

INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.

Influence de la quantité d'eau et du degré de compaction des mélanges sur la résistance du sol-ciment

The Influence of Moisture Content and Compaction on the Strength of Soil-Cement

par MM. DUTRON P. et CLOES R., Laboratoire des Groupements de Producteurs de Ciment de Belgique

Sommaire

Parmi les divers facteurs sujets à variation dans l'exécution d'un revêtement ou d'une fondation en sol-ciment, l'influence de l'eau et du degré de compaction sur la résistance à la compression des sols-ciment a été examinée pour un limon et pour un sable additionnés de pourcentages croissants de ciment Portland.

A compaction égale et pour une teneur constante en ciment, les résistances les plus élevées sont obtenues avec des pourcentages d'eau égaux ou légèrement inférieurs aux pourcentages optima donnés par les essais Proctor ; mais des augmentations de 2 pour cent de la quantité d'eau n'entraînent qu'une réduction assez faible des résistances.

C'est le degré de compaction qui exerce une influence déterminante sur les résistances.

La résistance des sols sablonneux-ciment est beaucoup moins affectée par une diminution de compacité que celle des sols limoneux-ciment.

Une compensation de la perte de résistance, due à un manque de compacité, par une augmentation de la teneur en ciment et une diminution de la teneur en eau est partiellement possible pour les sols sablonneux, mais elle ne peut guère être espérée pour les sols limoneux.

L'influence de la nature du sol est mise en évidence par l'aptitude remarquable du limon à la stabilisation ; à teneur égale en ciment et à même degré de compaction le limon a donné des résistances nettement supérieures, en général doubles de celles obtenues avec le sable. Avec une teneur encore économique en ciment ceci peut compenser dans une certaine mesure l'affaiblissement plus marqué de la résistance des sols limoneux-ciment provoqué par une diminution de compacité. Le degré de compaction reste néanmoins le facteur prépondérant.

Objet de la recherche

La composition sol-ciment ayant été arrêtée par une étude préalable, on s'est demandé comment varie sa résistance à la compression en fonction de la quantité d'eau et du degré de compaction du mélange. En d'autres termes, la question posée est la suivante : à quelle modification de la résistance d'un sol-ciment faut-il s'attendre dans la mesure où l'on s'écarte sur le chantier des conditions réalisées en laboratoire.

Les essais ont porté sur deux sols : un sable légèrement calcaireux et un limon. Les caractéristiques principales de ces sols sont données au diagramme de la Fig. 1. Le ciment employé est un ciment Portland normal mélangé à raison de : 8, 10, 12 et 14 pour cent avec le sable et de 6, 8, 10 et 12 pour cent avec le limon.

L'étude de l'influence des différents facteurs pouvant intervenir dans l'exécution sur chantier a fait l'objet des essais suivants :

Summary

Amongst the variable factors influencing the characteristics of a soil-cement mixture, the moisture content and the degree of compaction of silt-cement and sand-cement mixtures, with increasing quantities of Portland cement added to them, have been investigated by the authors.

They have discovered that when these mixtures are equally compacted and have the same cement content, maximum strength is attained at a moisture content equal to or slightly less than the optimum given by the Proctor test ; the strength, however, will be only slightly reduced by a 2 per cent increase of moisture content. Strength is greatly influenced by the degree of compaction, but the strength of a sand-cement mixture is much less affected by reduced compaction than is the strength of a silt-cement mixture.

Loss of strength due to inadequate compaction is partially counteracted in sandy soil by an increase of cement content with a corresponding reduction of moisture content. Such a counterbalance is scarcely possible in silty soils.

The authors consider that silt is particularly suitable for stabilisation. With equal compaction and the same cement content, a silt-cement mixture was generally found to have twice the strength of a corresponding sand-cement mixture. This partly compensates for the greater loss of strength of a silt-cement mixture due to reduced compaction. It is considered that compaction is the most important strength factor.

1. Influence combinée de la teneur en eau et de la variation de densité sèche pour une même compaction (Proctor modifié).

Les éprouvettes obtenues par l'essai Proctor modifié sont caractérisées par une variation simultanée de la teneur en eau et de la compacité. Les résistances à la compression à 7 jours de ces éprouvettes ne mettent en évidence que l'influence simultanée et non l'influence individuelle de ces deux facteurs. Elles permettent cependant de répondre à la question : quelle est, pour la même compaction, la teneur en eau qui conduit à la résistance maximum. Cette teneur en eau correspond-elle à celle de la densité sèche optimum ?

