

# DESCRIPTION DE MÉLANGES SABLE/ARGILE COMPACTÉS : PHÉNOMÈNES ASSOCIÉS AU COMPACTAGE ET SEUILS DE CLASSIFICATION

V. FERBER, H. HAVARD, J.C. AURIOL & K. BOUSSAID  
Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Bouguenais, France  
Valery.Ferber@lcpc.fr, Herve.Havard@lcpc.fr, Jean-Claude.Auriol@lcpc.fr,  
Khaled.Boussaid@lcpc.fr

## RÉSUMÉ

Dans le domaine des Terrassements, les classifications de sols sont basées en partie sur des critères granulométriques, et en particulier sur la proportion des fines. Les seuils actuellement en vigueur ont été fixés plus ou moins empiriquement mais l'influence de la proportion de fines sur le processus de compactage est rarement expliquée de manière quantitative. A cette fin, des essais de compactage ont été réalisés sur des mélanges variés de sable et d'argile. A l'optimum Proctor, la masse volumique sèche et la teneur en eau de la fraction fine et la masse volumique apparente de la fraction sableuse ont été calculées. L'évolution de ces paramètres avec la proportion de fines montre qu'entre 0 et 10-20 % de fines, la fraction fine est lâche et ne remplit pas complètement les vides laissés par la fraction grossière. Dans cet intervalle, le comportement de la fraction grossière dépend fortement de sa granulométrie. Entre 10-20 % et environ 35-50 % de fines, les vides entre grains de sable sont remplis par la fraction fine et la masse volumique sèche de cette dernière fraction croît régulièrement avec sa proportion. A l'inverse, la masse volumique apparente de la fraction sableuse décroît. Par ailleurs, le mélange atteint sa masse volumique sèche maximale entre 20 et 30 % de fines, cette valeur étant apparemment en relation avec l'énergie de compactage. Entre 35-50 et 100 % de fines, la compacité de la fraction fine est peu dépendante de sa proportion dans le mélange. Dans ce cas, le mélange adopte le comportement de sa fraction fine. Ainsi, bien que les mélanges sable-argile ne puissent prétendre représenter rigoureusement les sols naturels, cette approche fait ressortir qu'à l'optimum Proctor, la masse volumique sèche de la fraction fine augmente avec la proportion de fines en trois phases, qui expliquent la prise en compte de deux seuils de proportion de fines dans plusieurs classifications de sol. Il semble aussi que ces seuils dépendent de la granulométrie de la fraction grossière et de l'énergie de compactage. La confrontation de ces observations aux seuils en vigueur dans différentes classifications met en évidence la variété des choix dans la définition des familles de sols.

## MOTS CLÉS

COMPACTAGE / OPTIMUM PROCTOR / ARGILE / SABLE / CLASSIFICATION / SEUILS

## 1. INTRODUCTION

Les classifications de sols ont pour objectif pratique de regrouper sous une dénomination commune des sols présentant des comportements similaires. Dans le domaine des terrassements, le comportement au compactage est un critère incontournable pour déterminer les frontières séparant diverses classes de sol. De nombreux paramètres influencent l'aptitude au compactage d'un sol, et les classifications courantes ont tenté de les intégrer quantitativement au mieux par des essais d'identification. Dans les matériaux naturels, les essais permettant de décrire la distribution des tailles des particules et les

propriétés physico-chimiques de la fraction argileuse constituent les bases principales de classification.

Parmi les critères de classification, la proportion de fines, appelée aussi passant à 80 microns (ou 63 ou 75 microns selon les pays), est un paramètre ancien et universellement utilisé. Il permet notamment de distinguer les sols fins des sols sablo-graveleux.

Pour apporter des éléments de compréhension aux phénomènes reliant la nature des sols et leur comportement au compactage, nous avons réalisé des essais Proctor sur des mélanges sable/argile à proportion variable et repris des données bibliographiques similaires (Mvondo-Ondoa, 1979). Les résultats de ces essais à proportion de fines variable ont été interprétés pour décrire l'état de chacune des fractions lorsque le mélange qu'elles composent est compacté à l'énergie Proctor. Après avoir présenté les caractéristiques des matériaux testés et la procédure expérimentale utilisée, les résultats des essais seront exposés et interprétés. Une discussion sur les seuils en vigueur à la lumière de ces résultats est ensuite proposée.

## 2. CARACTÉRISTIQUES DES MATERIAUX ETUDIÉS

Dans le cadre de cette étude, un certain nombre de données expérimentales proviennent du travail de Mvondo-Ondoa (1979) sur des mélanges réalisés avec le sable de Leucate et les argiles d'Aix et de Provins. Toutes les données expérimentales sur ces matériaux sont donc tirées des travaux publiés. Pour compléter ces données bibliographiques, de nouveaux essais de compactage ont été réalisés sur des mélanges constitués de kaolinite Speswhite (fraction fine) et de sables de Missillac et de Fontainebleau (fraction sableuse).

