_{mo}

Masse minimale de matériau :

Norme NF P 049-1 : identique par étuvage, $m \text{ (kg)} < \frac{V}{5} \text{ (litres)}$

Norme ASTM D 4643 :

D < 2 mm : 100 à 200 g

D < 4.75 mm : 300 à 500 g

D < 19 mm : 500 à 1000 g

TENEUR EN EAU MICRO-ONDES



S'applique aux classes de matériaux suivantes identifiées par la norme **NF P 11-300** :

- A1 ;
- B1, B2, B3, B4, B5 ;
- C (toutes les sous-classes dont la fraction 0/50 est un sol des classes A et B citées ci-dessus) ;
- D1, D2, D3 ;
- R1, R2, R31, R4, R6 ;
- F2, F3, F8.
- A2, A3;
- B6;
- C1 A2, C1 A3, C1 B6;
- C2 A2, C2 A3, C2 B;
- R32, R33, R34 ;
- F4.

**Vérifier avec
méthode étuvage**

TENEUR EN EAU MICRO-ONDES



N'est pas applicable aux matériaux gypsifères, organiques ou très plastiques des classes suivantes (NF P 11-300) :

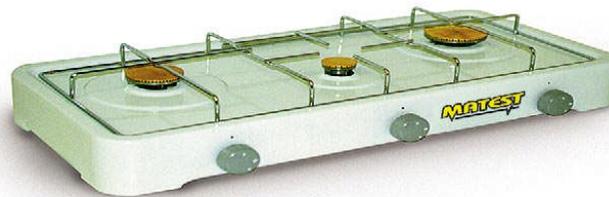
- A4 ;
- R5 ;
- F1, F5, F6, F7.

TENEUR EN EAU PLAQUE CHAUFFANTE



Paramètres d'état :

La teneur en eau à la plaque chauffante ou panneaux rayonnants (NF P 94-049-2) et sera notée W_{pc}



flamme vive, panneaux à rayonnement infrarouge, plaque chauffage électrique ;



Balance de précision



Bac métallique

TENEUR EN EAU PLAQUE CHAUFFANTE



S'applique aux classes de matériaux suivantes identifiées par la norme NF P 11-300 :

- A1 ;
- B1, B2, B3, B4, B5 ;
- C (toutes les sous-classes dont la fraction 0/50 est un sol des classes A et B citées ci-dessus) ;
- D1, D2, D3 ;
- R1, R2, R31, R4, R6 ;
- F2, F3, F8.
- A2, A3;
- B6;
- C1 A2, C1 A3, C1 B6;
- C2 A2, C2 A3, C2 B;
- R32, R33, R34 ;
- F4.

**Vérifier avec
méthode étuvage**

TENEUR EN EAU PLAQUE CHAUFFANTE



N'est pas applicable aux matériaux gypsifères, organiques ou très plastiques des classes suivantes (NF P 11-300) :

- A4 ;
- R5 ;
- F1, F5, F6, F7.

LIMITES D'ATTERBERG



LIMITE DE LIQUIDITÉ À LA COUPELLE

LIMITE DE PLASTICITÉ AU ROULEAU

LIMITE DE LIQUIDITÉ AU CÔNE

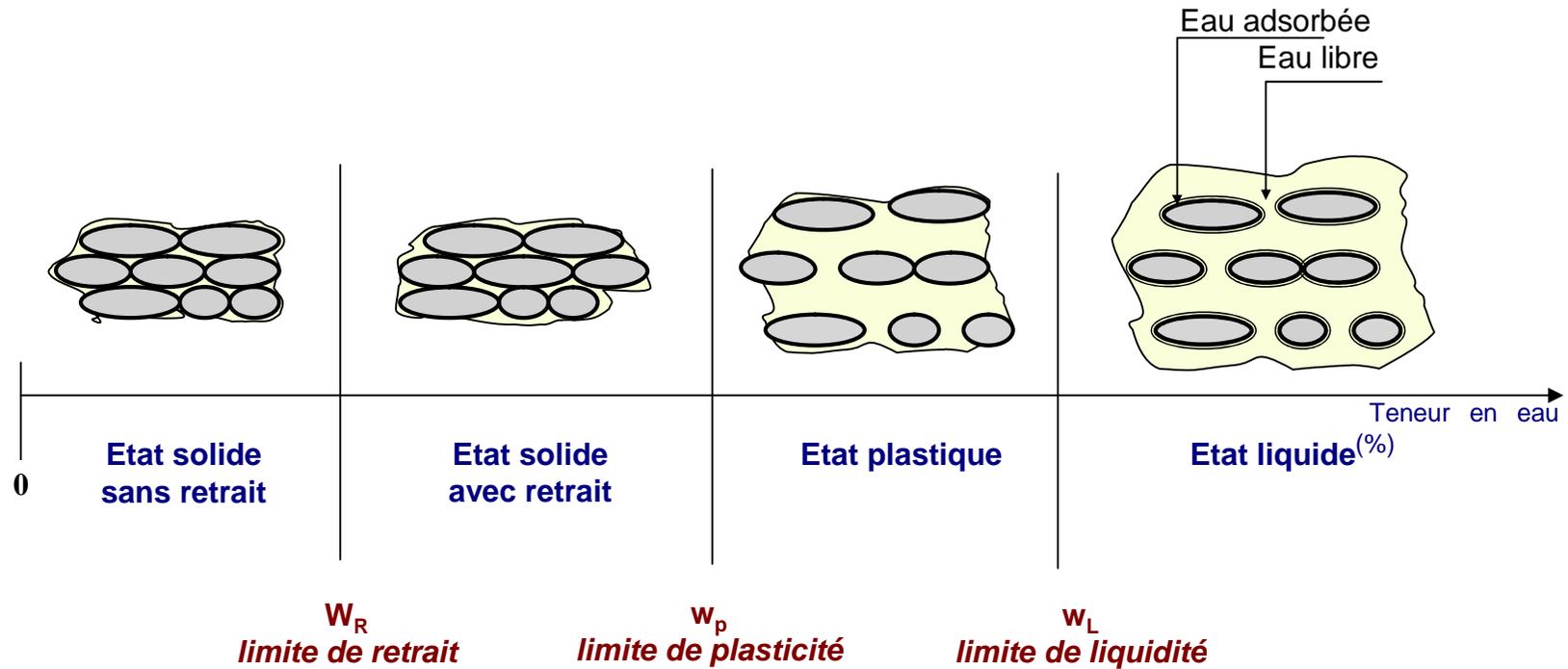
OBJECTIF:

Identifier un sol et caractériser sa nature et son état au moyen de son indice de consistance.

MATERIAU TESTE :

L'échantillon du sol à analyser passe à travers le tamis de 400 μm ou 425 μm .

LES LIMITES D'ATTERBERG



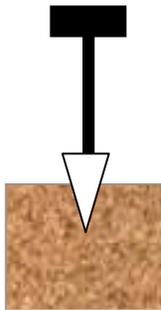
LIMITES D'ATTERBERG

Limite de plasticité au rouleau : Déterminer la teneur en eau pour laquelle un rouleau de sol, de dimension fixée et confectionné manuellement, se fissure.



Limite de plasticité

Limite de liquidité – Méthode du cône de pénétration:
Mesurer l'enfoncement d'un cône dans un échantillon de sol après un temps fixé.



Méthode du cône de pénétration

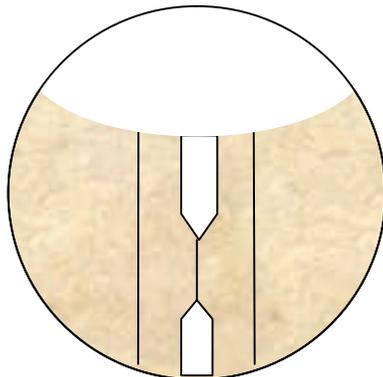




LIMITES D'ATTERBERG

LIMITE DE LIQUIDITÉ À LA COUPELLE

Limite de liquidité à la coupelle : Déterminer la teneur en eau pour laquelle une rainure pratiquée dans un sol placé dans une coupelle soumis à des chocs répétés est fermé sur une distance donnée.



Limite à la coupelle



LIMITE DE PLASTICITE

Méthode de la coupelle



Normes spécifiques :

- NF P 94-051
- ASTM D 4318
- BS 1377-2



LIMITE DE PLASTICITE

Méthode de la coupelle



Norme	Coupelle		Socle
NF P 94-051	Lisse et rugueuse	En laiton chromé	Bois bakéité
ASTM D 4318	Lisse	En laiton	Caoutchouc dur
BS 1377-2	Lisse	En laiton	Caoutchouc dur



LIMITE DE PLASTICITE



Méthode de la coupelle

Norme	Diamètre du sol	Fourchette du nombre de coups	Distance de fermeture	Masse d'échantillon de teneur en eau
NF P 94-051	400 μm	15 à 35	10 mm	10 g
ASTM D 4318	425 μm	15 à 35	13 mm	10 g
BS 1377-2	425 μm	10 à 50	13 mm	10 g



LIMITE DE PLASTICITE



Méthode de la coupelle

Norme	Nombre de points d'essai	Méthode à un point
NF P 94-051	4 points mini	Non
ASTM D 4318	3 points mini	Oui : 20 à 30
BS 1377-2	4 points mini	Oui : 15 à 35

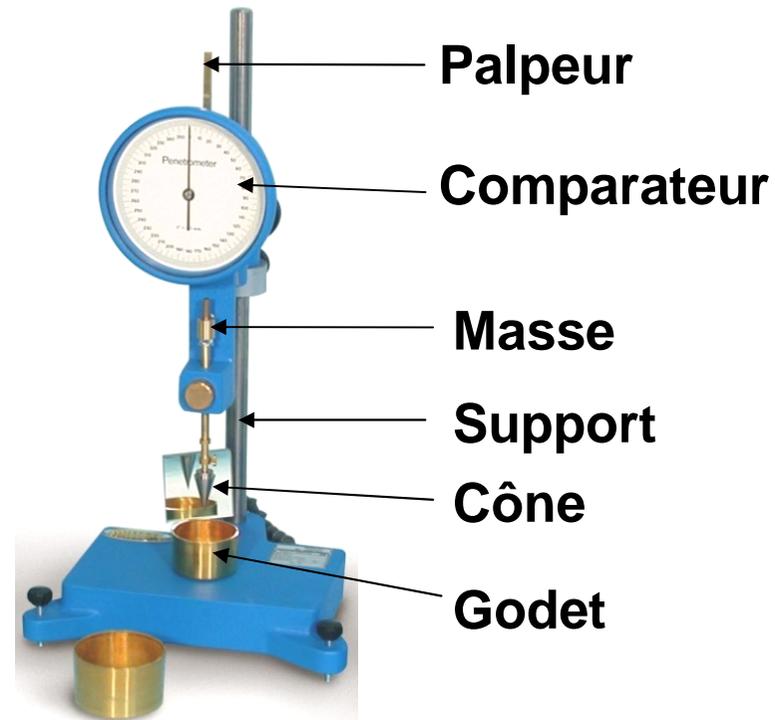
ASTM $w_L = k.w. \left(\frac{n}{25} \right)^{0.121}$

BS $w_L = k.w. \left(\frac{n}{25} \right)^{\tan B}$ **$\tan B = 0.09$ pour les sols Anglais**



DETERMINATION DE LA LIMITE DE LIQUIDITÉ MÉTHODE DU CÔNE DE PÉNÉTRATION:

Equipements spécifique :



PENETROMETRE A CONE

LIMITE DE PLASTICITE

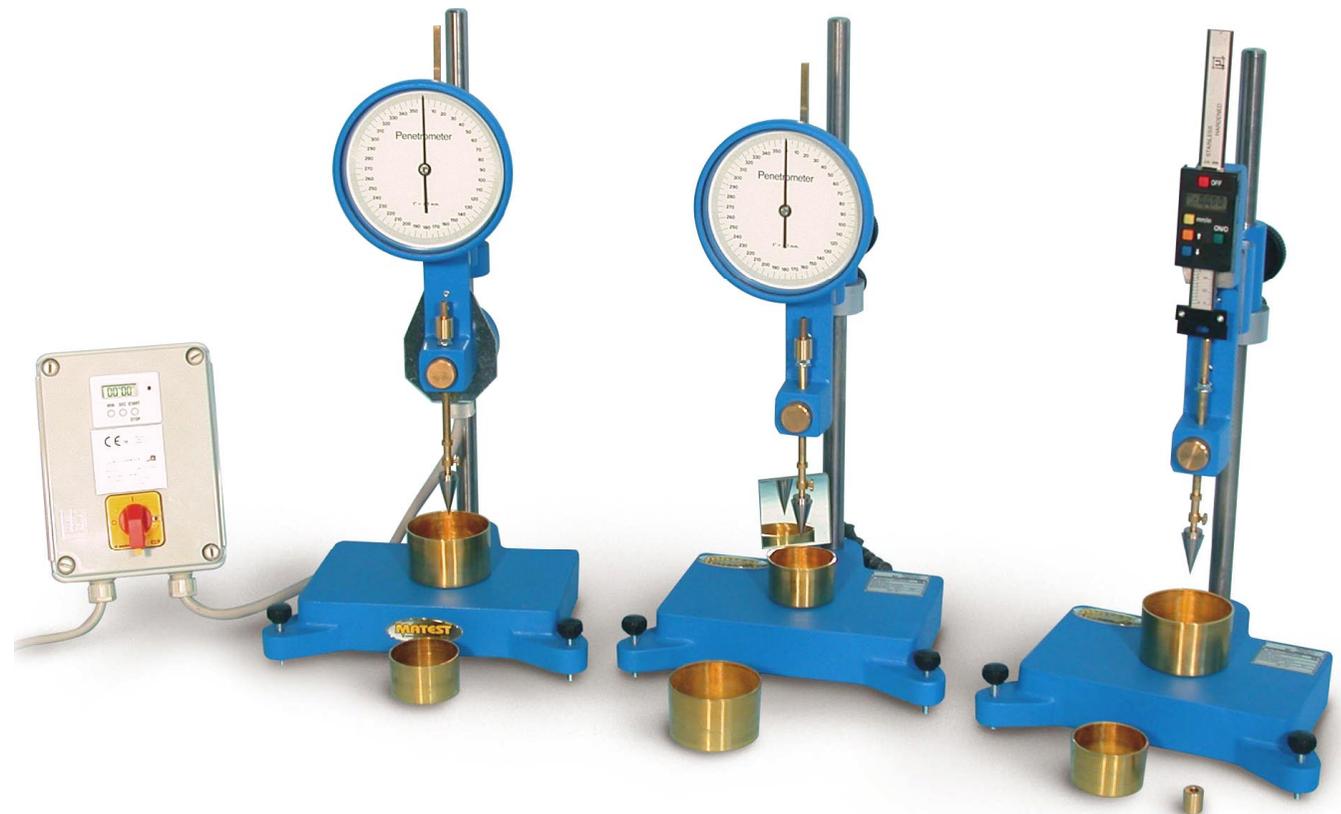
Méthode du cône



Normes spécifiques :

- NF P 94-052-1

-BS 1377-2

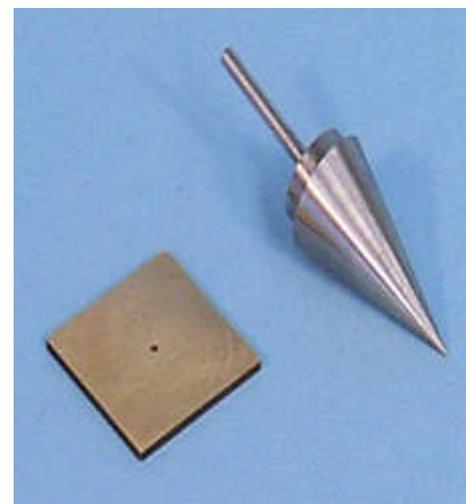


LIMITE DE PLASTICITE

Méthode du cône



Norme	Cône	
	Angle au sommet	Masse cône avec tige
NF P 94-052-1	30°	80 g
BS 1377-2	30°	80 g