Les résultats de ces essais sont reportés aux diagrammes 2 pour le sable et 3 pour le limon.

Les variations du poids volumique sec ($PVS = \gamma_d$) y sont données en valeurs absolues et en valeurs relatives. Celles-ci sont faibles (quelques pour cent par rapport au γ_d maximum) pour les mélanges sable-ciment de mêmes

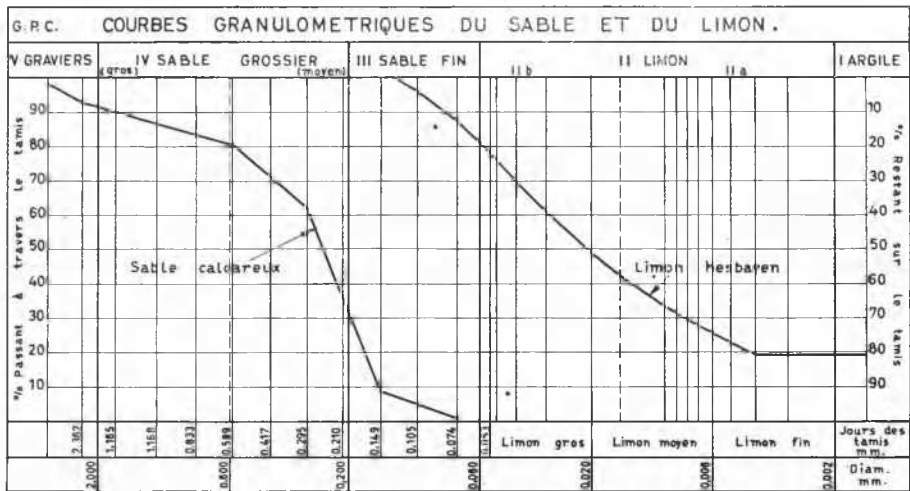


Fig. 1 Courbes granulométriques du sable et du limon.
Grain size distribution curves of sand and silt.

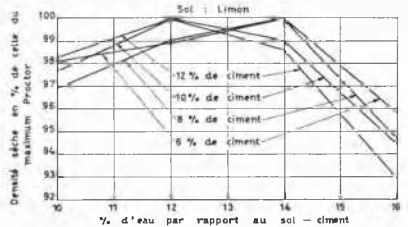
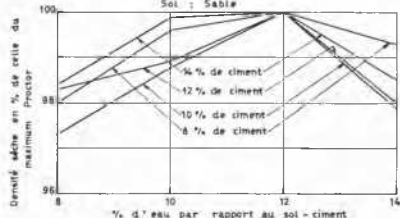
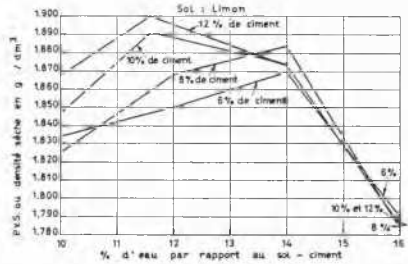
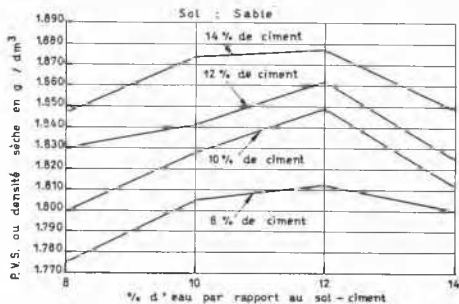


Fig. 2 *Essais Proctor modifié.* — Influence de la teneur en eau sur le poids volumique sec PVS (γ_d) de mélanges sable-ciment à diverses teneurs en ciment. Poids volumétriques secs, exprimés en pour cent du PVS maximum (γ_d) Proctor modifié.

Fig. 3 *Essais Proctor modifié.* — Influence de la teneur en eau sur le poids volumique sec PVS (γ_d) de mélanges limon-ciment à diverses teneurs en ciment. Poids volumétriques secs, exprimés en pour cent du PVS maximum (γ_d) Proctor modifié.