D'une manière générale dans l'étude présentée ici, toutes les argiles utilisées sont composées à 100 % de particules de taille inférieure à 80  $\mu$ , et tous les sables utilisés sont composés à 100 % de particules de taille supérieure à 80  $\mu$ . Les autres caractéristiques des argiles sont reportées dans le tableau 1. Les courbes granulométriques des matériaux sont présentées sur la figure 1.

Tableau 1 – Principales caractéristiques des argiles

	% < 2 $\mu$	Masse vol. des particules solides (g/cm <sup>3</sup> )	VBS (g/100g)	Wp (%)	WI (%)	Ip
Argile d'Aix (Mvondo-Ondoa, 1979)	53	2,65	10,2	27,5	70,3	42,8
Argile de Provins (Mvondo-Ondoa, 1979)	74	2,65	2,5	26	51,9	25,9
Kaolinite Speswhite neuve	78	2,65	1,4	32,3	55,1	22,8

Le sable de Missillac est un sable alluvionnaire dont ont été retirées les fines par lavage. Sa courbe granulométrique se rapproche beaucoup de celle du sable de Leucate qu'avait utilisé Mvondo-ondoa (1979). Le sable de Fontainebleau se distingue très nettement des

deux précédents par sa courbe granulométrique très resserrée, avec plus de 90 % des particules comprises entre 80 et 300  $\mu$ .

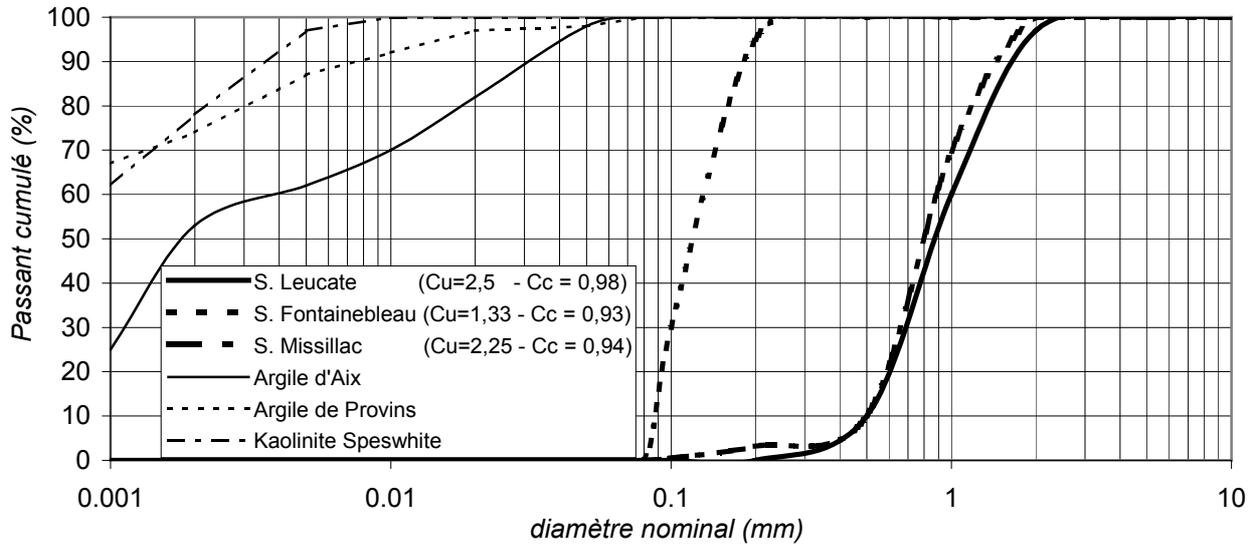


Figure 1 – Courbes granulométriques des sables et argiles

A titre d'exemple, les courbes granulométriques des mélanges Kaolinite Speswhite / Sable de Missillac sont représentées sur la figure 2.