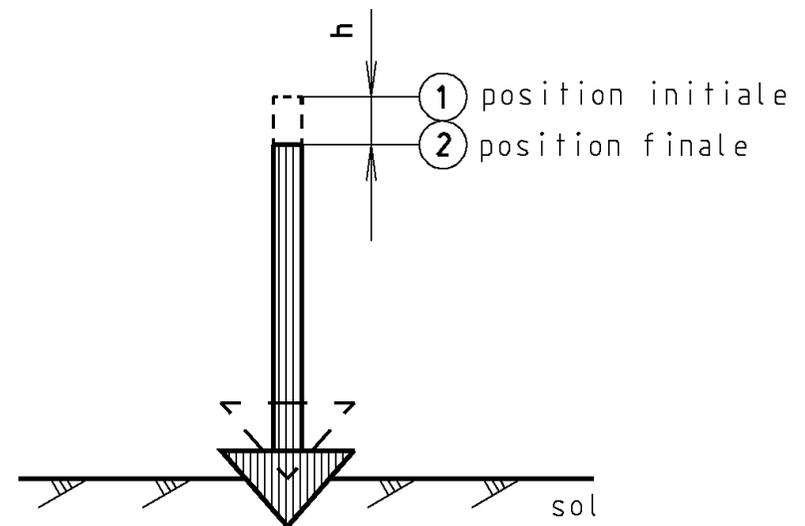


LIMITE DE PLASTICITE



Méthode de la coupelle

Norme	Diamètre du sol	Fourchette de l'enfoncement	Temps de mesure	Masse d'échantillon de teneur en eau
NF P 94-052-1	400 μm	12 à 25 mm	5 s \pm 1 s	10 g
BS 1377-2	425 μm	15 à 25 mm	5 s	10 g



LIMITE DE PLASTICITE



Méthode de la coupelle

Norme	Nombre de points d'essai	Méthode à un point
NF P 94-051	4 points mini	Non
BS 1377-2	4 points mini	Oui : 15 à 25 mm

Table 1 — Factors for one-point cone penetrometer liquid limit test^a

Cone penetration mm	Factors for moisture content ranges		
	below 35 %	35 % to 50 %	above 50 %
15	1.057	1.094	1.098
16	1.052	1.076	1.075
17	1.042	1.058	1.055
18	1.030	1.039	1.036
19	1.015	1.020	1.018
20	1.000	1.000	1.000
21	0.984	0.984	0.984
22	0.971	0.968	0.967
23	0.961	0.954	0.949
24	0.955	0.943	0.929
25	0.954	0.934	0.909
Plasticity	low	intermediate	high

^a Reference: Clayton and Jukes, 1978

Méthode à un point

BS : $w_L = k.w$

VALEUR DU BLEU DE MÉTHYLÈNE



les paramètres de nature :

L'essai au bleu de méthylène se fait sur la fraction de sol qui passe au tamis de 5 mm. La valeur de bleu, notée V_{BS} , exprimée en g de bleu de méthylène par 100 g de matériau sec, est la quantité de ce colorant nécessaire pour recouvrir la surface interne et externe de toutes les particules argileuses. On réalise l'essai par dosage jusqu'à saturation par un excès de bleu.



VALEUR DU BLEU DE MÉTHYLÈNE

OBJECTIF :

Déterminer la valeur de bleu de méthylène d'un sol et l'activité de la fraction argileuse.

PRINCIPE :

L'essai consiste à prélever un échantillon de sol et d'injecter successivement d'une solution de bleu de méthylène dans un bêcher contenant l'échantillon.

VALEUR DU BLEU DE MÉTHYLÈNE



NF P 94-068 - Sols : Reconnaissance et essais

Mesure de la capacité d'adsorption de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux

Détermination de la valeur de bleu de méthylène d'un sol ou d'un matériau rocheux par l'essai à la tache

NF EN 933-9

Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats

Partie 9 : Qualification des fines — Essai au bleu de méthylène

LA VALEUR DE BLEU DE METHYLENE



La mesure de la surface spécifique des particules présentes dans un sol offre une caractérisation plus sélective de l'argilosité du sol, puisque cette surface spécifique varie de façon très importante avec la nature des particules. L'essai au bleu de méthylène permet de le faire dans des conditions simples et rapides, en utilisant la propriété de la molécule de bleu de méthylène de s'adsorber sur la surface des particules minérales argileuses.

LA VALEUR DE BLEU DE METHYLENE



EQUIPEMENTS NECESSAIRES :

- Baguette de verre $\varnothing 8\text{mm}$.
- Solution à 10 % de bleu de méthylène.



Papier filtre

Burette



Agitateur

Bêcher



Classification

Les propriétés de plasticité des argiles sont dues presque exclusivement à l'interaction des particules de dimension "argileuse" (C_2 de diamètre $< 2 \mu\text{m}$) avec l'eau.

Si la composition minéralogique de l'argile est constante, l'indice de plasticité du sol est proportionnel à la quantité d'argile présente dans le sol.

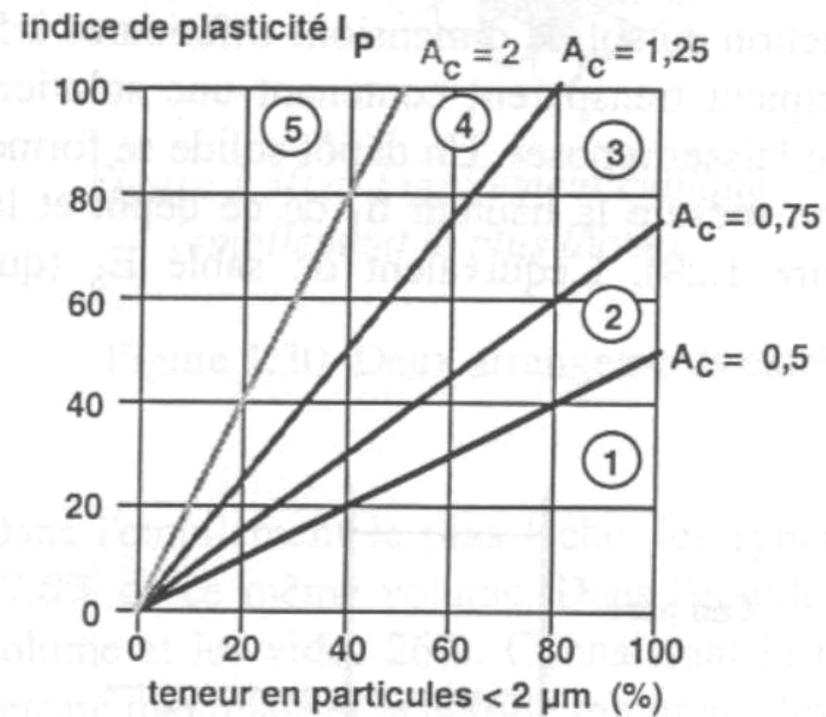
L'activité A_{CB} , est le rapport de la valeur de bleu de méthylène du sol V_{BS} à sa teneur en particules argileuses C_2 .

$$A_{CB} = \frac{V_{BS}}{C_2}$$

LA VALEUR DE BLEU DE METHYLENE



Activité	Qualificatif
$0 \leq A_{CB} \leq 3$	Inactive
$3 < A_{CB} \leq 5$	Peu active
$5 < A_{CB} \leq 13$	Moyenne
$13 < A_{CB} \leq 18$	Active
$18 < A_{CB}$	Très active





Classification

Cette classification des sols est tirée de la norme NF P 11-300

- **$V_{BS} = 0.1$: sol insensible à l'eau.**
- **$V_{BS} = 0.2$: apparition de sensibilité à l'eau.**
- **$V_{BS} = 1.5$: seuil distinguant les sols sablo-limoneux des sols sablo-argileux.**
- **$V_{BS} = 2.5$: seuil distinguant les sols limoneux peu plastiques des sols limoneux de plasticité moyenne.**
- **$V_{BS} = 6$: seuil distinguant les sols limoneux des sols argileux.**
- **$V_{BS} = 8$: seuil distinguant les sols argileux des sols très argileux.**

TENEUR EN MATIÈRES ORGANIQUES D'UN MATÉRIAU XP P94-047



OBJECTIF :

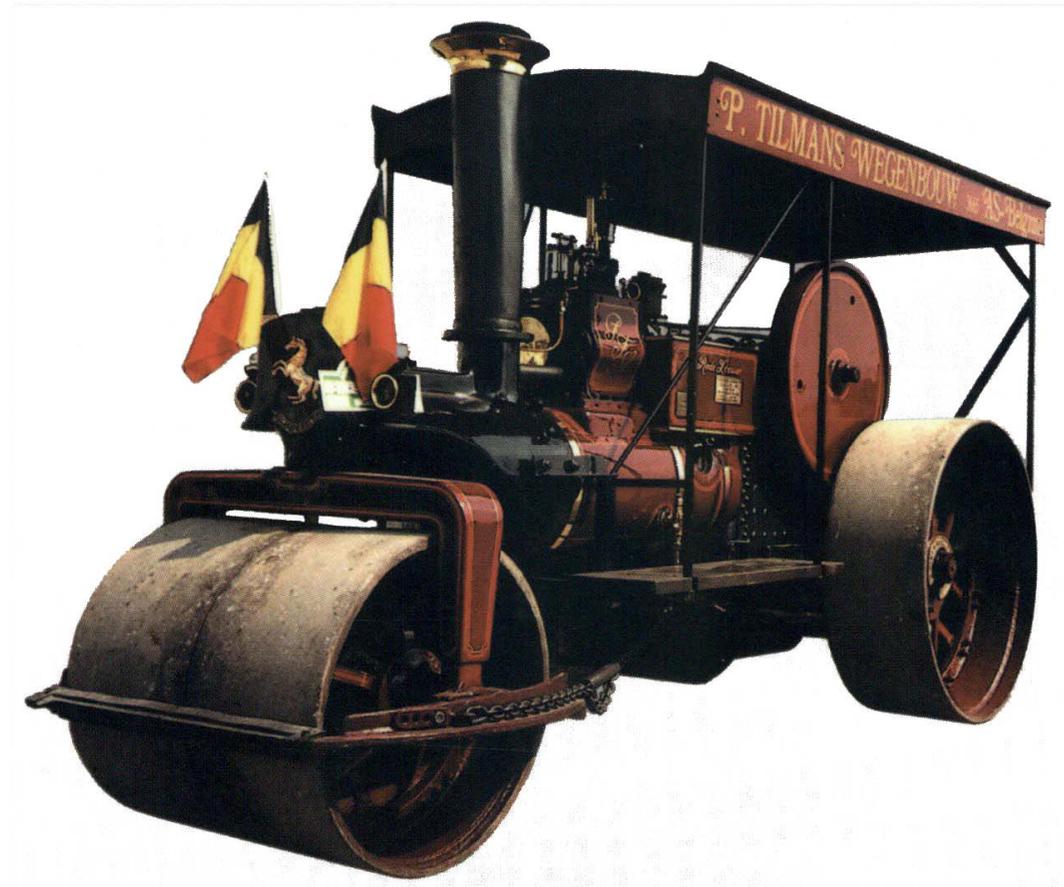
Déterminer la teneur en matières organiques par calcination C_{MOC}

PRINCIPE :

L'essai consiste à déterminer la perte de masse d'un échantillon préalablement sèche, après calcination dans un four à une température de 450 °C.



PARAMETRES DE COMPACTAGE





ESSAI PROCTOR





ESSAI PROCTOR

Normes spécifiques

- **NF P94-093 (octobre 1999)**
- **NF EN 13286-2 (février 2005)**
- **ASTM D 558, D 698, D 1557**
- **BS 1377 : 4**