Modified Proctor Tests. — Influence of moisture content on the dry density of sand-cement mixtures with different proportions of cement. Dry density expressed as a percentage of the modified Proctor maximum dry density. Moisture content in per cent of soil-cement.

Modified Proctor Tests. Influence of moisture content on the dry density of silt-cement mixtures with different proportions of cement. Dry density expressed as a percentage of the modified Proctor maximum dry density. Moisture content in per cent soil-cement weight.

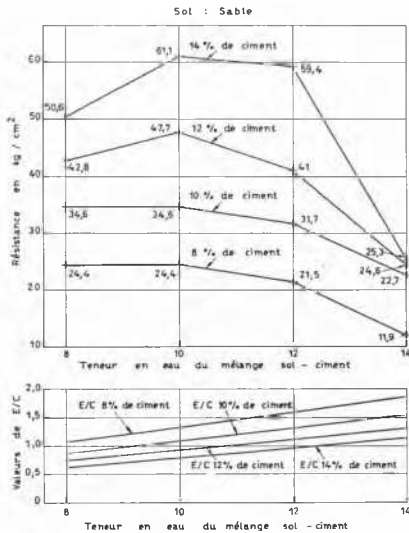


Fig. 2 (a) Influence combinée sur la résistance de la teneur en eau et de la variation de PVS (γd) qu'elle entraîne. Résistance à 7 jours déterminée sur les éprouvettes Proctor.
(a) Influence of both moisture content and resulting variation in dry density on the strength. Strength of Proctor samples at seven days.

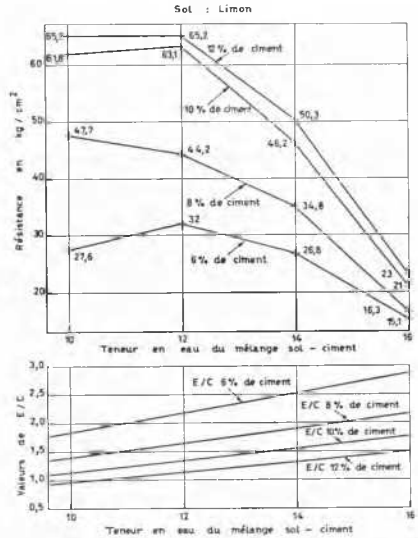


Fig. 3 (a) Influence combinée sur la résistance de la teneur en eau et de la variation de PVS (γd) qu'elle entraîne. Résistance à 7 jours déterminée sur les éprouvettes Proctor.
(a) Influence of both moisture content and resulting variation of dry density on the strength. Strength of Proctor samples at seven days.

proportions, quand la teneur en eau va de 8 à 14 pour cent. Elles sont encore faibles pour le limon tant que le pourcentage d'eau se tient entre 10 et 14 pour cent, mais la diminution du poids volumique sec se marque rapidement entre 14 et 16 pour cent d'eau. A ce moment, il y a visiblement excès d'eau dans le mélange.

Si l'on examine les diagrammes de résistances à la compression à 7 jours, on constate que le sable-ciment atteint sa résistance maximum pour une quantité d'eau inférieure d'environ 2 pour cent à celle du Proctor maximum. Pour le limon, la résistance maximum a été obtenue pour des teneurs en eau inférieures ou égales à l'optimum Proctor (Fig. 2 (a) et 3 (a)).

Il y a donc intérêt, avec le sable et le limon étudiés, à maintenir les teneurs en eau des mélanges égales ou un peu inférieures à celles de l'optimum Proctor, pour autant que le sol-ciment ne soit pas soumis à une trop forte évaporation avant la prise.

2. Influence du degré de compaction quand on maintient constante la composition : sol, ciment et eau — du mélange

Les mélanges sont exécutés avec les quantités d'eau correspondantes à celles du Proctor modifié maximum trouvées dans les essais I.

Avec chaque composition, des éprouvettes BSS ($\varnothing = 2''$, $H = 4''$) ont été fabriquées statiquement par compression, de manière à obtenir des poids volumiques secs respectivement de 100, 95, 90, 85 et 80 pour cent du poids volumique sec maximum du Proctor modifié.