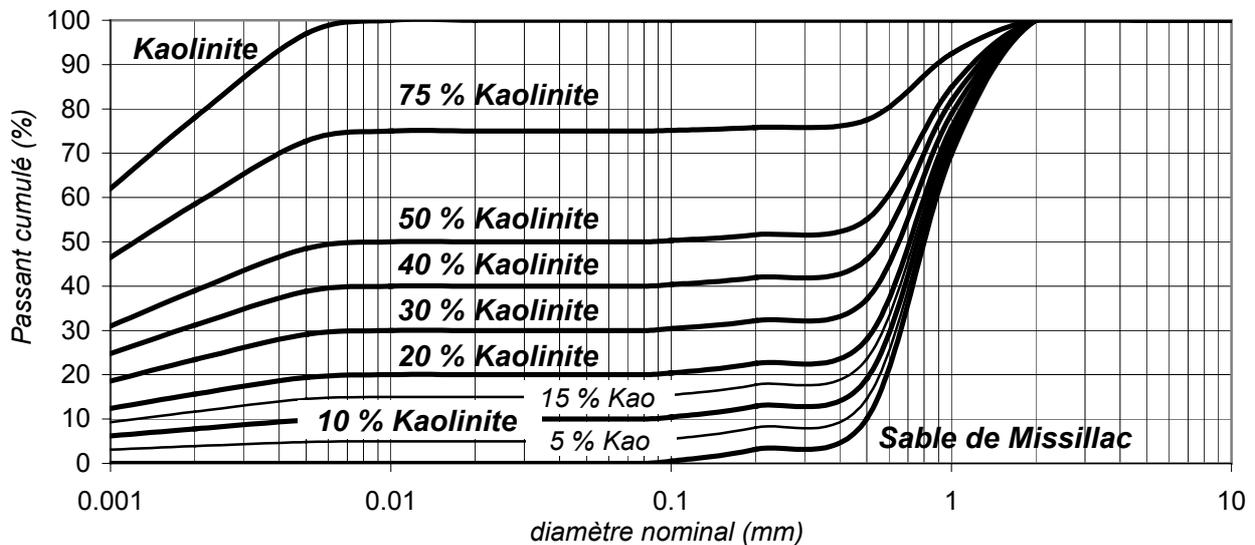


Figure 2 – Courbes granulométriques des mélanges Kaolinite Speswhite « vieillie »/ Sable de Missillac.

On notera aussi que la valeur au bleu de méthylène des mélanges (équation (1)) et l'indice de plasticité des mélanges contenant plus de 20 % de fines (équation (2)) peut être évaluée par la simple prise en compte des caractéristiques de la fraction fine et de sa proportion dans le mélange (Al-Shayea, 2001).

$$VBS_{mélange} = VBS_{fines} \cdot P_f \tag{1}$$

$$Ip_{mélange} = Ip_{fines} \cdot P_f \tag{2}$$

où  $P_f$  est la proportion de fines,  $VBS_{\text{mélange}}$  et  $Ip_{\text{mélange}}$  respectivement la valeur au bleu et l'indice de plasticité du mélange,  $VBS_{\text{fines}}$  et  $Ip_{\text{fines}}$  respectivement la valeur au bleu et l'indice de plasticité des fines.

### 3. PROCEDURE EXPERIMENTALE

#### 3.1. Préparation des mélanges

Les mélanges ont été préparés par simple addition des masses sèches de chacun des matériaux constitutifs. Il doit être précisé que les mélanges avec le sable de Fontainebleau ont été réalisés avec de la Kaolinite que l'on appellera « neuve », à l'inverse des mélanges réalisés avec le sable de Missillac pour lesquels la Kaolinite utilisée avait déjà subi un cycle saturation / séchage en étuve (on l'appellera « vieillie »). C'est un point non négligeable puisque l'on constate que l'optimum Proctor normal de la Kaolinite « neuve » ( $W_{\text{opn}} = 29 \%$ ,  $\rho_{\text{dopn}} = 1,44 \text{ t/m}^3$ ) est différent de celui de la Kaolinite « vieillie » ( $W_{\text{opn}} = 33 \%$ ,  $\rho_{\text{dopn}} = 1,35 \text{ t/m}^3$ ).

Pour porter chaque échantillon à la teneur en eau souhaitée, le mélange a été disposé sous forme d'une couche de quelques millimètres d'épaisseur sur une plaque puis aspergé de la quantité adéquate d'eau (eau du robinet). Après avoir été malaxé manuellement pour obtenir un début d'homogénéisation, il a été conditionné en boîte hermétique et maintenu ainsi pendant deux jours au minimum pour le laisser atteindre un équilibre hydrique. Après une désagrégation manuelle permettant de réduire sa mouture à environ 0/5 mm, le mélange pouvait alors être soumis au compactage.

#### 3.2. Compactage

Les mélanges étudiés par Mvondo-Ondoa de sable de Leucate avec l'argile d'Aix et l'argile de Provins ont été compactés dans le moule Proctor conventionnel (diamètre : 101,6 mm) et avec la dame de l'essai Proctor modifié (énergie volumique de  $2679 \text{ kJ/m}^3$ ).

Les mélanges de Kaolinite Speswhite avec les sables de Fontainebleau et de Missillac ont été compactés avec un dispositif miniaturisé permettant d'étudier les sols de granularité 0/2 mm. Ce dispositif de compactage dynamique permet de réaliser des compactages dans des moules oedométriques de 70 mm de diamètre avec une dame de taille réduite dimensionnée pour reproduire l'énergie de compactage de l'essai Proctor normal (norme NF P 94 093, énergie volumique de  $593 \text{ kJ/m}^3$ ). Ses caractéristiques sont présentées sur la figure 3.