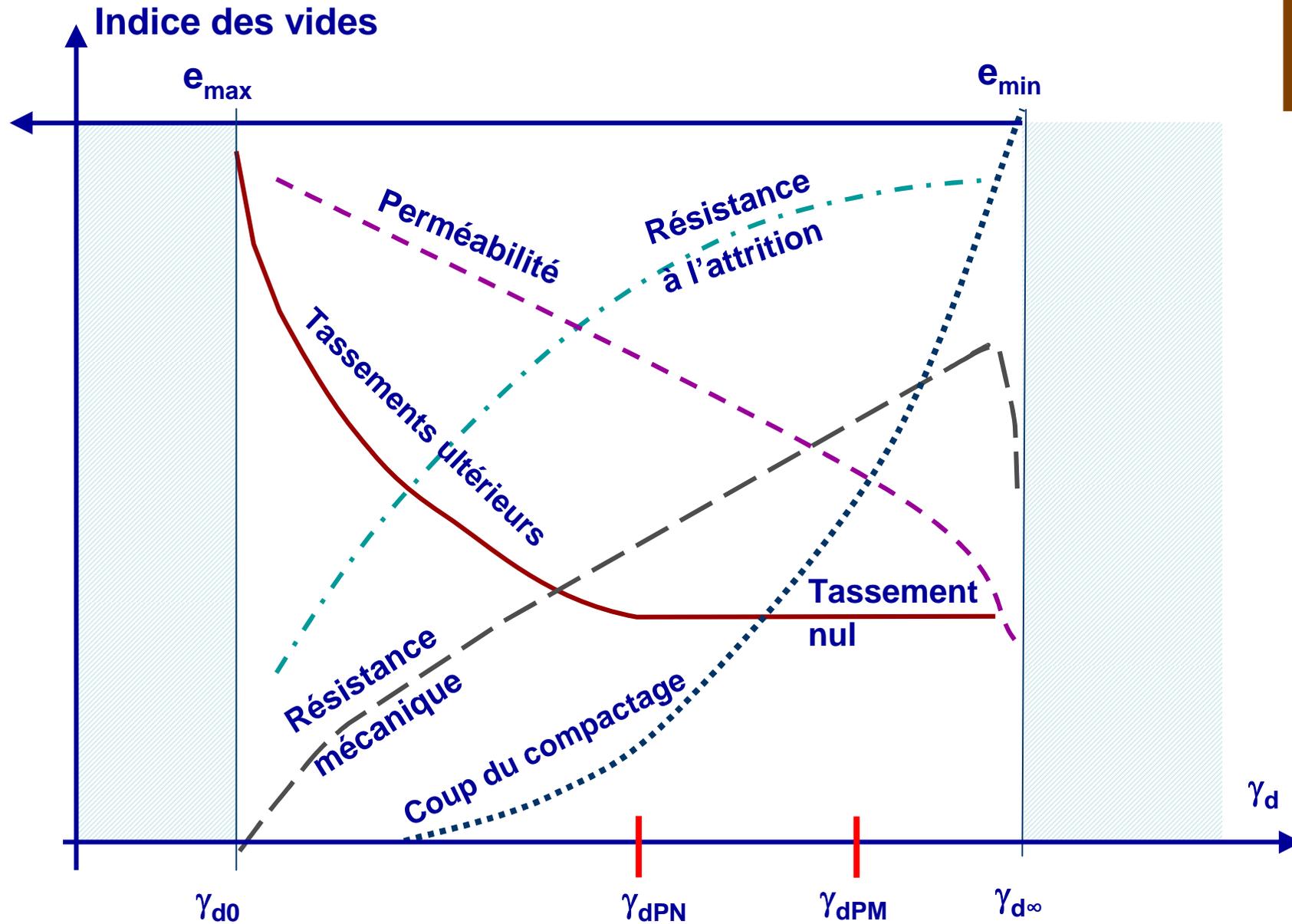
ESSAI PROCTOR



***Détermination des références de compactage d'un matériau :
masse volumique et teneur en eau : Essai Proctor***

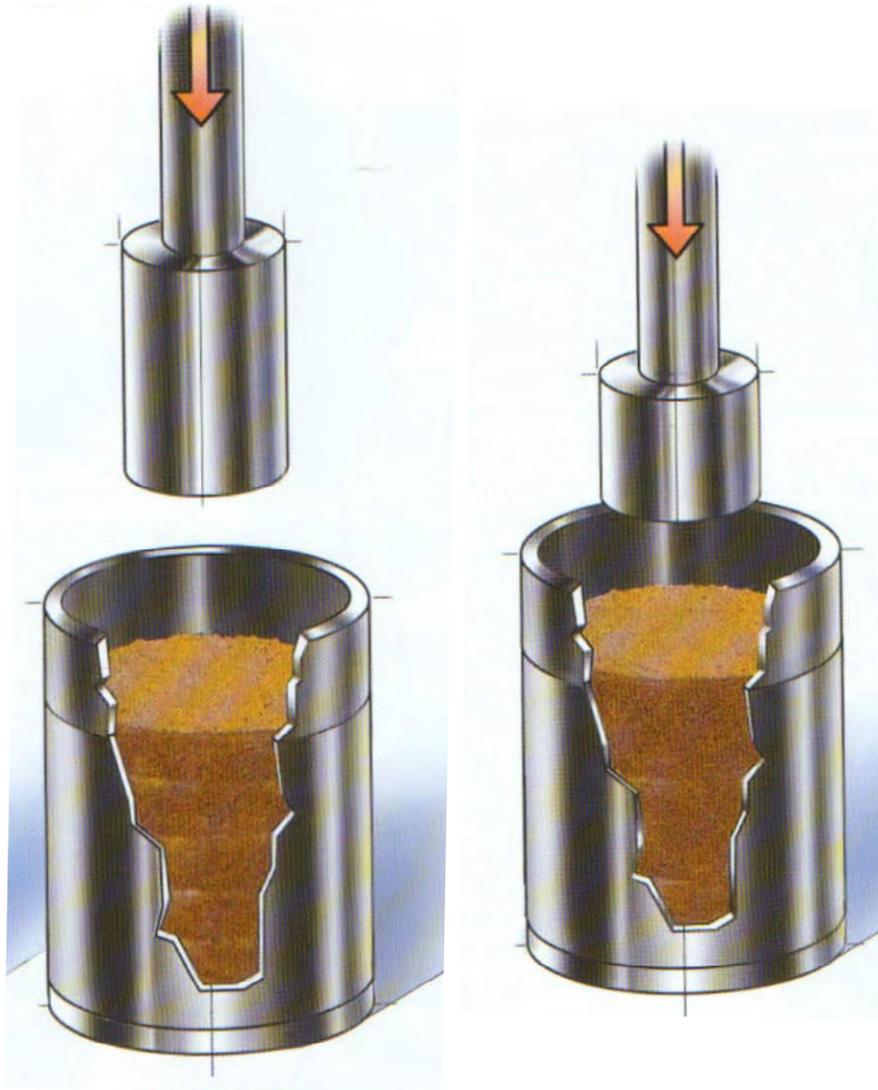
L'essai Proctor, complètement normalisé, consiste à placer dans un moule de dimensions déterminées, un échantillon humidifié de manière homogène à une teneur en eau donnée, peu élevée au début, et à compacter cet échantillon par couches au moyen d'une dame de poids standardisé tombant d'une hauteur standardisée.

Pour chacune des teneurs en eau considérée, on détermine le poids volumique sec du sol et on établit la courbe des variations de ce poids volumique en fonction de la teneur en eau.



Objectifs du compactage

ESSAI PROCTOR

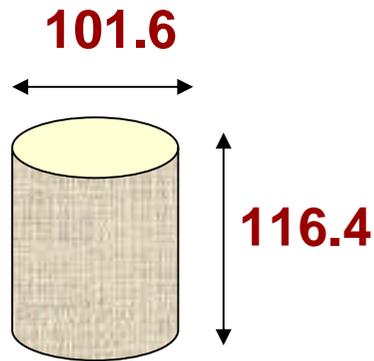


Différents types de moules
Différents types de dames
Différents types d'énergies.

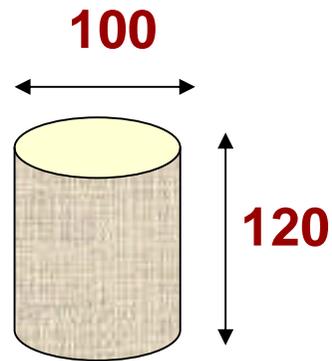
ESSAI PROCTOR



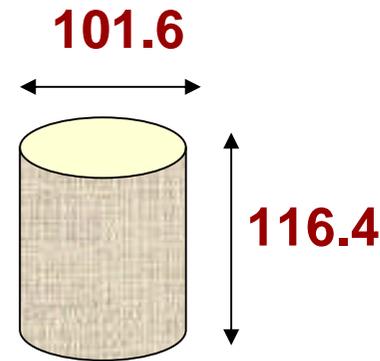
Petits moules



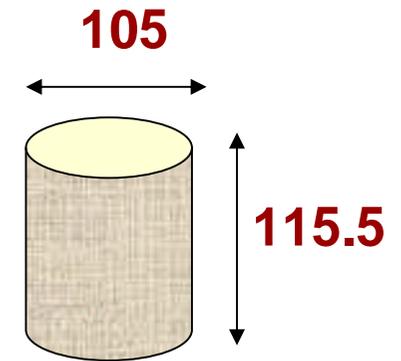
NF P 94-093
Moule Proctor



NF EN 13286-2
Moule A



ASTM
Moule A

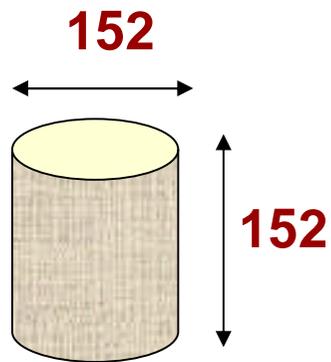


BS 1377-4
Moule de 1 l

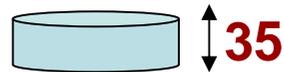
ESSAI PROCTOR



Grands moules

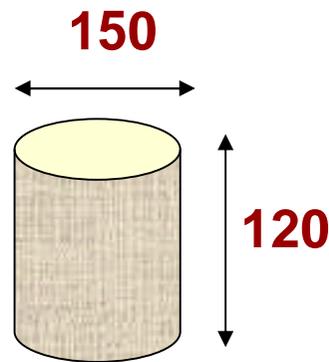


NF P 94-093
Moule CBR

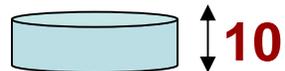


Disque

Hauteur nette
H = 117 mm

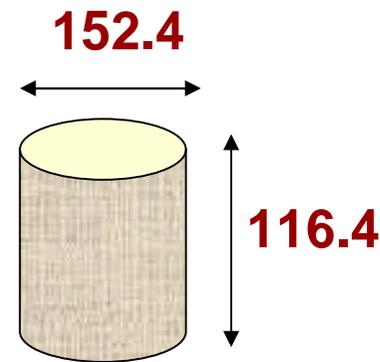


NF EN 13286-2
Moule B



Disque

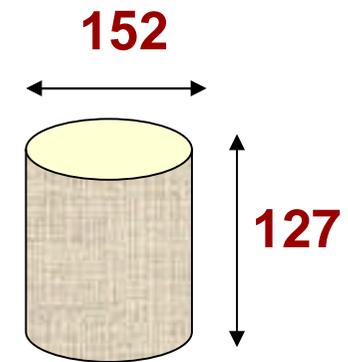
Hauteur nette
H = 110 mm



ASTM
Moule A

Pas de
Disque

Hauteur nette
H = 116.4 mm



BS 1377-4
Moule CBR

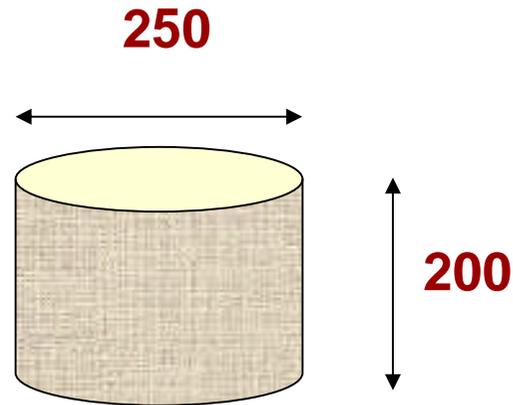
Pas de
Disque

Hauteur nette
H = 127 mm

ESSAI PROCTOR

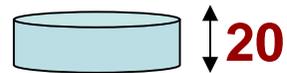


Très Grands moules



NF EN 13286-2
Moule C

Disque



Hauteur nette
H = 180 mm

ESSAI PROCTOR



ESSAI PROCTOR



Petites Dames



NF P 94-093

Dame Proctor Normal

Hauteur de chute = 305 mm

Masse = 2.490 kg

NF EN 13286-2

Dame A

Hauteur de chute = 305 mm

Masse = 2.5 kg

ASTM D 698

Dame Proctor Normal

Hauteur de chute = 304.8 mm

Masse = 2.5 kg

BS 1377 : 4

Dame Proctor Normal

Hauteur de chute = 300 mm

Masse = 2.490 kg

ESSAI PROCTOR



Grandes Dames



NF P 94-093

Dame Proctor Modifié

Hauteur de chute = 457 mm

Masse = 4.535 kg

NF EN 13286-2

Dame B

Hauteur de chute = 457 mm

Masse = 4.5 kg

ASTM D 1557

Dame Proctor Normal

Hauteur de chute = 457 mm

Masse = 4.54 kg

BS 1377 : 4

Dame Proctor Normal

Hauteur de chute = 450 mm

Masse = 4.5 kg

ESSAI PROCTOR



Très Grande Dame



NF EN 13286-2

Dame C

Hauteur de chute = 600 mm

Masse = 15 kg

ESSAI PROCTOR



Préparation d'échantillons et moules NF EN 13286-2

Pourcentage des passants au tamis			Masse Echantillon	Moule Proctor
16 mm	31.5 mm	63 mm	kg	
100	-	-	15	A
			40	B
75 à 100	100	-	40	B
< 100	75 à 100 (*)	100	40	B
-	< 75	75 à 100 (*)	200	C

(*) Une correction est à faire en fonction de ce pourcentage

ESSAI PROCTOR

Préparation d'échantillons et moules NF P 94 - 093



Pourcentage des passants au tamis			Masse Echantillon	Moule
5 mm	20 mm	> 20 mm	kg	
100	-	-	15	Proctor ou CBR
< 100	100	-	40	CBR
< 100	< 100(*)	0 à 30 (*)	40	CBR
< 70	< 70(*)	> 30	Interprétation limitée à l'évaluation de l'état hydrique du sol	

(*) Une correction est à faire en fonction de ce pourcentage

ESSAI PROCTOR

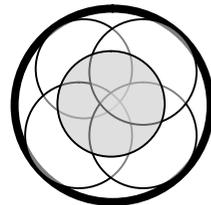
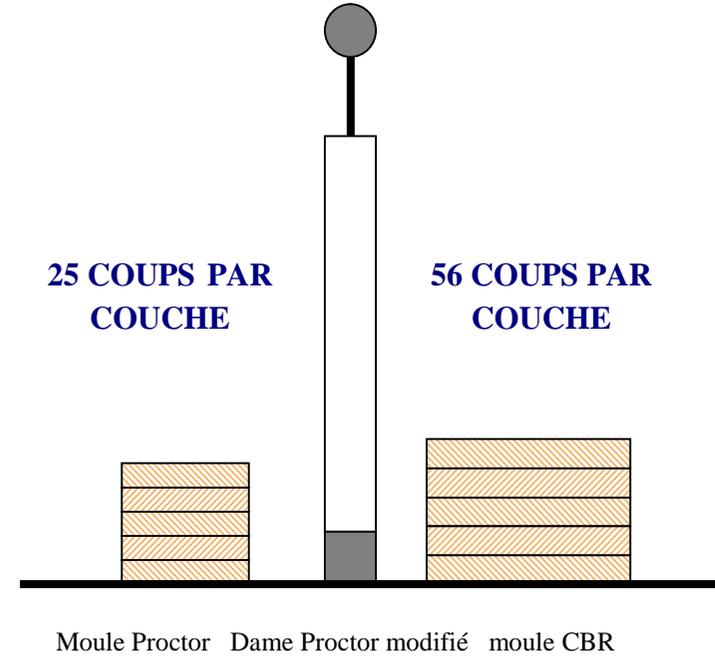
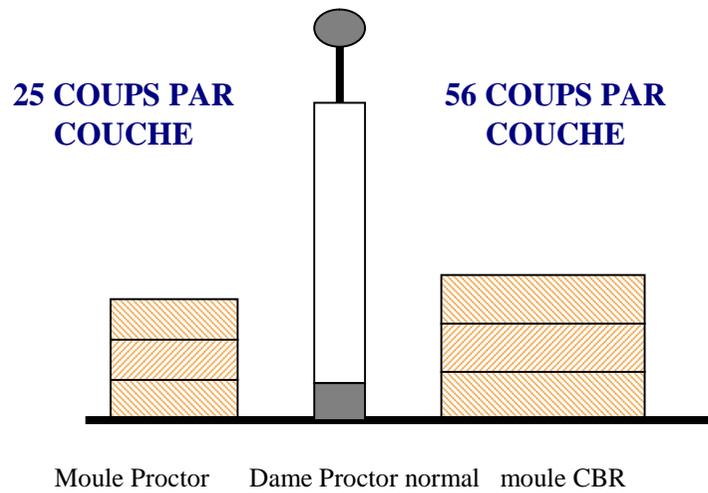


Essai	Caractéristique	NF P 94-093		NF EN 13286-2		
		Moule Proctor	Moule CBR	Moule A	Moule B	Moule C
Proctor Normal	Masse de la dame	2.490	2.490	2.5	2.5	15
	Nombre de couches	3	3	3	3	3
	Nombre de coups/couche	25	56	25	56	22
Proctor Modifié	Masse de la dame	4.535	4.535	4.5	4.5	15
	Nombre de couches	5	5	5	5	3
	Nombre de coups/couche	25	56	25	56	98

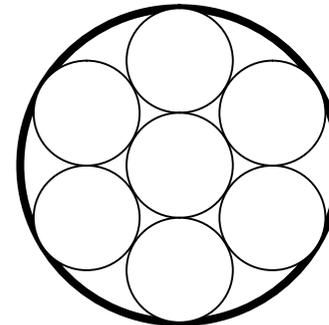


Essai Proctor normal
(3 couches)

Essai Proctor modifié
(5 couches)



MOULE PROCTOR : 3 coups répétés 8 fois et le 25^{ème} coup au centre



MOULE CBR : 6 coups tangents et le 7^{ème} au centre répétés 8 fois

ESSAI PROCTOR



Energie de compactage

$$\text{Energie spécifique} = \frac{\text{Masse de la dame} \times \text{nombre de coups par couche} \times \text{nombre de couches} \times \text{pesenteur}}{\text{Volume du moule}}$$

Energie spécifique de compactage:

Essai Proctor : 0.56 à 0.63 MJ/m³ (Moyenne : 0.6)

Essai Proctor Modifié : 2.56 à 2.8 MJ/m³ (Moyenne : 2.6)

ESSAI PROCTOR



Essai Proctor

Norme	Moule		Dame		Procédure		Energie spécifique (MJ/m ³)
	Diamètre (mm)	Hauteur (mm)	Masse (kg)	Hauteur de chute (mm)	Nombre couches	Nombre coups	
NF P 94-093	101.6	116.4	2.490	305	3	25	0.592
	152	117			3	56	0.590
NF EN 13286-2	100	120	2.5	305	3	25	0.595
	150	110			3	56	0.646
ASTM	101.6	116.4	2.5	304.8	3	25	0.594
	152.4	116.4			3	56	0.592
BS	105	115.5	2.490	305	3	25	0.559
	152	127			3	56	0.548