Les résultats des essais font l'objet des Figs. 4 (a) et 4 (b). La chute des résistances est sensiblement du même ordre pour les quatre teneurs en ciment, mais elle est beaucoup plus marquée pour le limon que pour le sable.

D'autre part, la résistance du sol-ciment diminue beaucoup plus que sa compacité, 2,2 à 2,5 × plus pour le sable et 3,5 à 3,6 × plus pour le limon, comme le montre le tableau I

qui donne les rapports $\frac{\text{perte de résistance}}{\text{perte de compacité}}$

Tableau I

Rapports : $\frac{\text{perte de résistance}}{\text{perte de compacité}}$ tirés des diagrammes 4 (a)-4 (b)

Perte de densité sèche des mélanges en pour cent	5	10	15	20
Sable				
Moyenne des pertes de résistance par rapport à celle du Proctor en pour cent	12,2	22,0	34,6	50,3
Rapport				
perte de résistance	2,44	2,2	2,3	2,52
perte de compacité				
Limon				
Moyenne des pertes de résistance par rapport à celle du Proctor en pour cent	18,0	35,9	54,8	70,1
Rapport				
perte de résistance	3,60	3,59	3,65	3,51
perte de compacité				

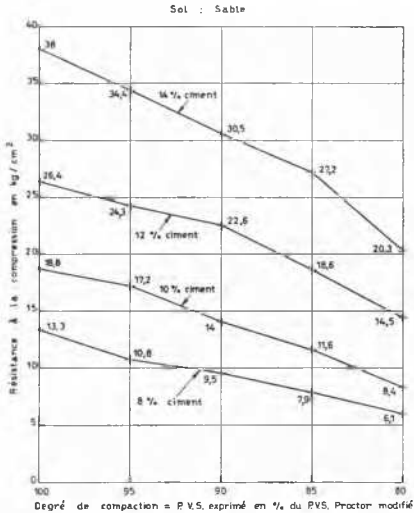


Fig. 4 (a) Influence de la compacité sur la résistance, quand on maintient constante la composition du mélange (sable-ciment-eau).

(a) Influence of the degree of compaction on strength, the composition of the mixture (sand-cement-water) being kept constant.

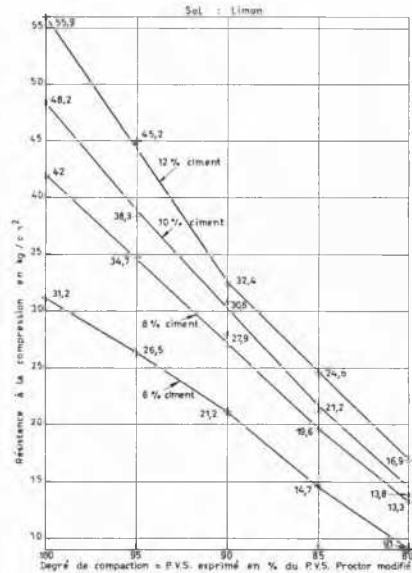


Fig. 4 (b) Influence de la compacité sur la résistance, quand on maintient constante la composition du mélange (limon-ciment-eau).

(b) Influence of the degree of compaction on strength, the composition of the mixture (silt-cement-water) being kept constant.

Un abaissement de la compacité de 100 pour cent à 80 pour cent a produit un abaissement de résistance de 100 à 50 pour cent pour le sable et de 100 à 30 pour cent pour le limon, la composition du mélange — sol, ciment et eau — restant constante.

Cette différence de comportement des deux sols semble devoir être attribuée au fait que, par la présence de ses plus fines particules, le limon a une cohésion propre plus grande que le sable sous l'effet des actions de capillarité, d'adhésion et même de liaisons ioniques indépendamment du ciment et qu'il perd cette action d'autant plus vite qu'il est moins compacté, c'est-à-dire que ses particules sont moins rapprochées.

3. Influence du degré de compaction quand on maintient constante la quantité de ciment par unité de volume de sol-ciment compacté

On se trouve dans le cas du «mix in place» qui impose la mise en œuvre d'une quantité constante de ciment par m² de sol-ciment d'épaisseur donnée.

Les quantités de ciment par unité de volume de sol-ciment 133,3-166,7 et 200 kg/m³ ont été choisies de manière à correspondre à des quantités de ciment de 20, 25 et 30 kg/m² de sol-ciment compacté en 15 cm d'épaisseur.