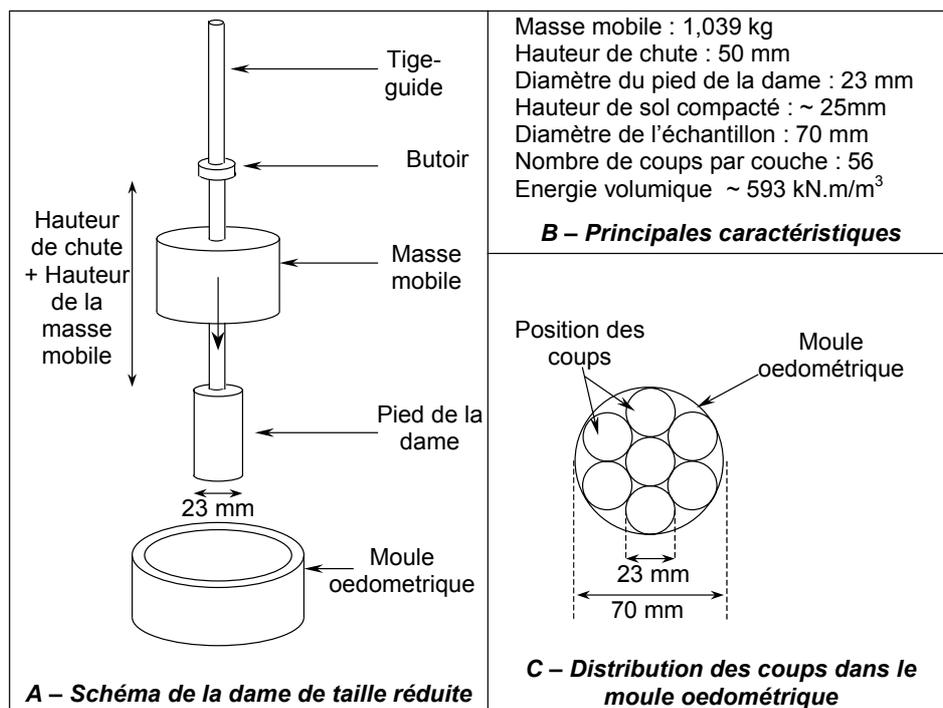


Figure 3 – Caractéristiques du dispositif de compactage en moule oedométrique.

Les matériaux sont compactés en deux couches d'environ 13 mm d'épaisseur avec une répartition des coups identique à celle de l'essai Proctor normal réalisé dans le moule CBR de diamètre 152 mm. A l'issue du compactage, l'échantillon est arasé pour atteindre une hauteur de 25 mm. Des comparaisons avaient été réalisées au préalable sur différents matériaux pour pouvoir assimiler cette procédure de compactage à celle de l'essai Proctor normal (figure 4).

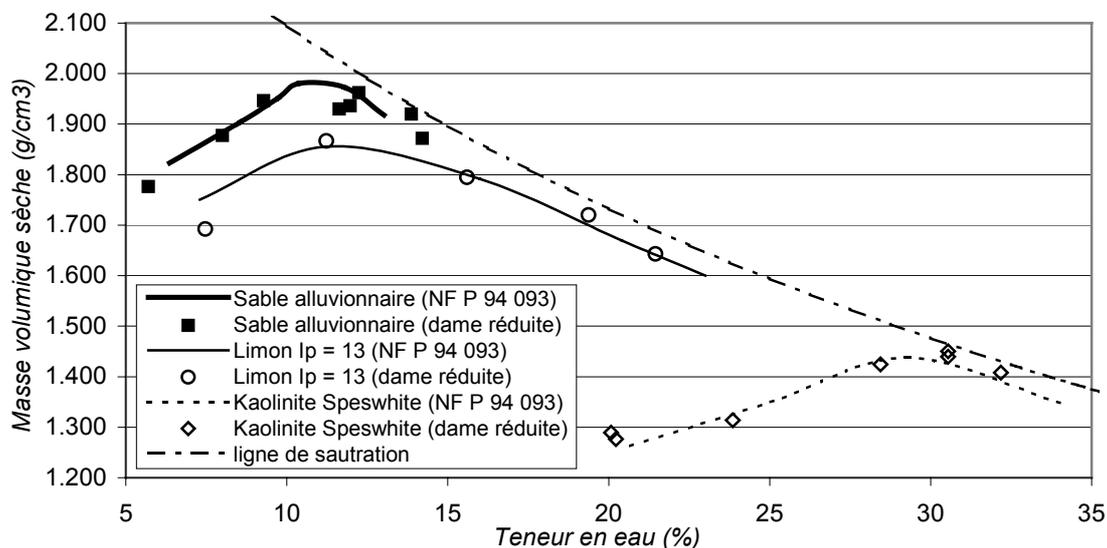


Figure 4 – Courbes de compactage obtenues par l'essai Proctor normal conventionnel et l'essai Proctor normal en moule oedométrique sur trois sols.