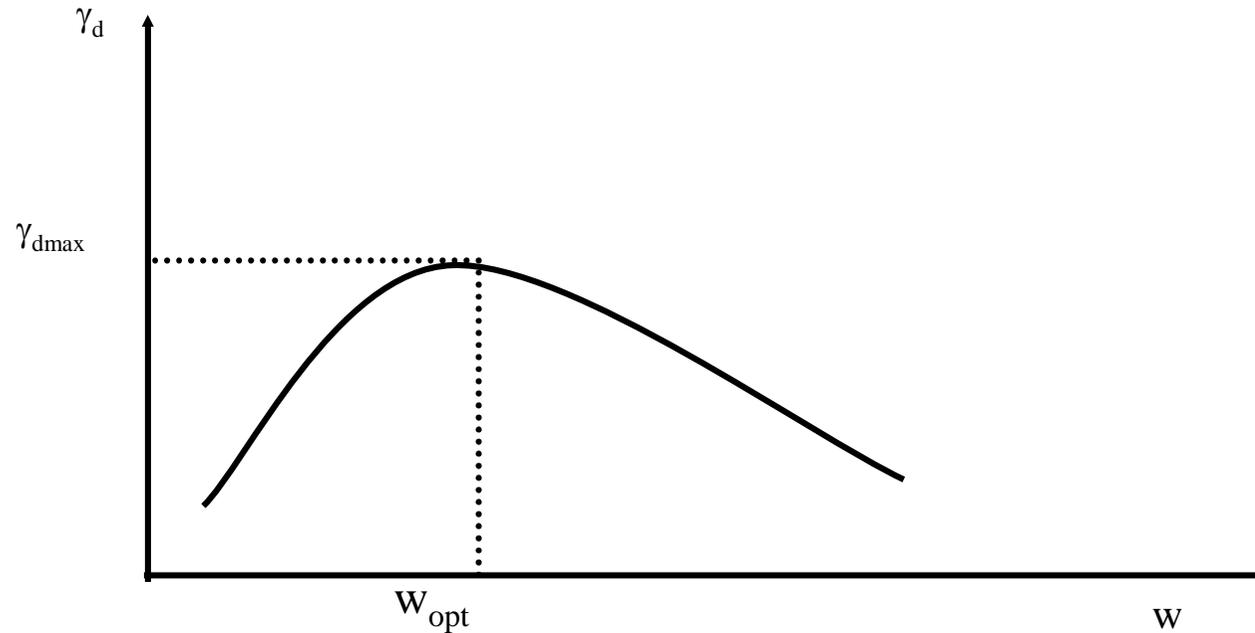
ESSAI PROCTOR



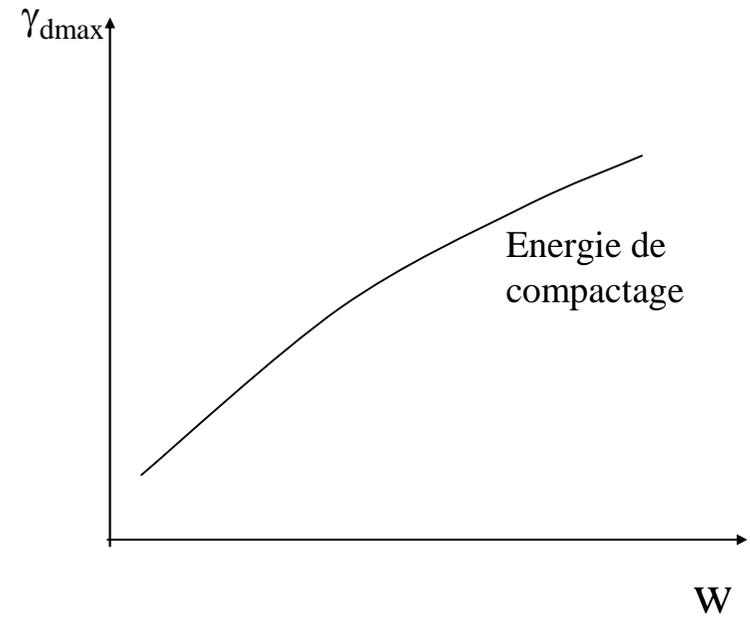
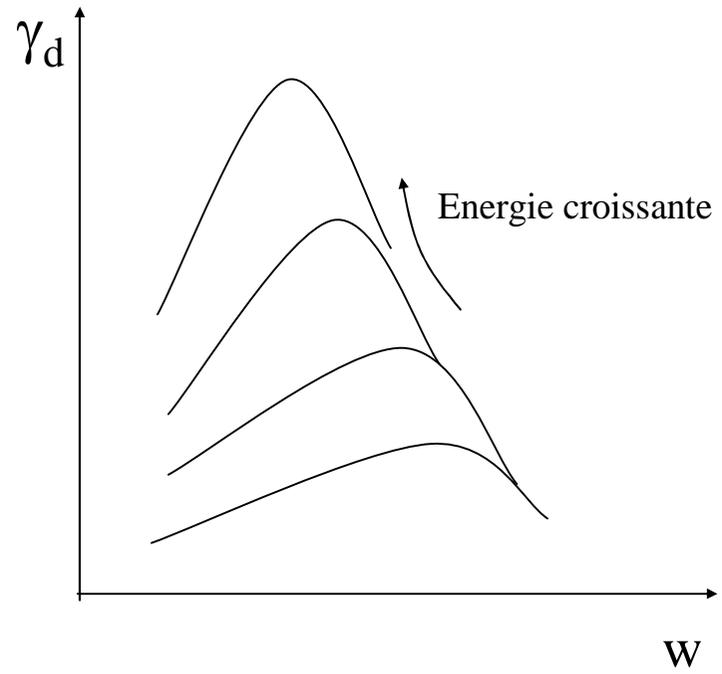
Essai Proctor Modifié

Norme	Moule		Dame		Procédure		Energie spécifique (MJ/m ³)
	Diamètre (mm)	Hauteur (mm)	Masse (kg)	Hauteur de chute (mm)	Nombre couches	Nombre coups	
NF P 94-093	101.6	116.4	4.535	457	5	25	2.693
	152	117			5	56	2.684
NF EN 13286-2	100	120	4.5	457	5	25	2.676
	150	110			5	56	2.906
ASTM	101.6	116.4	4.54	457	5	25	2.696
	152.4	116.4			5	56	2.660
BS	105	115.5	4.5	450	5	25	2.483
	152	127			5	56	2.451

ESSAI PROCTOR



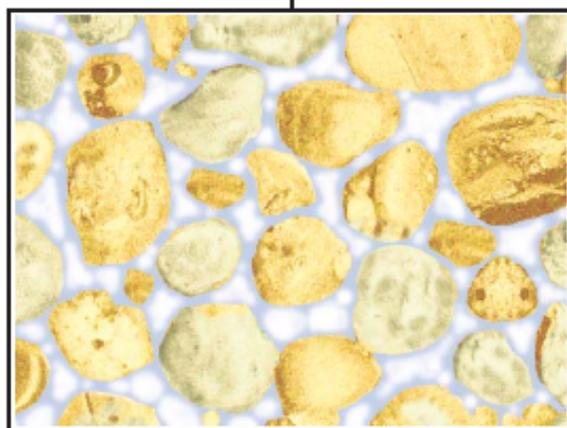
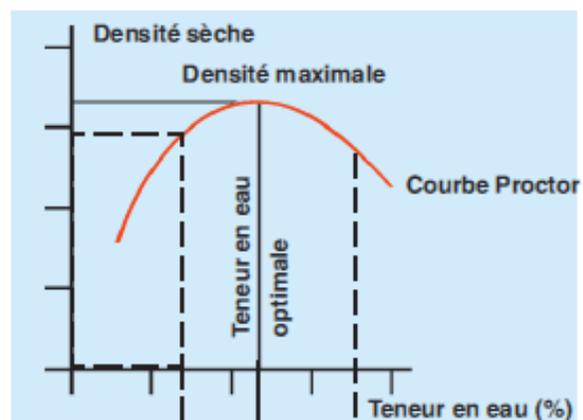
(γ_{dmax}, w_{opt}) : sont les résultats de l'essai Proctor et sont appelées caractéristiques de compactage



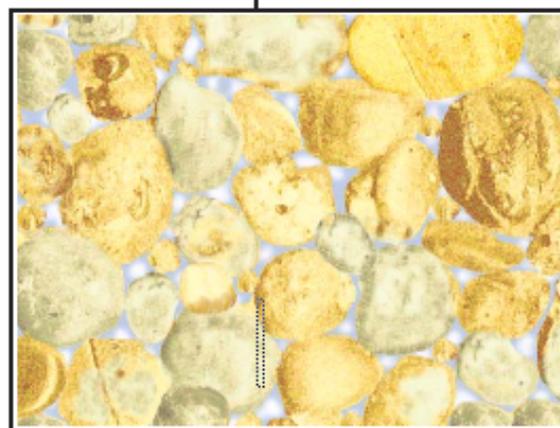


Compactage des sols

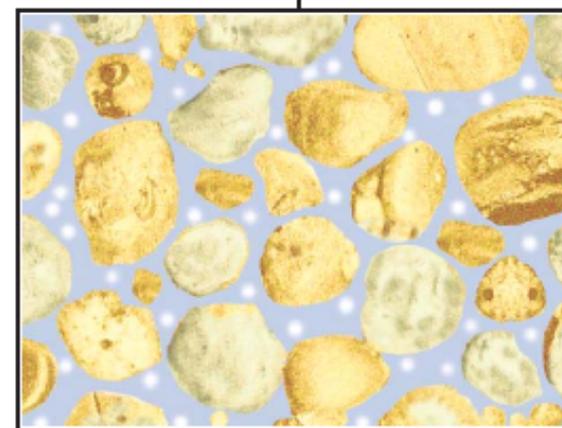
Influence de la teneur en eau sur l'aptitude au compactage



- Faible teneur en eau**
- frottements internes élevés
 - faible densité



- Teneur en eau optimale**
- meilleure aptitude au compactage
 - densité maximale

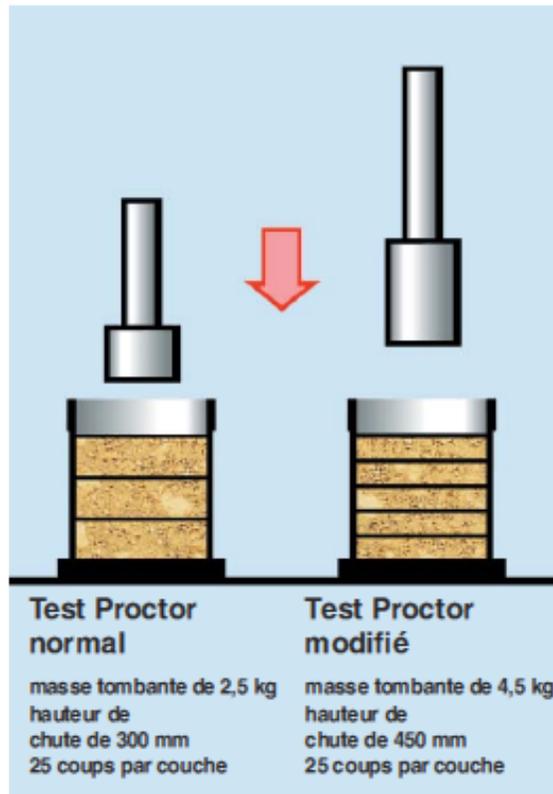


- Teneur en eau élevée**
- pression élevée de l'eau
 - faible densité

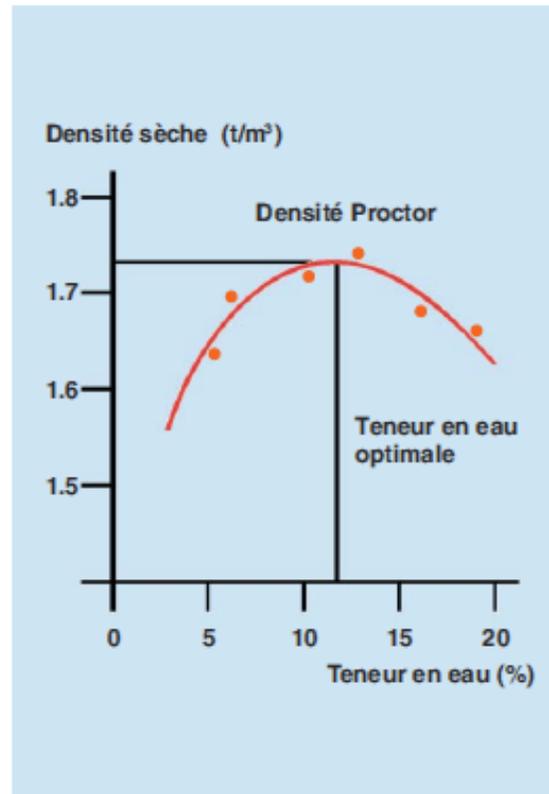
BAO1f-08/03

Compactage des sols

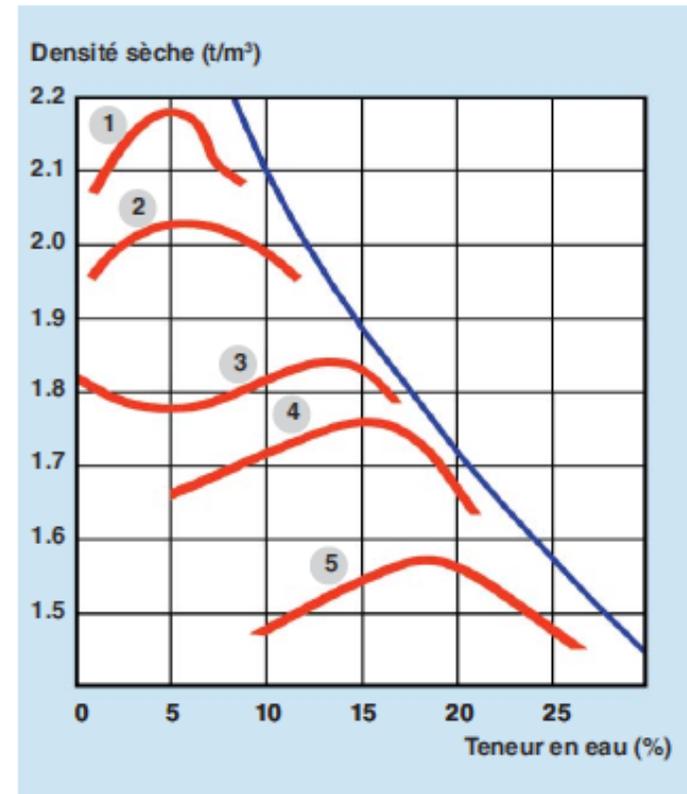
Courbe Proctor



Test Proctor



Courbe Proctor

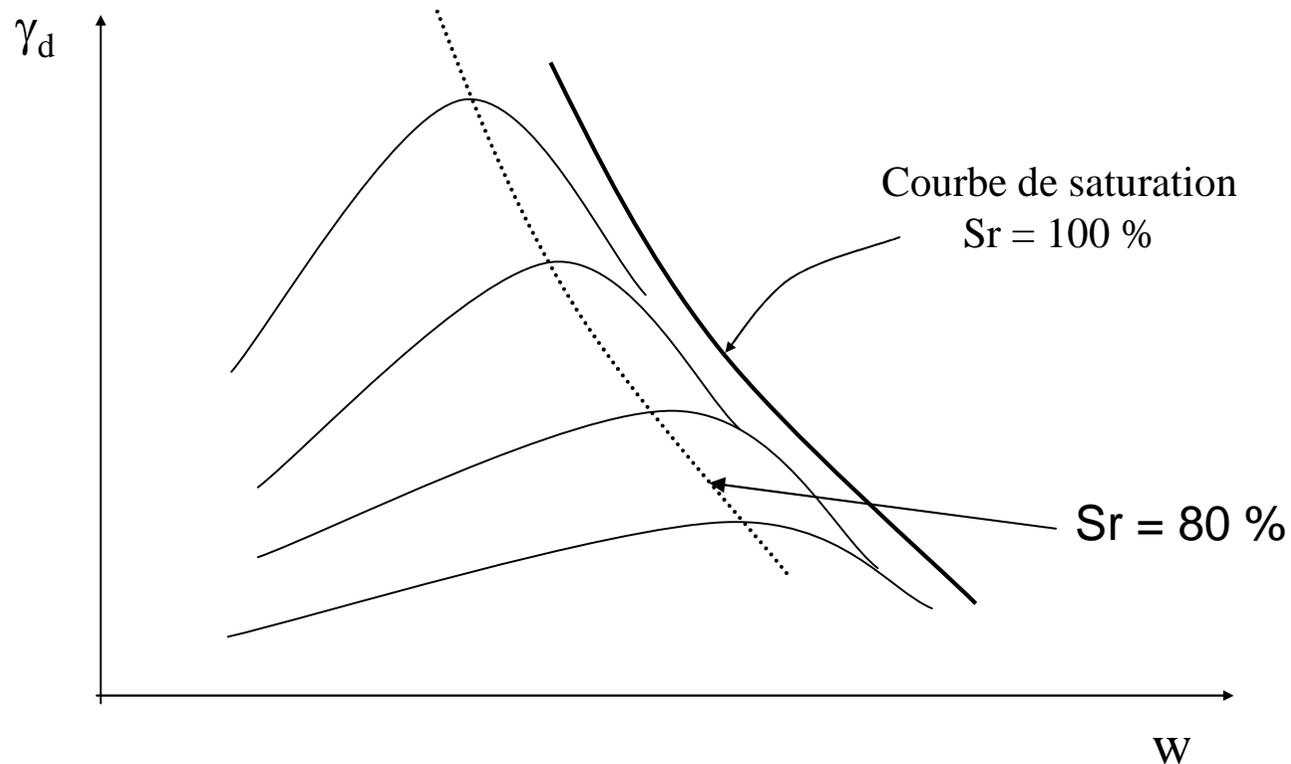


Courbes Proctor de différents types de sols

- 1 Gravier sablonneux
- 2 Sable et graviers
- 3 Sable uniforme
- 4 Limon sablonneux
- 5 Argile lourde