Deux cas sont à envisager :

3.1. Cas où la quantité d'eau reste constante dans l'unité de volume de sol-ciment en même temps que la quantité de ciment, c'est-à-dire que le rapport eau/ciment est une constante.

Les résultats des essais conduits suivant ce cas sont réunis à la Fig. 5 et au Tableau 2; celui-ci indique comment varient

en valeurs relatives les résistances à la compression et, entre parenthèses, le pourcentage de ciment par rapport au sol, ce pourcentage étant croissant avec la diminution du degré de compaction.

Malgré l'accroissement de la teneur en ciment, il y a une diminution importante des résistances avec la diminution de compacité. Elle reste plus marquée pour le limon que pour le sable. Il est vrai que les mélanges étaient d'autant plus mouillés que leur compacité était plus réduite, de manière à maintenir un rapport eau/ciment constant quand la compacité décroît.

On peut se rendre compte de ce que l'on peut regagner en résistance par le maintien d'une quantité constante de ciment au m³ en faisant la comparaison des moyennes des résistances relatives de cette série d'essais 3.1. (Tableau 2) avec celles de la série d'essais 2 (Tableau 1).

Le gain de résistance est plus marqué pour le sable que pour le limon, notamment aux compacités à 95 et 90 pour cent. Dans le cas où le sol-ciment s'exécute avec une quantité constante de ciment par m², le facteur compacité continue donc à jouer le rôle le plus important vis-à-vis de la résistance à la compression ainsi que le montrent les rapports

$$\frac{\text{perte de résistance}}{\text{perte de compacité}} \text{ du Tableau 3.}$$

En comparant ces données à celles du Tableau 1, on voit à nouveau que le maintien d'une quantité constante de ciment par m² de revêtement a avantage beaucoup plus le sable que le limon, ce dernier restant beaucoup plus sensible à une diminution du degré de compaction.

Tableau 2

Poids volumique sec exprimé en pourcentage de celui du Proctor modifié			100	95	90	85	80
Nature du sol	Quantité de ciment dans le sol-ciment		Résistances en pour cent de la résistance obtenue avec le maximum Proctor				
	en kg/m ³	en kg/m ² Epais. 15 cm					
Sable	133,3	20	100 (7,95)	95,7 (8,40)	88,2 (8,90)	79,8 (9,45)	68,0 (10,20)
	166,7	25	100 (9,90)	94,0 (10,50)	86,6 (11,15)	81,2 (11,85)	71,5 (12,70)
	200,0	30	100 (12,00)	94,3 (12,75)	87,0 (13,55)	79,2 (14,45)	67,8 (15,50)
Moyenne			100	94,9	87,3	80,0	69,1
Limon	133,3	20	100 (7,40)	82,1 (7,45)	67,7 (7,95)	47,3 (8,35)	32,5 (8,90)
	166,7	25	100 (9,65)	85,5 (10,25)	72,1 (10,85)	56,0 (11,55)	42,1 (12,35)
	200,0	30	100 (11,80)	80,0 (12,45)	66,2 (13,25)	55,2 (14,25)	37,8 (15,45)
Moyenne			100	82,0	69,0	52,5	37,5

N.B. — Les valeurs entre parenthèses donnent le pourcentage de ciment par rapport au sol.