#### 4. RESULTATS ET INTERPRETATION

#### 4.1. Courbes de compactage

Les courbes de compactage pour les mélanges Kaolinite Speswhite / Sable de Missillac sont reportées sur la figure 5. Les courbes obtenues sur les autres mélanges sont similaires et n'ont pas été représentées par souci de simplification. Entre 0 et 15-20 % de Kaolinite Speswhite, on constate que la masse volumique sèche à l'optimum du mélange augmente avec la proportion de Kaolinite. Cette valeur de 15-20 % paraît être une sorte d'optimum à l'énergie Proctor normal. Mais si le mélange est compacté à son optimum, qu'en est-il de sa fraction fine ? Dans quelle mesure les particules sableuses sont-elles gênées par la fraction fine dans leur réarrangement au cours du compactage ? Pour répondre quantitativement à ces questions, nous proposons de décrire l'état de chacune de ces deux fractions à l'optimum du mélange.

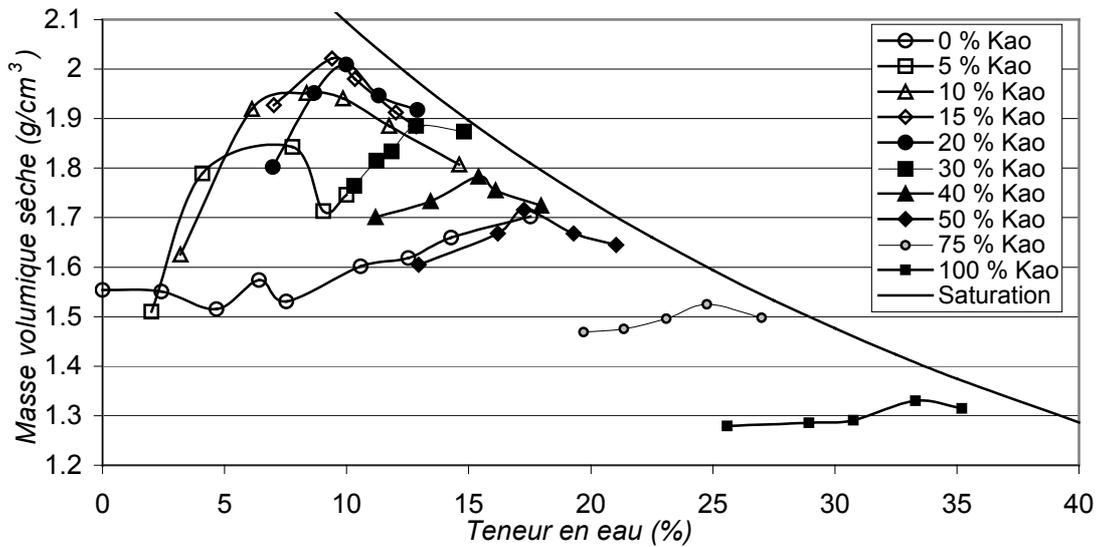


Figure 5 – Courbes de compactage obtenues pour les mélanges Kaolinite vieillie/ Sable de Missillac.

#### 4.2. Description des fractions fines et grossières

En se basant sur l'hypothèse que, dans un mélange fines/sable, toute l'eau est contenue dans la fraction fine, on peut déterminer pour chaque couple masse volumique sèche/teneur en eau du mélange, trois paramètres qui permettent de distinguer l'état de la fraction fine et l'état de la fraction grossière :

- la masse volumique sèche apparente de la fraction fine,  $\rho^*_f$ , qui correspond à la masse sèche des fines dans le volume laissée par les particules sableuses :

$$\rho^*_f = \frac{\text{masse sèche des fines}}{\text{volume total} - \text{volume sable}} = \frac{\rho_d \cdot \rho_s \cdot P_f}{\rho_s - \rho_d \cdot (1 - P_f)} \quad (3)$$

- la teneur en eau de la fraction fine,  $W^*_f$ , qui correspond à la masse d'eau dans le mélange rapportée à la masse sèche des fines :