BA01f-09/03



$$\gamma_d = \frac{(S_r \cdot \gamma_s)}{(S_r + w \cdot G)} \quad \text{kN/m}^3$$

Ces courbes sont utiles $S_r = 100 \%$ et 80% :

- la courbe $\gamma_d = f(w\%)$ pour $S_r = 100\%$ constitue la courbe enveloppe des courbes Proctor des différents sols. La branche droite de ces courbes viennent s'y raccorder tangentiellement.
- la courbe $\gamma_d = f(w\%)$ pour $S_r = 80\%$ situe approximativement, pour les sols comportant une fraction argileuse, le lieu des optimums



ESSAI CBR :





ESSAI CBR :

Cet essai donne une mesure de la portance relative des sols par rapport à un sol type, constitué par des pierrailles concassées et compactées, extraites d'une carrière de Californie.

Les initiales CBR sont l'abréviation de *California Bearing Ratio*. L'indice portant californien CBR est le rapport, exprimé en % de la pression produisant un enfoncement donné au moyen d'un poinçon cylindrique normalisé (*de section 19.32 cm^2*) se déplaçant à une vitesse déterminée (*1.27 mm/min*) et de la pression nécessaire pour enfoncer le même poinçon dans les mêmes conditions, dans un matériau type.



ESSAI CBR :

Normes spécifiques :

- NF P 94-078 : Sols : Reconnaissance et essais

Indice CBR après immersion - Indice CBR immédiat - Indice Portant Immédiat

Mesure sur échantillon compacté dans le moule CBR

- NF EN 13286-47 : Mélanges traités et mélanges non traités aux liants hydrauliques

Méthode d'essai pour la détermination de l'indice portant Californien (CBR), de l'indice de portance immédiate (IPI) et du gonflement.

-ASTM D 1883

-BS 1377 – 4



ESSAI CBR :

Diamètre maxi des granulats

- **NF P 94-078 : 20 mm (max 30% > 20 mm)**
- **NF EN 13286-47 : 22.4 mm**
- **ASTM D 1883 : 19 mm**
- **BS 1377 – 4 : 20 mm**



ESSAI CBR :



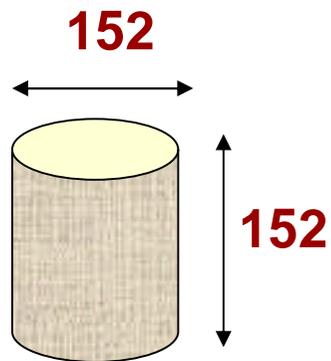
Anneau de surcharge :

- **NF P 94-078** : 2,3 kg \pm 0,1 kg (équivalent 7.5 cm de matériau)
- **NF EN 13286-47** : 2 kg (équivalent 7 cm de matériau)
- **ASTM D 1883** : 2.270 kg (équivalent 7.5 cm de matériau)
- **BS 1377 – 4** : 2 kg (équivalent 7 cm de matériau)

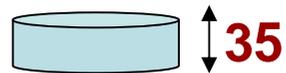
ESSAI CBR



Moules

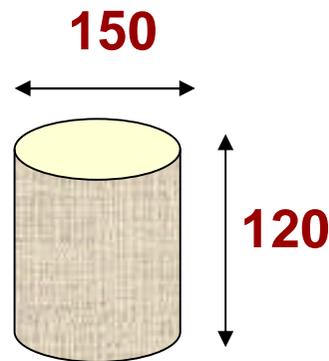


NF P 94-078
Moule CBR



Disque

Hauteur nette
H = 117 mm

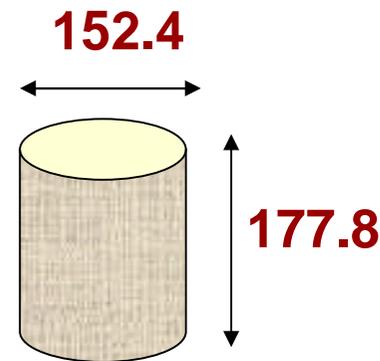


NF EN 13286-47
Moule B

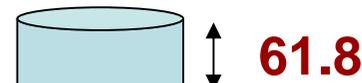


Disque

Hauteur nette
H = 110 mm

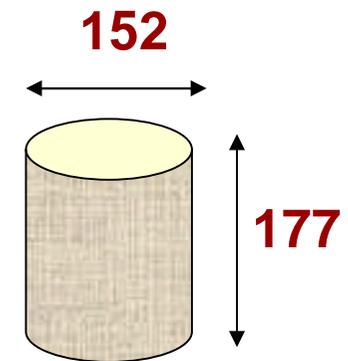


ASTM
Moule B



Disque

Hauteur nette
H = 116 mm

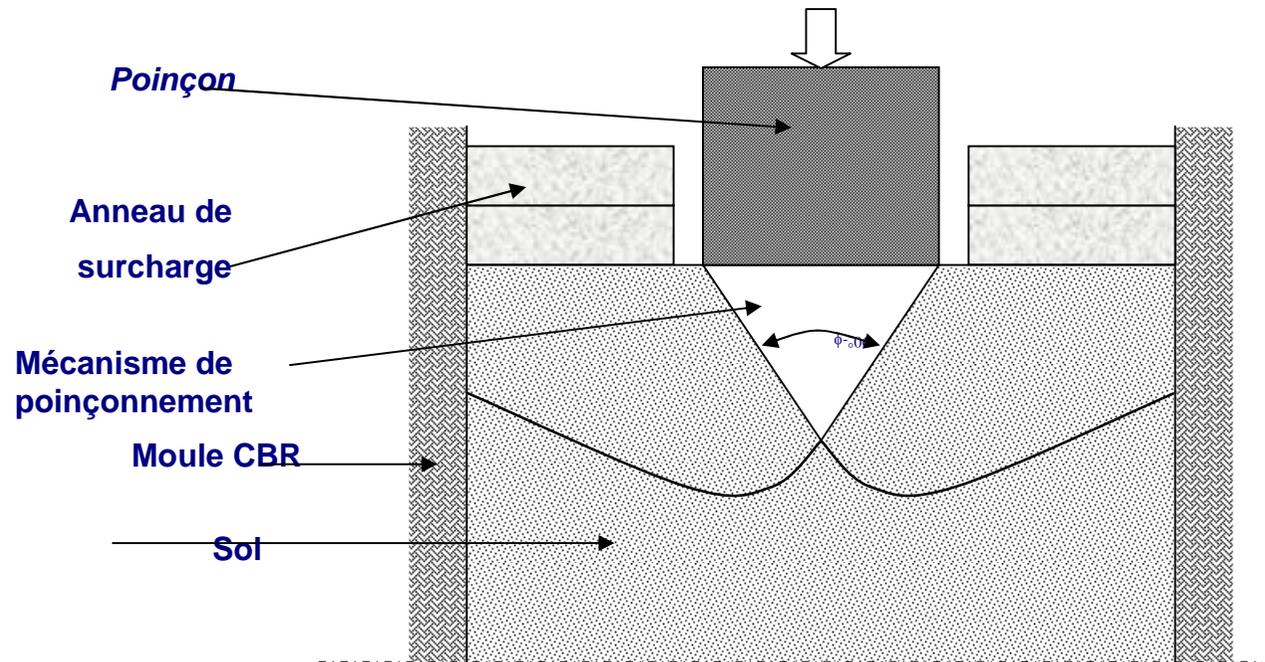


BS 1377-4
Moule CBR



Disque

Hauteur nette
H = 127 mm



	NF P 94-093	NF EN 13286-47	ASTM D1883	BS 1377-4
Section du piston	φ 49.6 mm	50 mm	49.6 mm	50 mm
Vitesse de poinçonnement	1.27 mm/mn			

Expression des résultats



En fonction des indices portants Californiens ou des indices de portance immédiate attendus, exercer le cas échéant sur le piston une force :

NF EN 13286-47

- indice jusqu'à 5 % : 10 N**
- indice supérieur à 5 % : 40 N**



L'indice recherché est défini conventionnellement comme étant la plus grande valeur, exprimée en pourcentage, des deux rapports ainsi calculés:

100 x Effort de pénétration à 2.5 mm d'enfoncement (en KN)

Ref. A

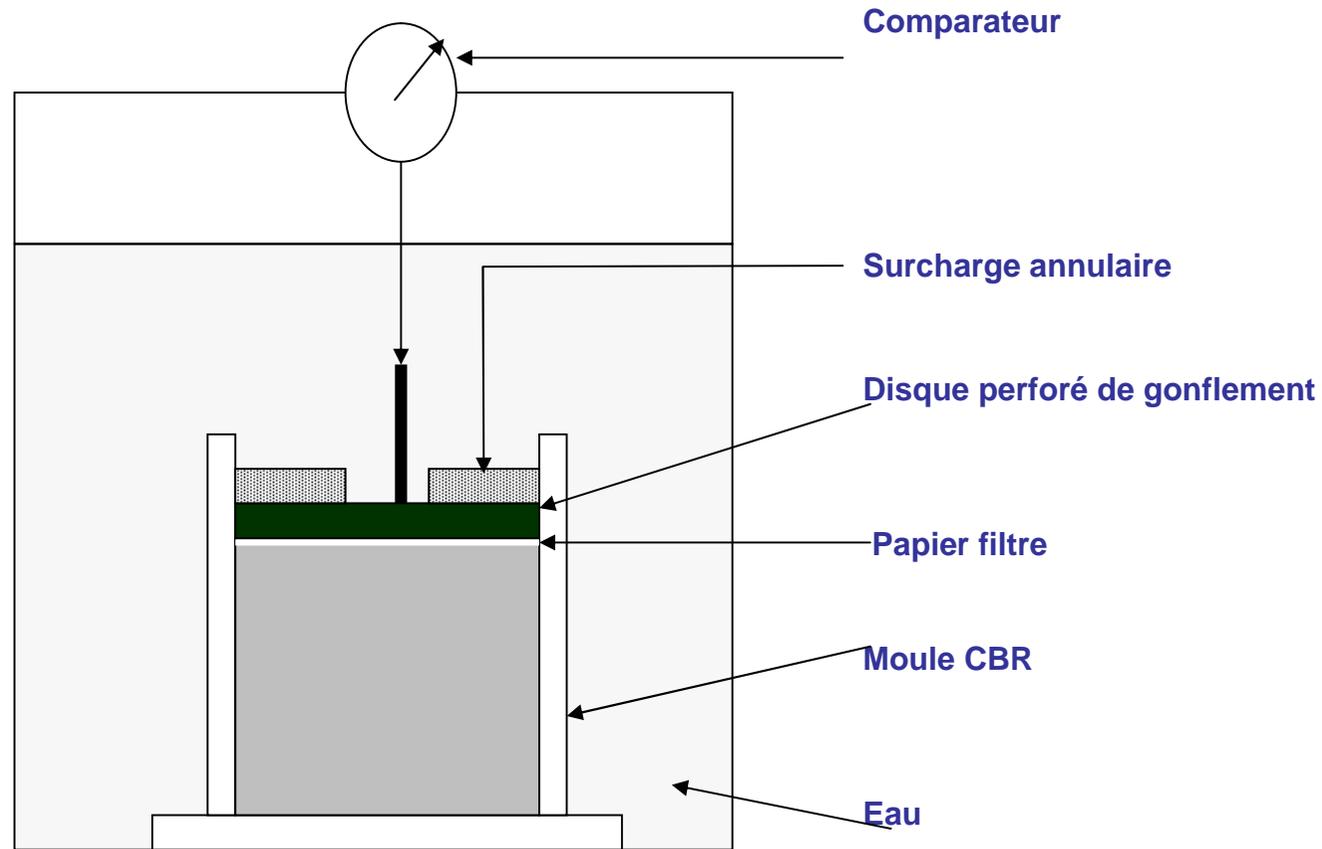
100 x Effort de pénétration à 5 mm d'enfoncement (en KN)