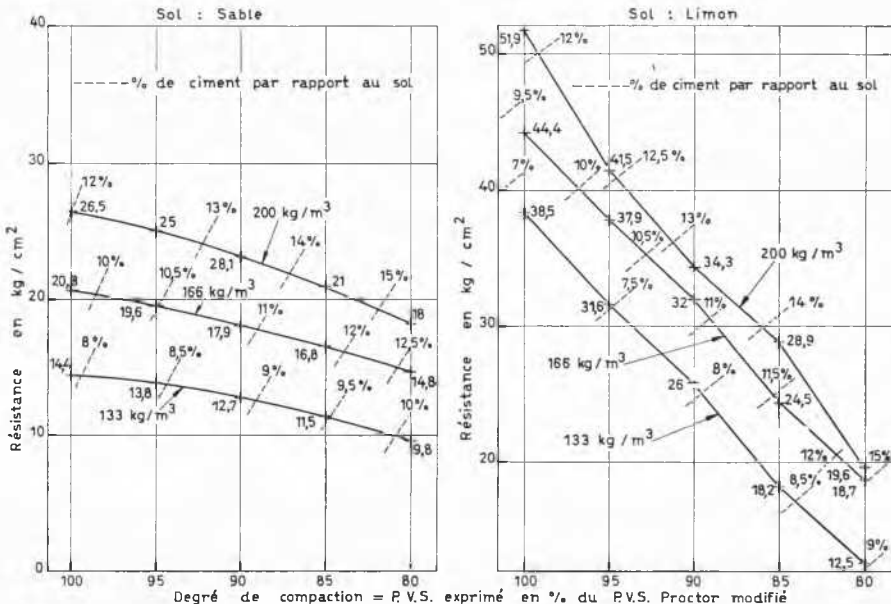


Fig. 5 Influence sur la résistance du degré de compaction du sol-ciment quand on maintient constantes par unité de volume compacté les quantités de ciment et d'eau.

Influence of the degree of compaction on strength, the cement and water contents per unit of compacted volume, being kept constant.

Tableau 3
Rapports : $\frac{\text{perte de résistance}}{\text{perte de compacité}}$ tirés du tableau 2

Perte de densité sèche des mélanges en pour cent	5	10	15	20
Sable				
Perte moyenne de résistance en pour cent	5,10	12,70	20,00	30,90
Rapport $\frac{\text{perte de résistance}}{\text{perte de compacité}}$	1,02	1,27	1,35	1,54
Limon				
Perte moyenne de résistance en pour cent	17,50	31,00	47,50	62,50
Rapport $\frac{\text{perte de résistances}}{\text{perte de compacité}}$	3,50	3,10	3,17	3,12

3.2. Cas où le pourcentage d'eau reste constant, c'est-à-dire que le rapport eau/ciment diminue au fur et à mesure que le pourcentage de ciment augmente.

Les essais ont été effectués d'après le même programme de décroissance de compacité et avec teneur constante en ciment par m³ de sol-ciment compacté, mais avec un pourcentage d'eau constant du mélange.

En conséquence, la quantité d'eau par m³ de sol-ciment compacté décroît, tandis que la teneur en ciment croît ; le rapport eau/ciment diminue quand la compacité tombe progressivement de 100 à 80 pour cent du Proctor.

Les résultats moyens de ces essais 3.2. pour 20, 25 et 30 kg de ciment par m² sont donnés au Tableau 4 ci-après avec, pour comparaison, ceux obtenus dans les séries 2 et 3.1.

Tableau 4
Régression moyenne en pourcentage des résistances en fonction de la diminution de la compacité

Poids volumique sec exprimé en pour cent de celui du Proctor modifié	100	95	90	85	80
Sable					
Essais 2	100	88,8	78,0	65,4	49,7
— 3.1	100	94,9	87,3	80,0	69,1
— 3.2	100	98,6	94,1	89,7	74,1
Limon					
Essais 2	100	82,0	64,1	45,2	29,9
— 3.1	100	82,0	69,0	52,5	37,5
— 3.2	100	80,8	70,4	50,5	36,2

Essais 2. — Les quantités de sol, de ciment et d'eau, toujours en proportions constantes, diminuent avec la compacité.

Essais 3.1. — Les quantités de ciment et d'eau restent constantes (le rapport eau/ciment = constant) pour tous les degrés de compaction, la quantité de sol diminuant avec la compacité.

Essais 3.2. — La quantité de ciment et le pourcentage d'eau restent constants (le rapport eau/ciment décroît) pour

tous les degrés de compaction, les quantités d'eau et de sol diminuant avec la compacité.

On voit que de meilleures conditions de durcissement du ciment par la présence de moins d'eau entraînent un relèvement des résistances avec le sable, mais sont sans influence pour le limon.

En fait, il ne faut pas perdre de vue que la diminution de la quantité d'eau ne réduit pas pour autant le volume total occupé par l'eau et l'air ; c'est simplement le vide d'air qui augmente.

Or, on sait qu'en béton, la résistance est gouvernée par le rapport $\frac{\text{ciment}}{\text{eau + air}}$. Si le vide est souvent négligeable dans

le béton parce qu'il est petit et si l'on ne tient en général plus compte que du rapport ciment/eau, on ne peut plus le faire pour des mélanges dont le vide d'air atteint 10 à 30 pour cent.