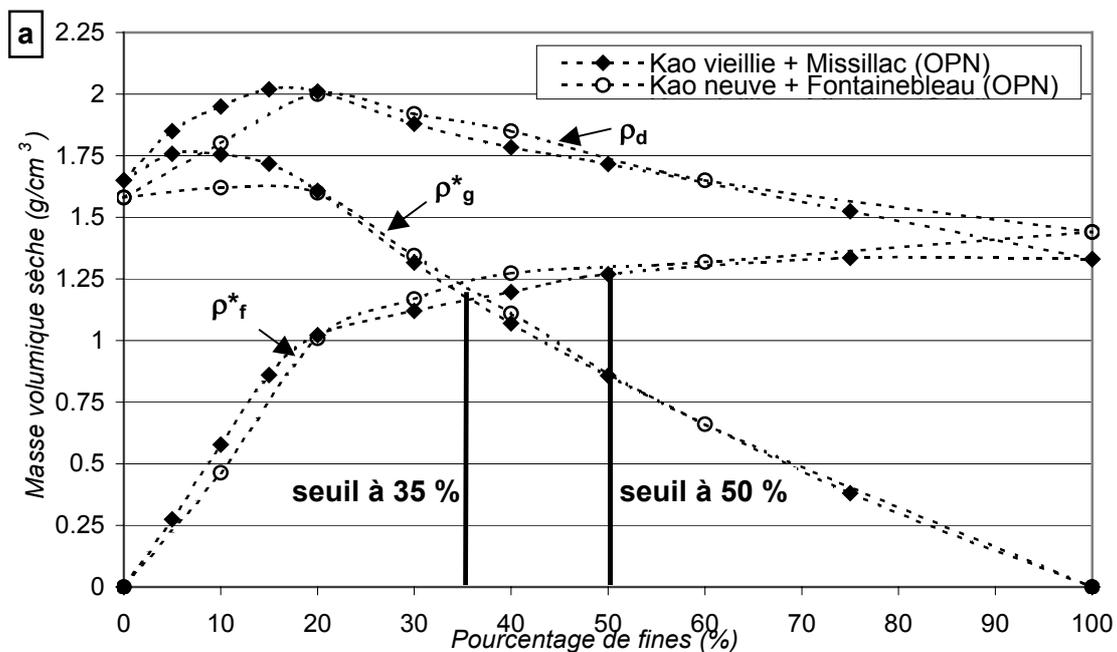
$$W^*_f = \frac{\text{masse eau}}{\text{masse sèche des fines}} = \frac{W}{P_f} \quad (4)$$

- la masse volumique sèche apparente de la fraction sableuse,  $\rho_g^*$ , qui correspond à la masse sèche de la fraction sableuse seule rapportée au volume total du mélange compacté :

$$\rho_g^* = \frac{\text{masse sable}}{\text{volume total}} = \rho_d \cdot (1 - P_f) \quad (5)$$

avec  $\rho_d$  la masse volumique sèche apparente globale du mélange,  $\rho_s$  la masse volumique moyenne des particules solides,  $W$  la teneur en eau globale du mélange et  $P_f$  la proportion de fines dans le mélange. On peut noter qu'une démarche similaire avait été anciennement adoptée pour différencier l'état de différentes fractions sableuses dans les barrages en terre (Post, 1953).

En reportant ces paramètres en fonction de la proportion de fines, on peut décrire l'effet de la quantité de fines sur l'aptitude au compactage du mélange. Sur la figure 6 sont reportées les paramètres  $\rho_f^*$  et  $\rho_g^*$ , calculés à l'optimum Proctor, en fonction de la proportion de fines. Les mélanges compactés à l'énergie Proctor normal (figure 6-a) sont différenciés des mélanges compactés à l'énergie Proctor modifié (figure 6-b). Sur la figure 7, le paramètre  $W_f^*$ , calculé à la teneur en eau de l'optimum Proctor, est reporté en fonction de la proportion de fines pour les quatre mélanges étudiés.



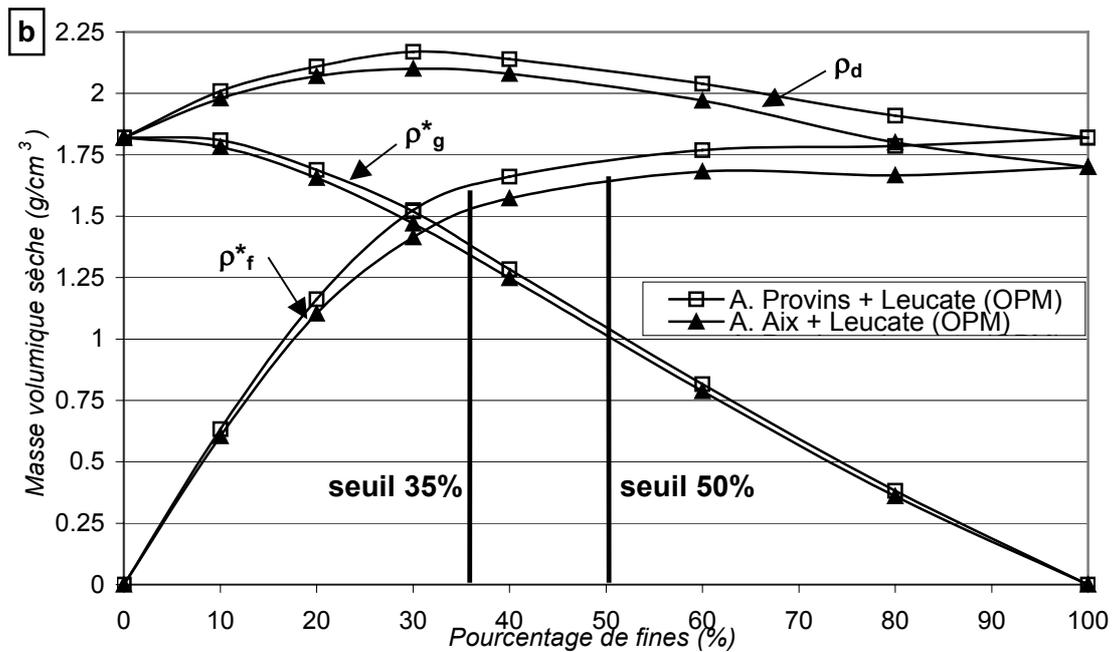


Figure 6 – Influence de la proportion de fines sur les masses volumiques sèches totale ( $\rho_d$ ), de la fraction fine ( $\rho^*_f$ ) et de la fraction sableuse ( $\rho^*_g$ ) à l'optimum Proctor normal (a) et modifié (b).