Ref. B

	NF P 94-093	NF EN 13286-47	ASTM D1883	BS 1377-4
Ref. A	13.35	13.2	13.35	13.2
Ref. B	19.93	20	20	20



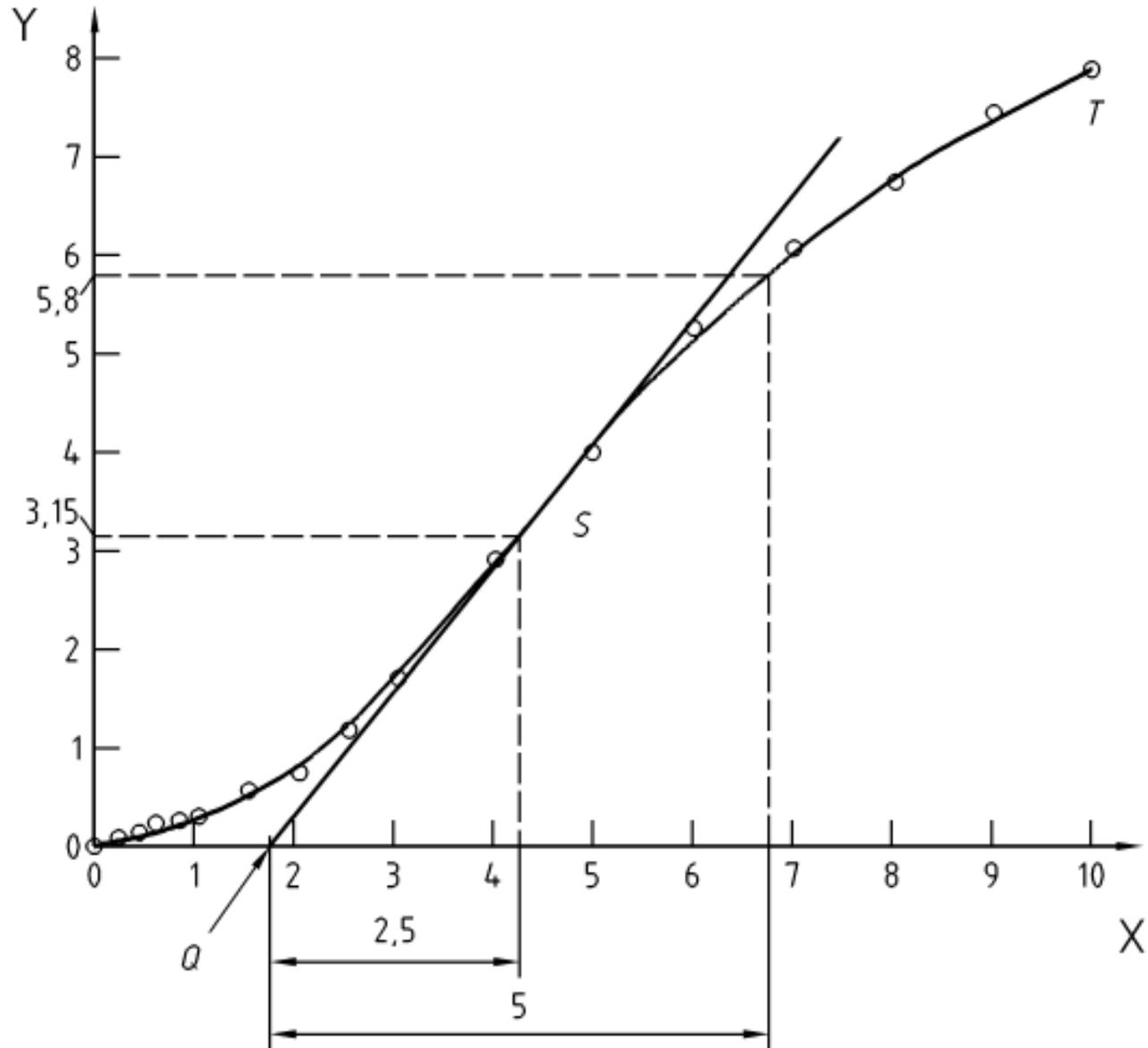
Essai d'imbibition : durée 4 jours



Imbibition et gonflement



Correction éventuelle



Expression des résultats



Niveaux des indices CBR ou IPI % le plus proche

- 0 à 9 : arrondir à 0,5% le plus proche
- 10 à 29 : arrondir à 1% le plus proche
- ≥ 29 : arrondir à 5% le plus proche

Essai CBR in-situ



Norme BS 1377-9





Essai CBR in-situ

Norme BS 1377-9

- $D_{\max} = 20 \text{ mm}$
- Anneaux de surcharge : 4.5 kg

exercer sur le piston une force :

- CBR < 5 % : 10 N
- CBR de 5 à 30 % : 50 N
- CBR > 30 % : 250 N

Vitesse d'essai : 1 mm/mn





LE COMPACTAGE EN CHANTIER :

L'équipement de compactage ainsi que le principe de compactage peut différer si nous sommes en présence d'un sol grenu ou d'un sol fin.

Compacteurs dynamiques :

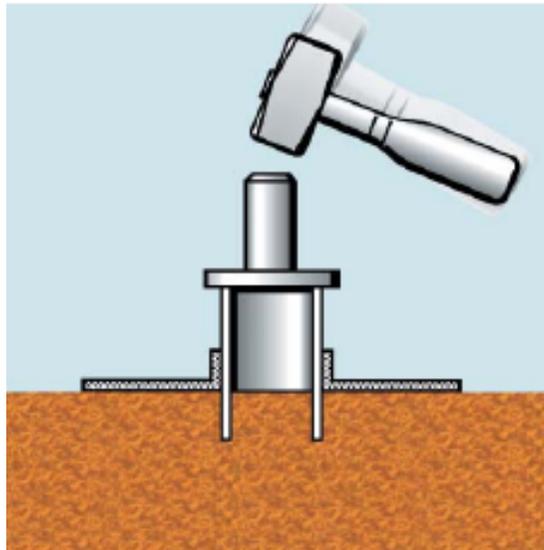
- rouleau vibrant
- plaque vibrante
- compacteur à impact (espace restreint)
- Etc.

Compacteurs statiques :

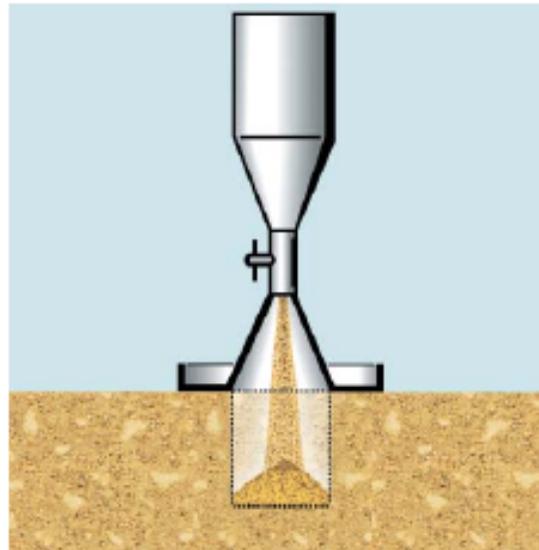
- rouleau lisse
- rouleau pneumatique
- tracteur sur chenilles
- Etc.



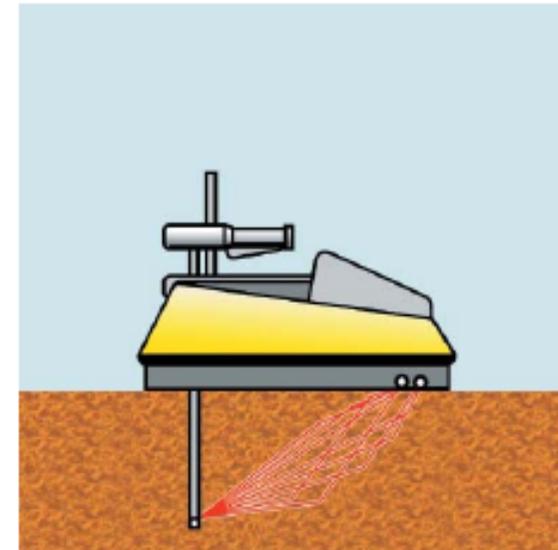
Contrôle du compactage des sols



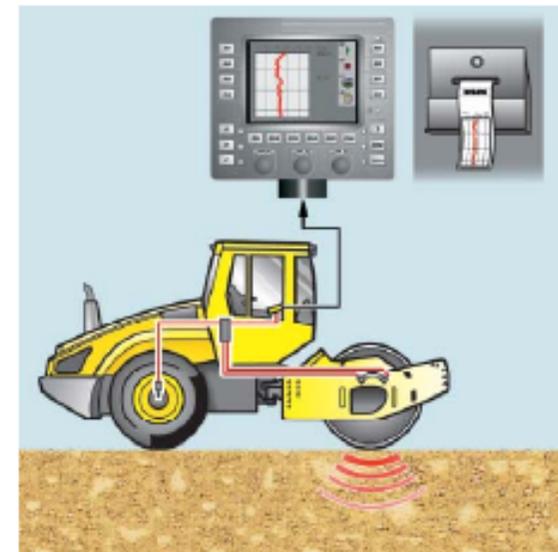
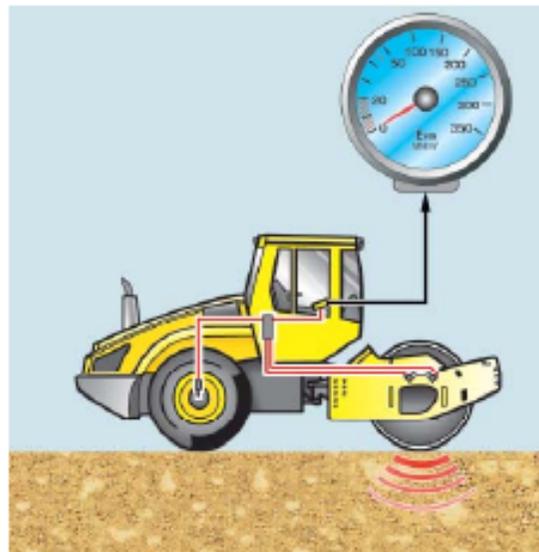
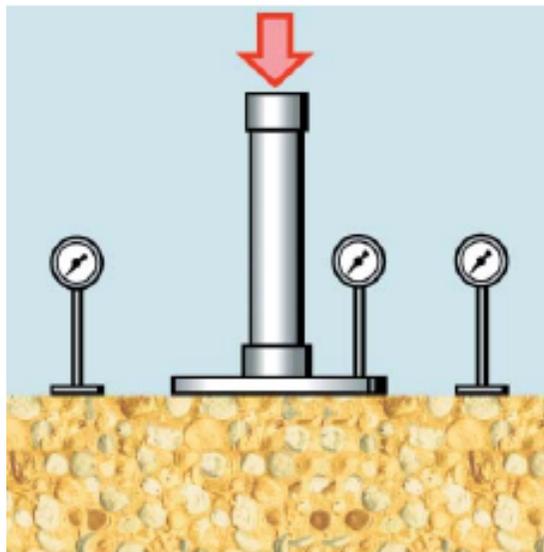
carottage



remplacement par du sable

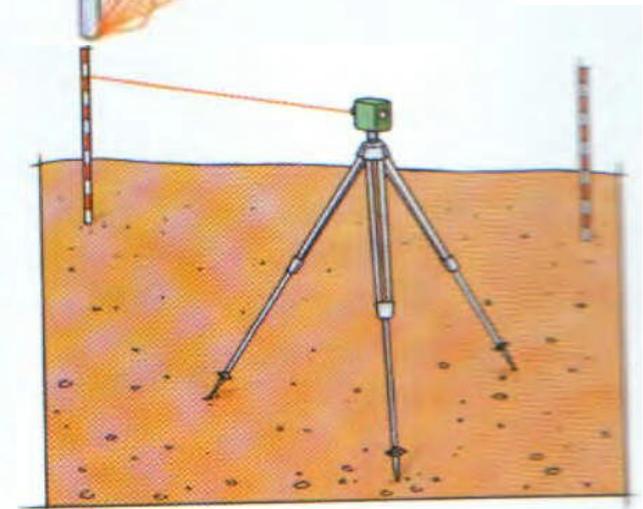
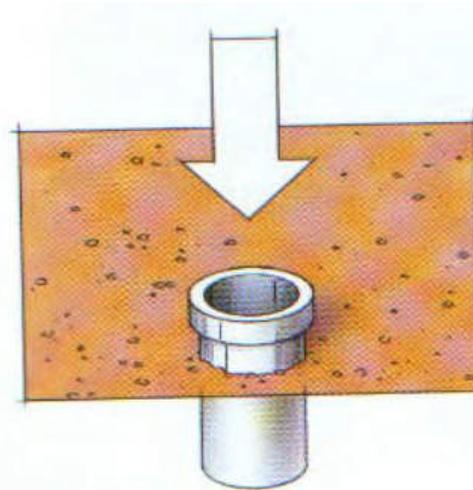
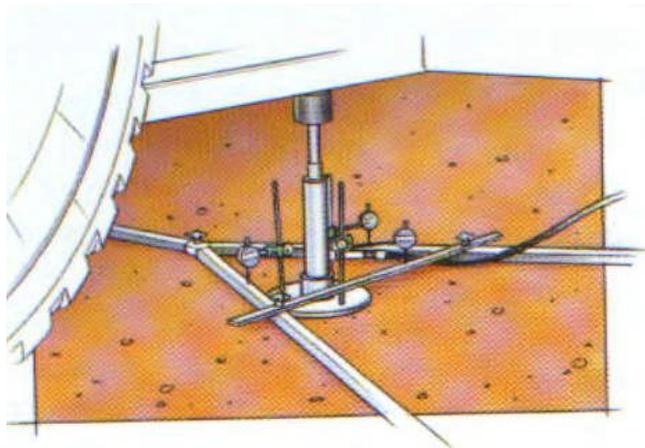
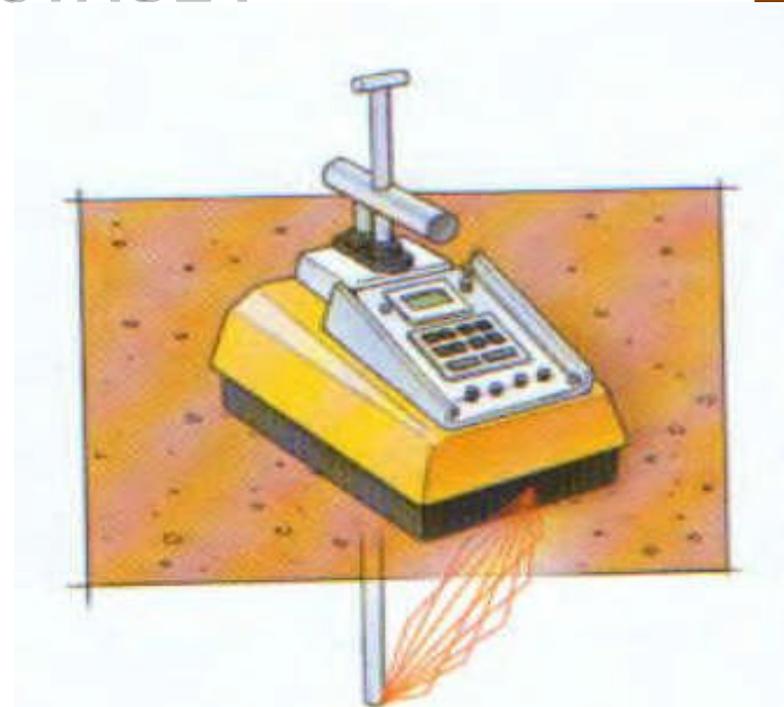
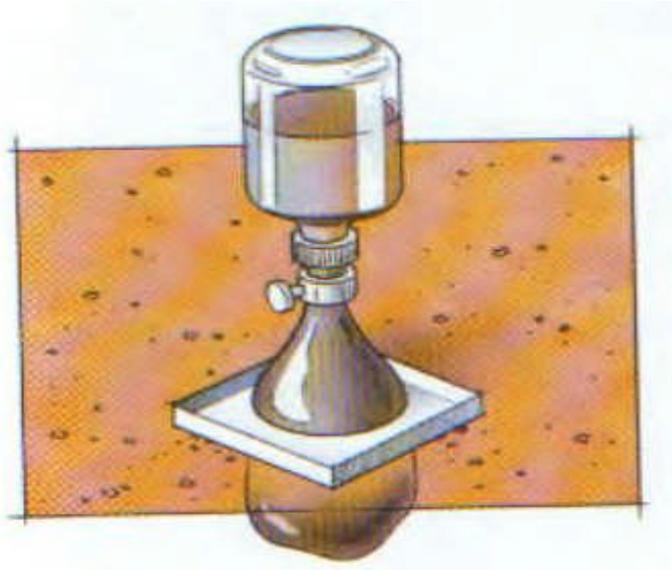


sondage nucléaire





CONTROLE DU COMPACTAGE :





Contrôle par mesure de γ_d et de w :





-Contrôle par mesure de γ_d et de w :

•Méthode du densitomètre à membrane - *NF P 94-061-2* :

Le principe de cette méthode est la mesure du volume d'un trou, de 1 à 3 litres, creusé dans le sol et connaissant le poids du matériau extrait, on détermine la masse volumique en place du matériau étudié

•Rubber-Ballon Method – *ASTM D 2176* :