En conclusion le rôle prédominant de la compaction dans le développement des résistances n'en est que davantage confirmé.

4. Influence de la quantité d'eau sur la résistance du sol-ciment en maintenant constantes sa teneur en ciment et sa densité sèche

Les essais ont porté sur des mélanges sable ou limon à diverses teneurs en ciment. La variable est la quantité d'eau du mélange qui croît de 2 en 2 pour cent à partir d'un minimum de 9 à 10 pour cent.

La caractéristique des essais réside en ce que ces mélanges sont compactés statiquement suivant le procédé anglais, de manière à maintenir toujours le même poids volumique de sol et de ciment, quelle que soit la quantité d'eau. Ceci ne peut se réaliser pratiquement que pour un poids volumique sec inférieur au poids volumique sec maximum du Proctor modifié, ce qui a été fait dans les essais. Les caractéristiques des mélanges et leurs résistances sont données au Tableau 5 et au diagramme 6.

A poids volumique constant, les résistances varient relativement peu, tant que le pourcentage d'eau ne s'écarte pas de plus que ± 2 pour cent de la quantité d'eau de l'optimum Proctor.

Conclusions

1. Influence combinée de la teneur en eau et de la compacité pour une même compaction.

Pour les deux sols et pour une même proportion de ciment, le poids volumique sec ne varie que de quelques pour cent en fonction de la teneur en eau, tant que celle-ci ne s'écarte pas de plus ou moins 2 pour cent de la teneur optimum. Les résistances sont les plus élevées pour des teneurs en eau légèrement inférieures ou égales à celles de l'optimum Proctor. En conséquence, sur chantier, ce sont ces teneurs en eau qui donneront avec un engin de compaction donné et pour un sol et une teneur en ciment déterminés, les résultats les meilleurs.

2. Influence du degré de compaction, la composition du mélange étant constante.

— La résistance diminue fortement avec le degré de compaction, le limon étant beaucoup plus affecté que le sable. C'est ainsi que pour le limon, une chute de 5 pour cent de compacité nécessiterait environ 4 pour cent de ciment en plus pour récupérer la perte de résistance, tandis que pour le sable, une diminution de 15 pour cent de compacité n'exigerait que 2 pour cent de ciment pour retrouver la résistance normale.

Tableau 5

Caractéristiques et résistances des mélanges. Essais 4.
Age : 7 jours. Conservation sous paraffine 25° C

Teneur en ciment et PVS* (γd)	8 pour cent 1790		10 pour cent 1810		12 pour cent 1827		14 pour cent 1848	
	Pourcent. d'eau	Résist. kg/cm ²	Pourcent. d'eau	Résist. kg/cm ²	Pourcent. d'eau	Résist. kg/cm ²	Pourcent. d'eau	Résist. kg/cm ²
Sable	9,30	18,90	9,25	29,00	9,00	36,10	9,10	48,20
	11,45	18,90	11,45	30,10	11,20	38,60	11,10	55,90
	13,60	17,30	13,65	26,10	13,45	36,10	13,70	51,10
	15,75	15,20	15,85	22,60	15,70	31,70	15,95	41,10
Teneur en ciment et PVS* (γd)	6 pour cent - 1816		8 pour cent - 1821		10 pour cent - 1826			
	Pourcent. d'eau	Résist. kg/cm ²	Pourcent. d'eau	Résist. kg/cm ²	Pourcent. d'eau	Résist. kg/cm ²	Pourcent. d'eau	Résist. kg/cm ²
Limon	9,75	34,70	10,15	38,30	10,15	46,30		
	11,90	40,50	12,30	45,60	12,30	51,20		
	14,00	39,60	14,45	41,70	14,50	54,50		
	16,10	32,60	16,60	40,30	16,70	47,30		

* Poids volumique sec en g/dm³.