Sur la figure 6, on peut déterminer la proportion de fines qui conduit à la valeur maximale de la masse volumique sèche totale à l'optimum Proctor. Ainsi, les mélanges à base de sable de Leucate, compactés à l'optimum Proctor modifié, atteignent une masse volumique sèche totale maximale pour une proportion de fines de 30 %, indépendamment de la nature de l'argile. Le sable de Missillac qui présente une courbe granulométrique similaire, compacté à l'optimum Proctor normal en mélange avec de la Kaolinite atteint cette valeur maximale pour seulement 15-20 % de fines. Le sable de Fontainebleau, présentant une granulométrie beaucoup plus resserrée, atteint la valeur maximale avec 20 % de fines. Ainsi, la proportion de fines conduisant à la valeur maximale de l'optimum Proctor semble dépendre de deux paramètres : l'énergie de compactage et la granulométrie de la fraction grossière. Plus l'énergie de compactage est importante et plus la masse volumique sèche maximale est atteinte pour de fortes proportions de fines. De même, plus la fraction grossière est mal gradué, et plus la masse volumique sèche maximale est atteinte pour de fortes proportions de fines.

L'évolution de  $\rho^*_f$  avec la proportion de fines présente plusieurs phases bien distinctes. Entre 0 et 20-30 % de fines environ, sa valeur augmente linéairement et de manière très forte avec la proportion de fines puis, à partir de 20-30 % de fines, la pente de la courbe diminue sensiblement. On peut alors noter une différence sensible entre les deux énergies de compactage. En effet,  $\rho^*_f$  atteint 90 % de l'optimum Proctor de l'argile (c'est-à-dire sa valeur pour 100 % de fines) à environ 35-40 % de fines dans le cas du Proctor modifié (figure 6-b) et seulement à 45-50 % de fines dans le cas du Proctor normal (figure 6-a). Autrement dit, on pourrait considérer que dans les mélanges compactés à l'énergie Proctor modifié, le comportement de la fraction fine deviendrait prépondérant dès lors que celle-ci représente 35-40 % de la masse totale. Alors que dans les mélanges compactés à l'énergie Proctor normal, elle ne deviendrait prépondérante dans le comportement global du sol qu'à partir de 45-50 % de la masse totale.

L'évolution de  $\rho^*_g$  avec la proportion de fines présente aussi des traits similaires quel que soit le type de mélange et l'énergie de compactage. Ainsi, entre 0 et 10-20 % de fines, la

masse volumique apparente de la fraction sableuse a tendance à stagner, voire à croître légèrement avec la proportion de fines. Au-delà, elle diminue régulièrement avec la proportion de fines. L'évolution de ce paramètre entre 0 et 10-20 % de fines souligne l'influence de la présence de fines en petite quantité dans un sable. On constate en effet communément, en laboratoire comme sur chantier, que plus les sables sont propres et plus ils sont difficiles à compacter. On retrouve ici cette observation usuelle dans la mesure où dans certains cas, l'ajout de 5 ou 10 % de fines permet d'améliorer l'état de serrage de la fraction sableuse, illustré par un accroissement du paramètre  $\rho_g^*$ . On constate aussi que, jusqu'à une proportion de 10 à 20 % de fines, la quantité de fines n'a pas d'impact négatif sur la compacité de la fraction sableuse puisque le paramètre  $\rho_g^*$  ne diminue pas. Ainsi, entre 0 et 10-20 % de fines, les fines remplissent les vides laissés par la fraction sableuse sans perturber le réarrangement des particules sableuses lors du compactage, voire en l'améliorant. En étudiant les différents mélanges, on constate aussi que ce seuil de 10-20 % de fines varie avec la granulométrie de la fraction sableuse. Ainsi, pour un sable « creux » comme le sable de Fontainebleau, 20 % de fines sont nécessaires pour faire passer le mélange d'un comportement à tendance sableuse à un comportement intermédiaire. Pour les sables de Leucate ou de Missillac, mieux gradués, 10 % de fines environ semblent suffisants.