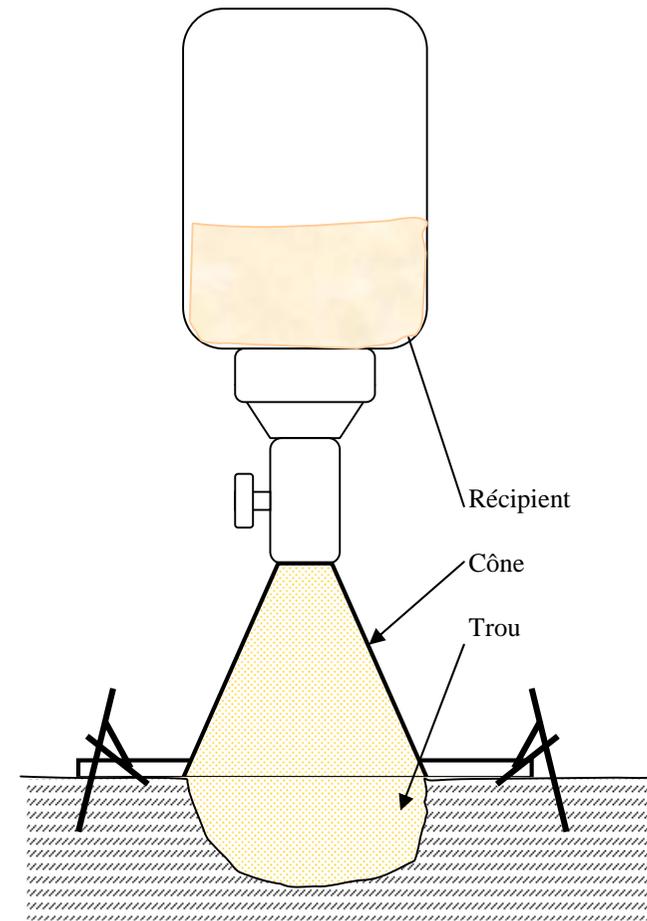
- *Contrôle par mesure de γ_d et de w :*





- Contrôle par mesure de γ_d et de w : Méthode du cône de sable

- Norme NF P 94-061-3
- ASTM 1556
- BS 1377-9



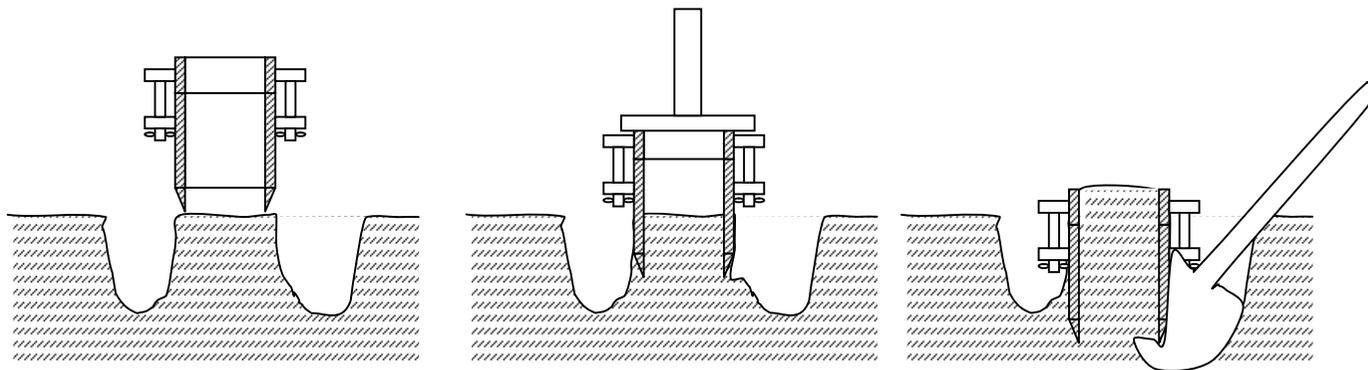




- *Contrôle par mesure de γ_d et de w :*

• *Méthode de la trousse coupante - **NF P 94-053** :*

On détermine le poids volumique du sol en prélevant un échantillon non remanié au moyen d'un anneau volumétrique, c'est-à-dire d'un cylindre biseauté, de volume connu. La masse de l'échantillon est obtenue par pesage. Le volume est calculé à partir de données géométriques de la trousse coupante ou du moule qui contient l'échantillon.





Pour les trois méthodes, le degré de compactage se calcule par rapport à une valeur de référence donnée par les essais de laboratoire (essai Proctor).

$$\text{Degré de compactage (\%)} = \frac{\gamma_d \text{ chantier}}{\gamma_d \text{ laboratoire}} \times 100$$

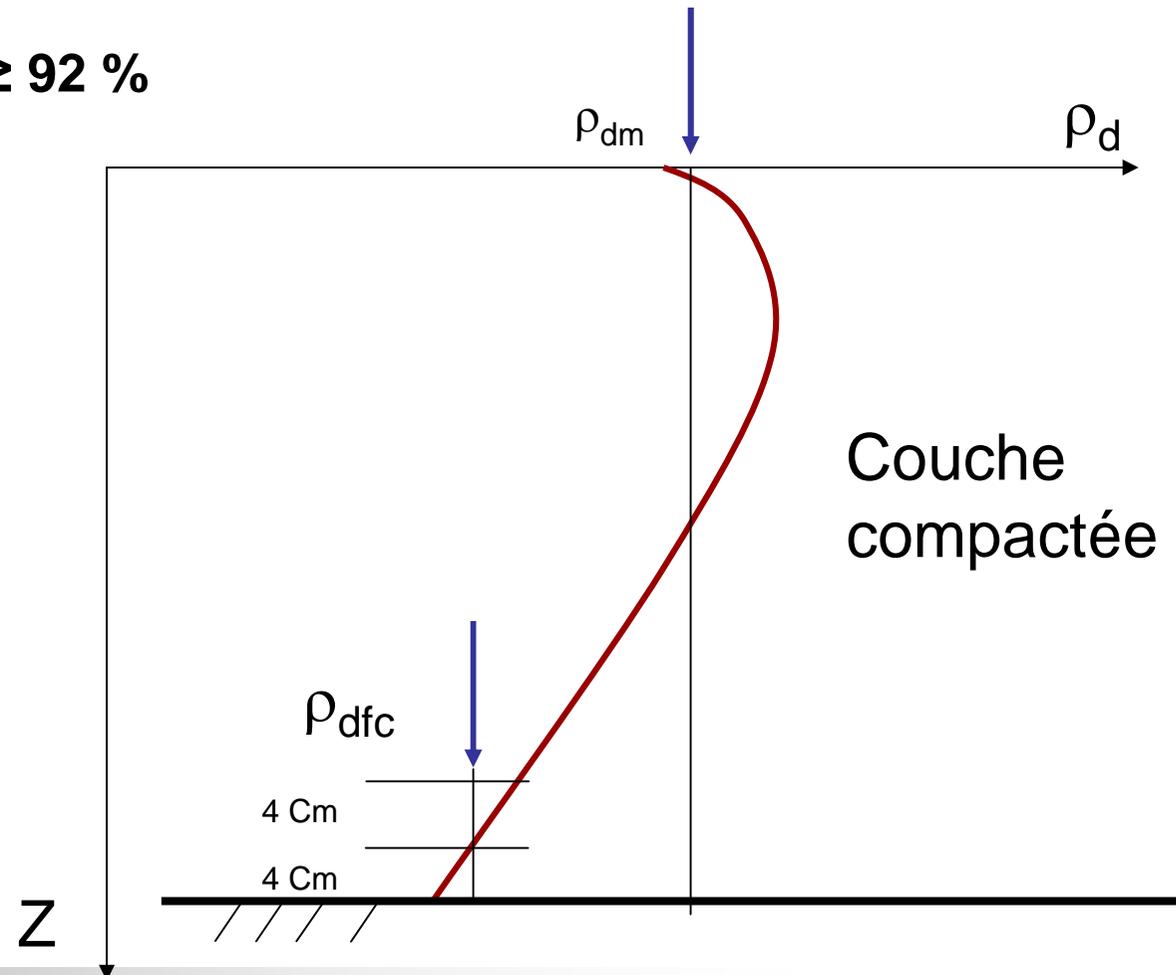


q₃ : objectif pour les couches de forme

$\rho_{dm} \geq 98,5 \%$ et $\rho_{dfc} \geq 96 \%$

q₄ : objectif pour les couches de remblai :

$\rho_{dm} \geq 95 \%$ et $\rho_{dfc} \geq 92 \%$





Essai de plaque NF P 94 117-1 :

Sols : reconnaissance et essais

Portance des plates-formes

Module sous chargement statique à la plaque (EV2)





Essai de plaque NF P 94 117-1 :

L'essai s'applique aux plates-formes d'ouvrages de terrassement et d'assainissement destinées à la construction d'infrastructures routières, ferroviaires, aéroportuaires et réalisées avec les matériaux définis dans la classification de la norme NF P 11-300 à l'exception de ceux comportant des éléments dont le D_{\max} excède 200 mm.

La valeur maximale du module pouvant être mesurée par cet essai est de 250 MPa.

Le «Module sous chargement statique à la plaque» ne caractérise pas l'état de compacité des sols situés sous la plate-forme auscultée.



Essai de plaque NF P 94 117-1 :

Cet essai consiste à mesurer les tassements d'une plaque circulaire sous l'action d'une charge croissante et de définir des modules de déformation pour des cycles de chargement-déchargement.

Pour une application de contrôle de compactage, l'essai permet de déterminer le « *module de déformation statique à la plaque* » d'une plate-forme.

L'essai consiste à charger une plaque circulaire rigide à l'aide d'un vérin qui, généralement, prend réaction sur un véhicule lesté. L'enfoncement de la plaque est mesuré par trois comparateurs non influencés par le mouvement du sol.





NF P 94117-1

Plaque : diamètre 600 mm

La mesure peut être réalisée :

- soit en un point seulement, situé à moins de 2 cm du centre de la plaque ;**
- soit en trois points sur la périphérie de la plaque disposés à $120^\circ \pm 10^\circ$ et à égale distance du centre de la plaque (à ± 5 mm).**



•On applique une pression de 0.25 MPa, puis on mesure l'enfoncement de la plaque dans le sol par l'intermédiaire des comparateurs. *Soit Z'0.*

•On annule ensuite la charge ;

•On recharge pour appliquer une pression de 0.20 MPa puis on mesure l'enfoncement de la plaque dans le sol. *Soit Z'1.*

•On annule de nouveau la charge ;

Le module de déformation (en MPa) à la plaque est donné par la formule :

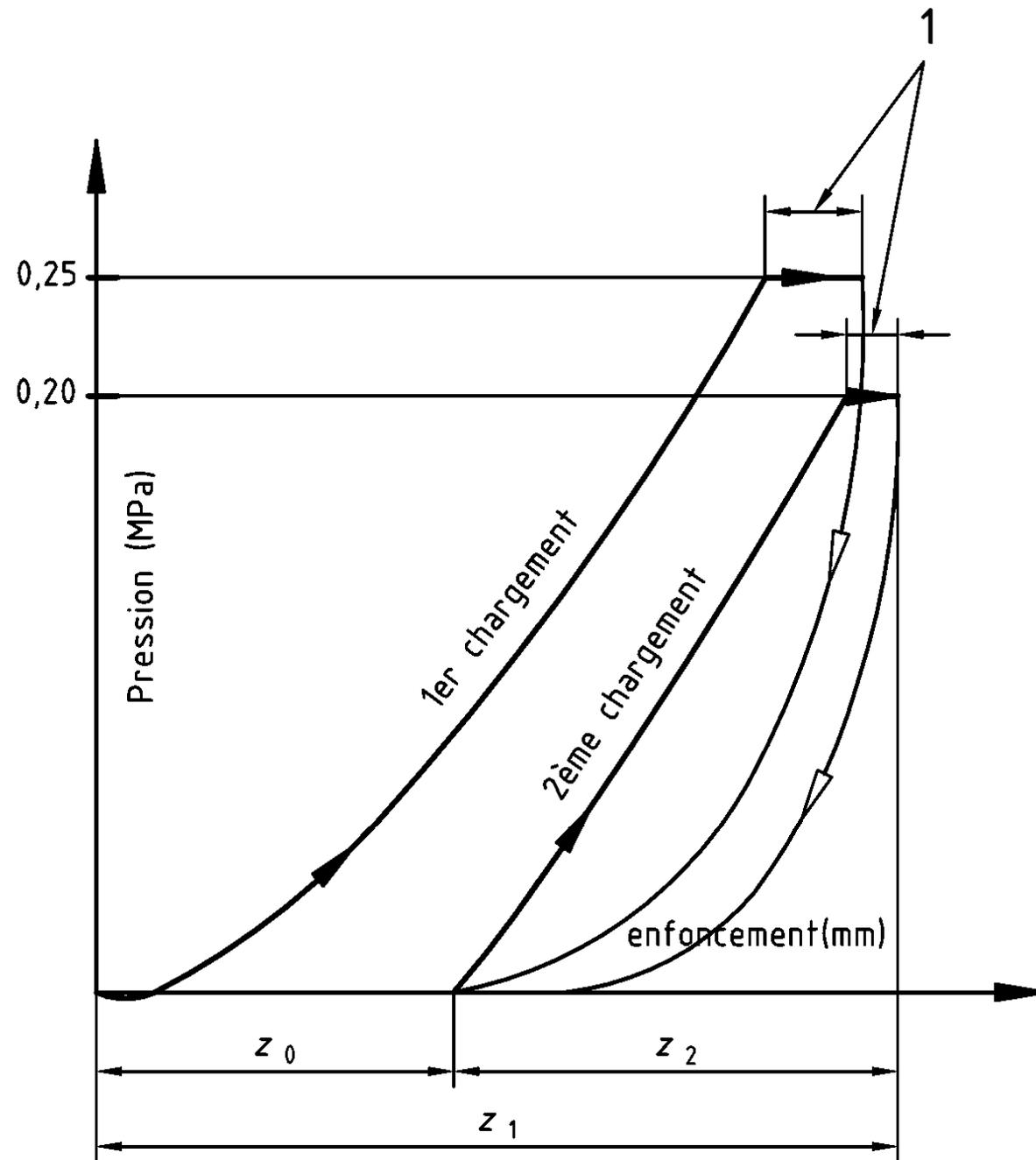
$$E_{vi} = \frac{\pi \cdot (1 - \mu^2) \cdot q \cdot \phi}{4 \cdot Z_i} = \frac{0.74 \cdot \phi \cdot q}{Z_i}$$

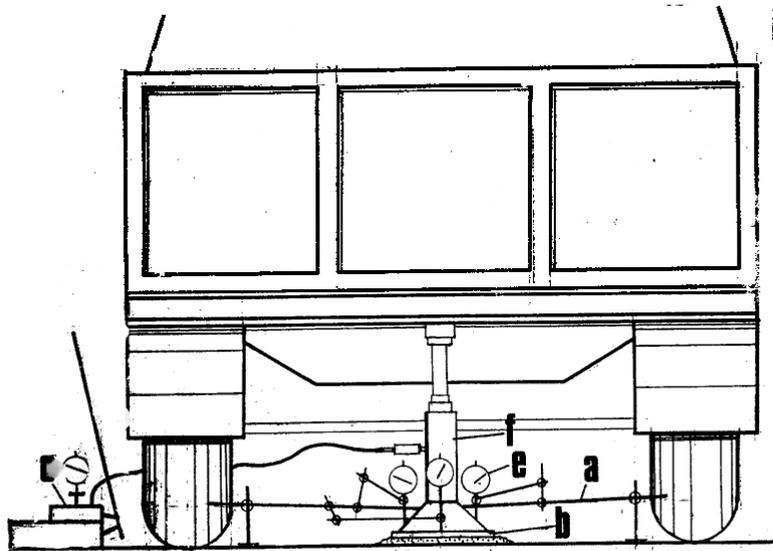
Avec Z_i = déformation du sol (en m), moyenne des lectures sur les trois comparateurs.