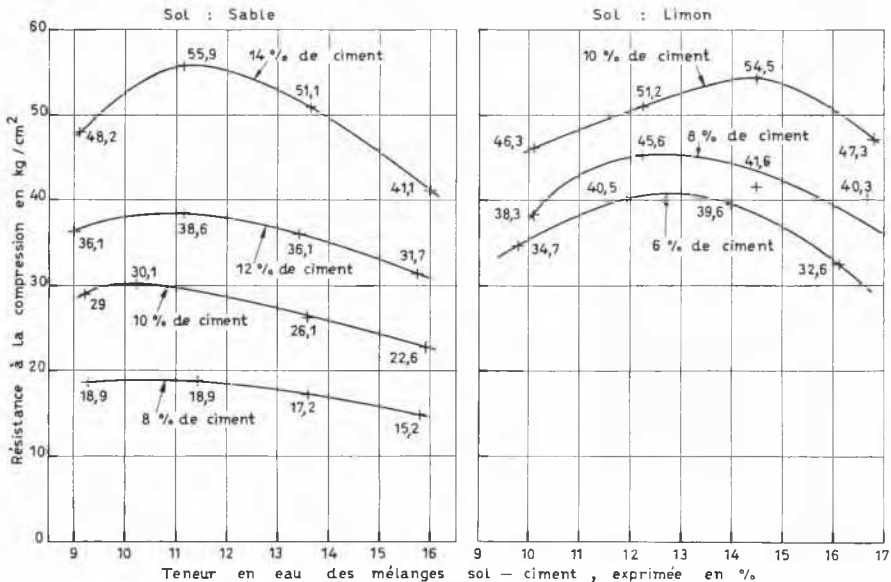


Fig. 6 Influence de la quantité d'eau sur la résistance du sol-ciment de densité sèche (γd) et de teneur en ciment constantes.
Influence of the moisture content on the strength, the dry density and the cement content being kept constant.

— La perte relative de résistance, pour une même chute de compacité, ne varie guère avec la teneur en ciment.

En conséquence, sur chantier, lorsque le sol, le ciment et l'eau sont mélangés en proportions pratiquement constantes (cas du travelling ou stationery plant), la puissance des engins de compactage, seul facteur variable, est un élément primordial, au point de vue soit des résistances,

soit de l'économie de ciment, ce d'autant plus que le sol est limoneux.

3. Influence du degré de compaction, la quantité de ciment par unité de volume du sol-ciment compacté et par unité de surface du revêtement étant constante (cas du «mix in place»).

3.1. Quand le rapport eau/ciment reste constant (teneur en eau augmentant avec la teneur en ciment), la perte relative de résistance pour une même chute de compacité, ne semble pas influencée par la teneur en ciment (20, 25 ou 30 kg/m² pour une épaisseur de 15 cm).

Par contre, l'accroissement de teneur en ciment, lié à la diminution de compacité, amenuise la chute de résistance. Celle-ci est réduite à peu près de moitié pour le sable, tandis que pour le limon déjà plus affecté dans les essais précédents, le gain est beaucoup plus faible.

En conséquence, sur chantier, lorsque le ciment est répandu et mélangé au sol en quantité constante par unité de surface et est additionné d'une quantité également constante d'eau, la diminution de poids volumique sec, ce qui correspond à l'incorporation d'une moins grande quantité de sol pour réaliser la couche de sol-ciment compacté à l'épaisseur voulue, entraîne une réduction plus ou moins importante de résistance suivant la nature du sol. Ainsi pour une chute de compacité de 15 pour cent, les résistances sont diminuées de 20 pour cent pour le sable et de 50 pour cent pour le limon.

3.2. Quand la teneur en eau est constante (le rapport eau/ciment diminuant avec l'augmentation de teneur en ciment et la réduction de compacité), il y a réduction de l'influence de la chute de compacité sur les résistances du sable-ciment. Pour une perte de 15 pour cent de compacité, celles-ci ne diminuent plus que de 10 pour cent au lieu de 20 pour cent précédemment. Par contre, l'effet sur le limon est pratiquement nul.

4. Quand la quantité d'eau varie, la teneur en ciment et la densité sèche restant constantes, les résistances les plus élevées sont obtenues, tant pour le sable que pour le limon, pour des teneurs en eau égales ou légèrement inférieures à celles données par les essais Proctor. Toutefois, le fait d'accroître de 2 et même de 4 pour cent les teneurs en eau par rapport aux teneurs optima n'entraînent qu'une réduction assez faible des résistances.

Dans tous les cas, le maintien d'un poids volumique aussi élevé que possible reste donc le facteur prépondérant.