μ : coefficient de Poisson pris égal à 0.25

ϕ : diamètre de la plaque en m

q : contrainte appliquée (MPa)





Poutre de Benkelman





On notera que:

$EV2 < 5 \text{ MPa}$, sol très déformable (portance 0)

$5 \text{ MPa} < EV2 < 20 \text{ MPa}$, sol déformable (portance 1)

$20 \text{ MPa} < EV2 < 35 \text{ MPa}$, sol déformable (portance 2)

$35 \text{ MPa} < EV2 < 50 \text{ MPa}$, sol peu déformable (portance 3)

$EV2 > 50 \text{ MPa}$, sol très peu déformable (portance 4)

Pour une chaussée de trafic $> T3$

$20 \text{ MPa} < EV2 < 50 \text{ MPa}$: PF1

$50 \text{ MPa} < EV2 < 120 \text{ MPa}$: PF2

$EV2 > 120 \text{ MPa}$: PF3





Essai de plaque NF P 94 117-3 :

Sols : reconnaissance et essais

Portance des plates-formes

Coefficient de réaction de WAESTERGAARD sous
chargement statique de plaque





NF P 94 117-3 :

Sols : reconnaissance et essais

Portance des plates-formes

Coefficient de réaction de WAESTERGAARD sous
chargement statique de plaque





Plaque : Essai Westergaard

-Diamètre 600 mm

-Diamètre 750 mm

-Diamètre 762



L'essai s'applique aux plates-formes destinées à la construction des dallages à usage d'habitation ou industriels avec les matériaux avec $D_{\max} < 200$ mm. La valeur maximale du module pouvant être mesurée par cet essai est de 350 MPa.

Cet essai ne s'applique pas pour les plates formes routières ou ferroviaires

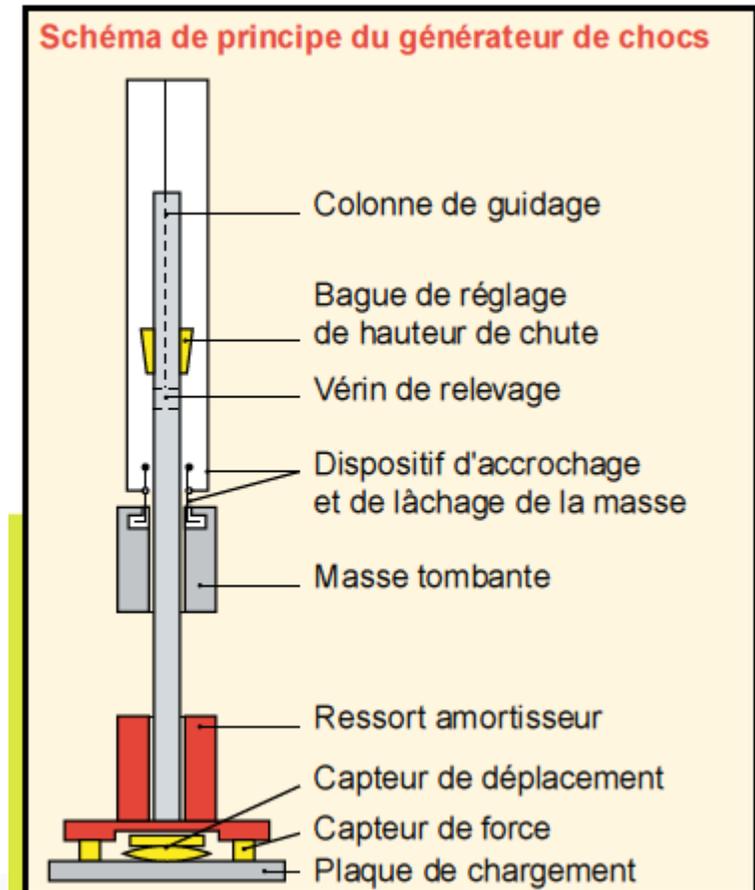


Essai NF P 94 117-2 :

Sols : reconnaissance et essais

Portance des plates-formes

Module sous chargement dynamique





Essai NF P 94 117-2 :

L'essai s'applique aux plates-formes d'ouvrages de terrassement et d'assainissement destinées à la construction d'infrastructures routières, ferroviaires, aéroportuaires et réalisées avec les matériaux définis dans la classification de la norme NF P 11-300 à l'exception de ceux comportant des éléments dont le D_{\max} excède 200 mm.

Le «Module sous chargement statique à la plaque» ne caractérise pas l'état de compacité des sols situés sous la plate-forme auscultée.



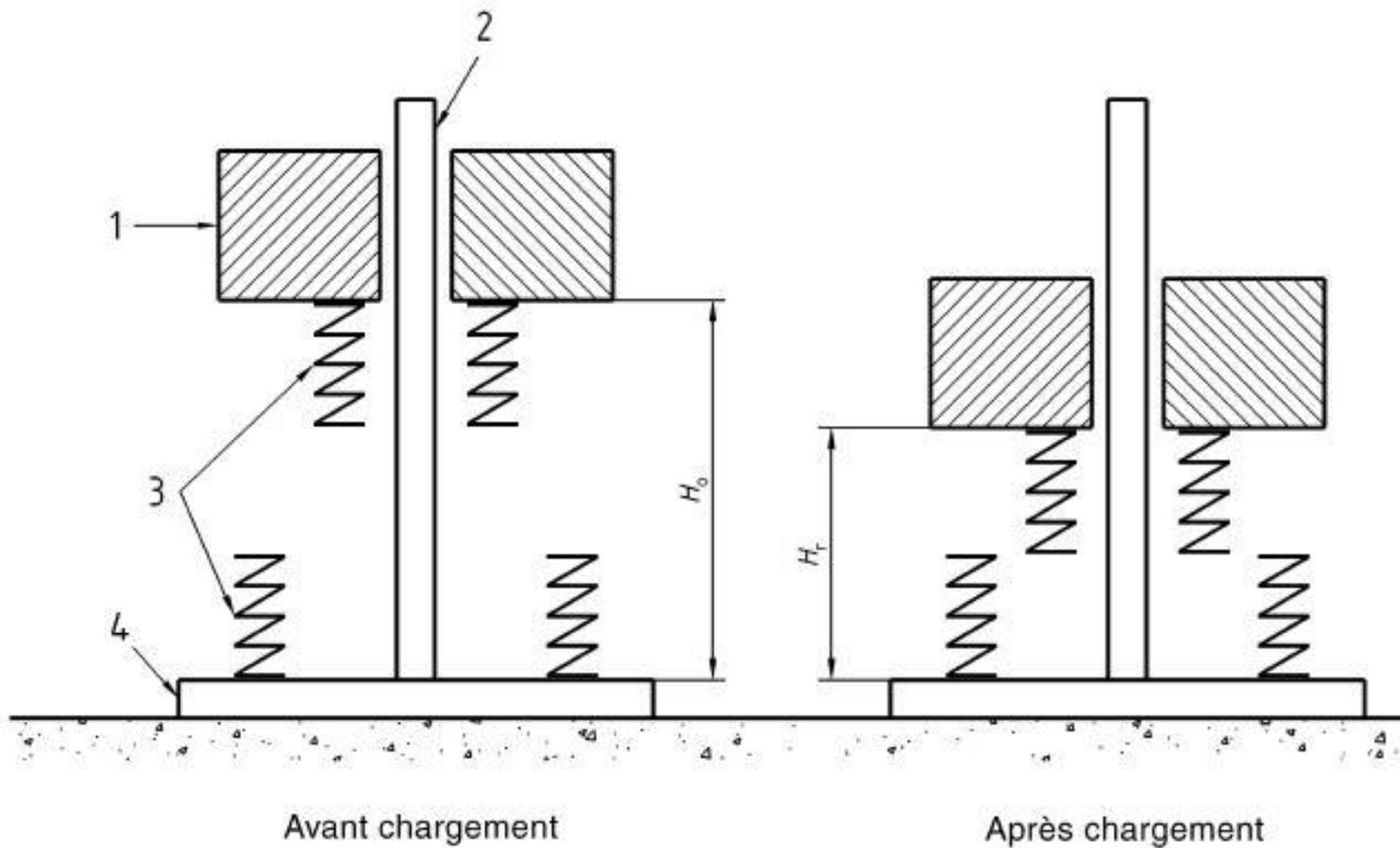
Essai NF P 94 117-2 : Deux types de matériel

DYNAPLAQUE 1 : pouvant mesurer des modules de 20 à 100 MPa

DYNAPLAQUE 2 : pouvant mesurer des modules de 20 à 250 MPa



Essai NF P 94 117-2 : DYNAPLAQUE 1



$$K = \frac{Ht}{H_0}$$

Légende

- 1 Masse tombante
- 2 Colonne de guidage
- 3 Ressorts métalliques
- 4 Plaque de chargement

$$E_{DYN1} = f(K)$$

Figure 1 — Principe de fonctionnement de la DYNAPLAQUE 1



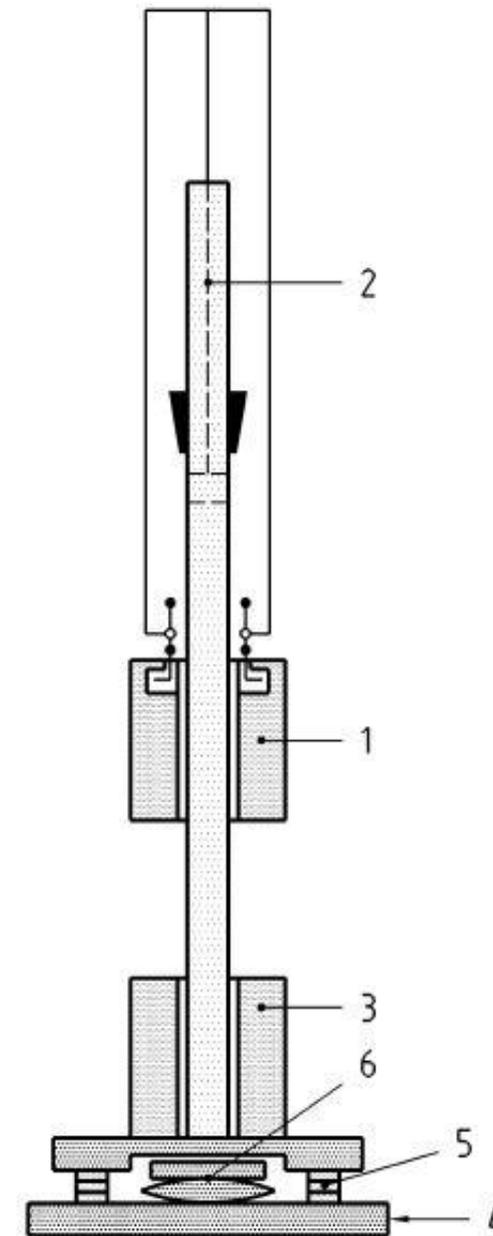
Essai NF P 94 117-2 : DYNAPLAQUE 2 :

VIDEO

Légende

- 1 Masse tombante
- 2 Colonne de guidage
- 3 Manchon en élastomère
- 4 Plaque de chargement
- 5 Capteur de force
- 6 Capteur de déplacement

Figure 3 — Vue en coupe de la Dynaplaque 2





Norme XP P 94-063

contrôle de la qualité de compactage

méthode au pénétromètre dynamique à énergie constante





Norme XP P 94-063

Cet essai s'applique au contrôle du compactage de remblais courants et à celui des remblais de fouilles et de tranchées.

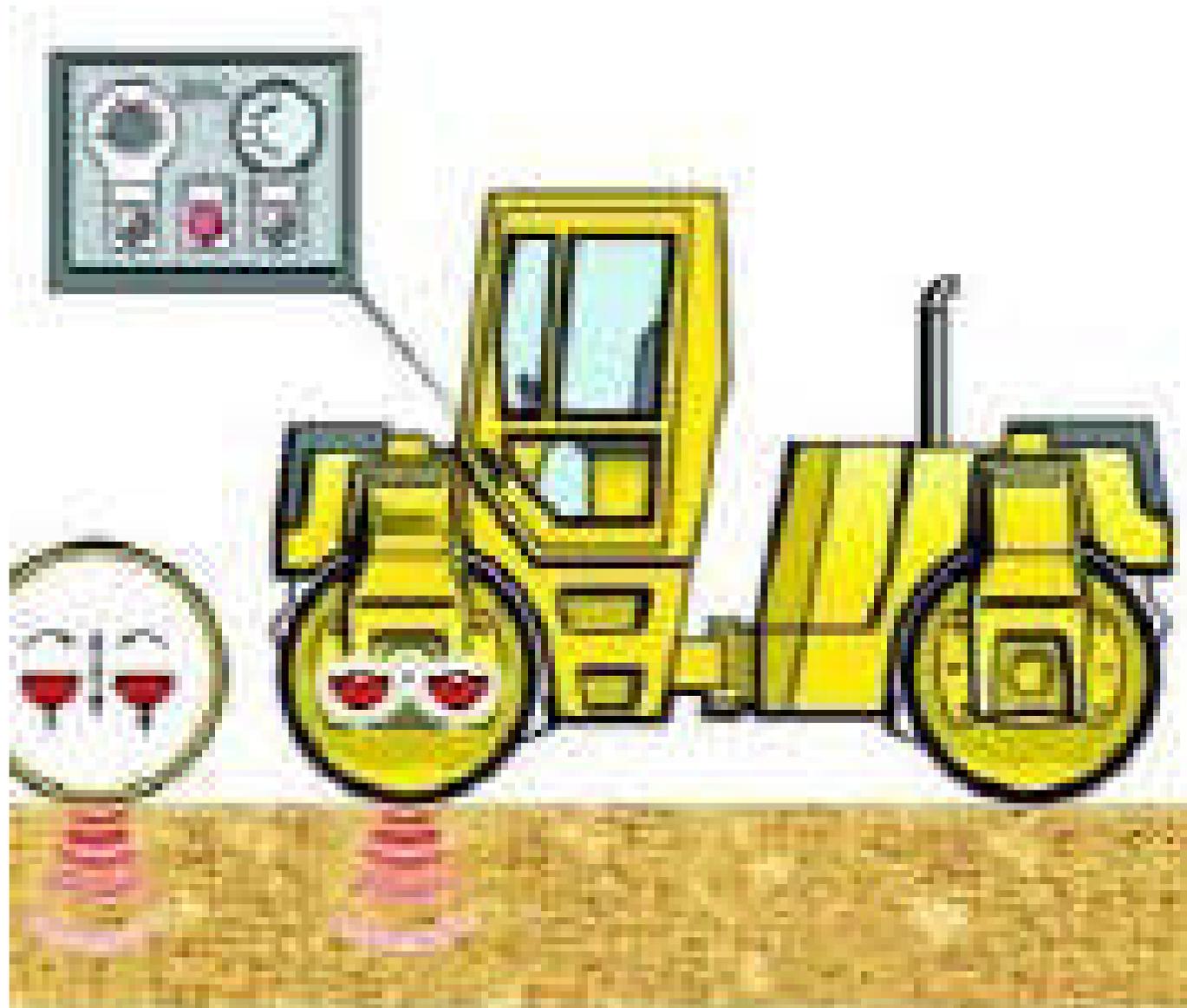
La méthode permet d'utiliser les pénétromètres dynamiques dans l'une ou plusieurs des fonctions suivantes :

- évaluer les épaisseurs de couche (fonction A) ;**
- vérifier que l'objectif de densification visé est atteint (fonction B).**

Dans ce dernier cas, il est nécessaire d'identifier, de classer les matériaux selon la norme NF P 11-300, et de connaître les objectifs de densification q_2 , q_3 , q_4 , tels que définis dans la norme NF P 98-331

- vérifier que le compactage est conforme à celui réalisé sur une planche de référence (fonction C).**

COMPACIMÈTRE





شكرا لحسن إنتباهكم

**MERCI POUR VOTRE
ATTENTION**