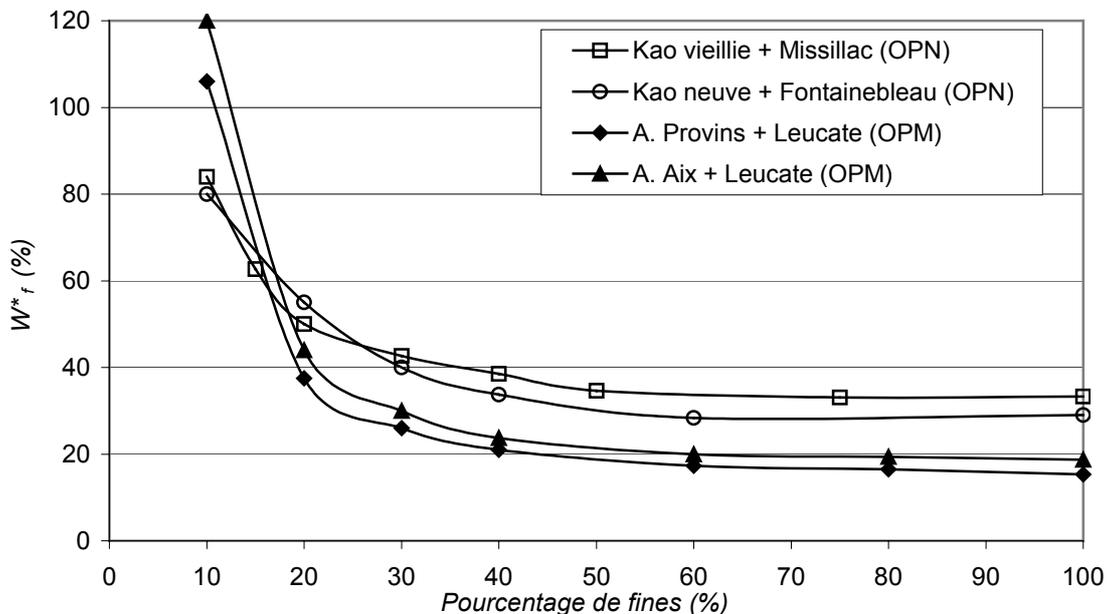


Figure 7 – Influence de la proportion de fines sur la teneur en eau de la fraction fine  $W^*_f$ .

Enfin, l'évolution de la teneur en eau de la fraction fine avec la proportion de fines (figure 7) présente une décroissance en trois phases. Entre 0 et 20 % de fines, les teneurs en eau sont extrêmement élevées et ne deviennent inférieures à la limite de liquidité qu'à partir d'environ 15 % de fines. Il est très probable que pour ces mélanges, l'hypothèse selon laquelle toute l'eau est liée à la fraction fine n'est pas valable. A partir de 20 % de fines, la diminution de la teneur en eau des fines à l'optimum est plus modérée et la courbe atteint une asymptote pour environ 60 % de fines. Ainsi, pour les mélanges comprenant entre 60 et 100 % de fines, la teneur en eau à l'optimum des mélanges est directement déductible de la teneur en eau à l'optimum des fines seules, ou autrement dit :  $W_{opn} \sim P_f \cdot W_{(opn - 100\% \text{ fines})}$ , où  $W_{(opn - 100\% \text{ fines})}$  est la teneur en eau à l'optimum Proctor des fines seules.

On observe aussi l'influence de l'énergie de compactage sur la teneur en eau à l'optimum, puisque les courbes à l'énergie Proctor modifié se situent très nettement sous les courbes à l'énergie Proctor normal, sauf pour les faibles proportions de fines.

L'écart quasi-constant entre les courbes Sable de Leucate/Argile d'Aix et Sable de Leucate /Argile de Provins peut s'expliquer par l'influence de la nature des fines et en particulier de leurs propriétés physico-chimiques.

#### 4.3. Synthèse schématique

On peut reprendre les interprétations du paragraphe précédent pour proposer un schéma d'organisation des fractions fines et grossières dans le sol compacté à l'optimum (cf figure 8).

Lorsque les fines représentent moins de 10 à 20 % du mélange, elles sont dans un état très humide à l'optimum Proctor et une partie de l'eau n'est probablement pas contenue dans la fraction fine mais localisée en surface des grains de sable. Ce type de mélange est représenté par le cas A de la figure 8. Les contacts entre grains de sable sont directs, frottants et les fines ne remplissent pas les vides laissés par ces grains. Le comportement du mélange est, à peu de choses près, celui de sa fraction sableuse.

Entre 10-20 et 35-50 % de fines, les contacts entre grains de sable sont beaucoup plus réduits, comme dans le cas B de la figure 8. Ils sont cependant suffisamment nombreux pour perturber le compactage de la fraction fine. Celle-ci remplit intégralement les vides entre les grains de sable et perturbe elle aussi le réarrangement de la fraction sableuse. Le comportement du mélange est la résultante complexe du comportement de la fraction fine et de la fraction sableuse.

Enfin, au-delà de 35-50 % de fines, les grains de sables sont trop peu nombreux pour pouvoir former des contacts frottants. Noyés dans une matrice fine, ils ne perturbent qu'à peine son compactage. La fraction fine est à une compacité et une teneur en eau très proches de celles de son optimum Proctor. Le comportement du sol est quasiment celui de la fraction fine.

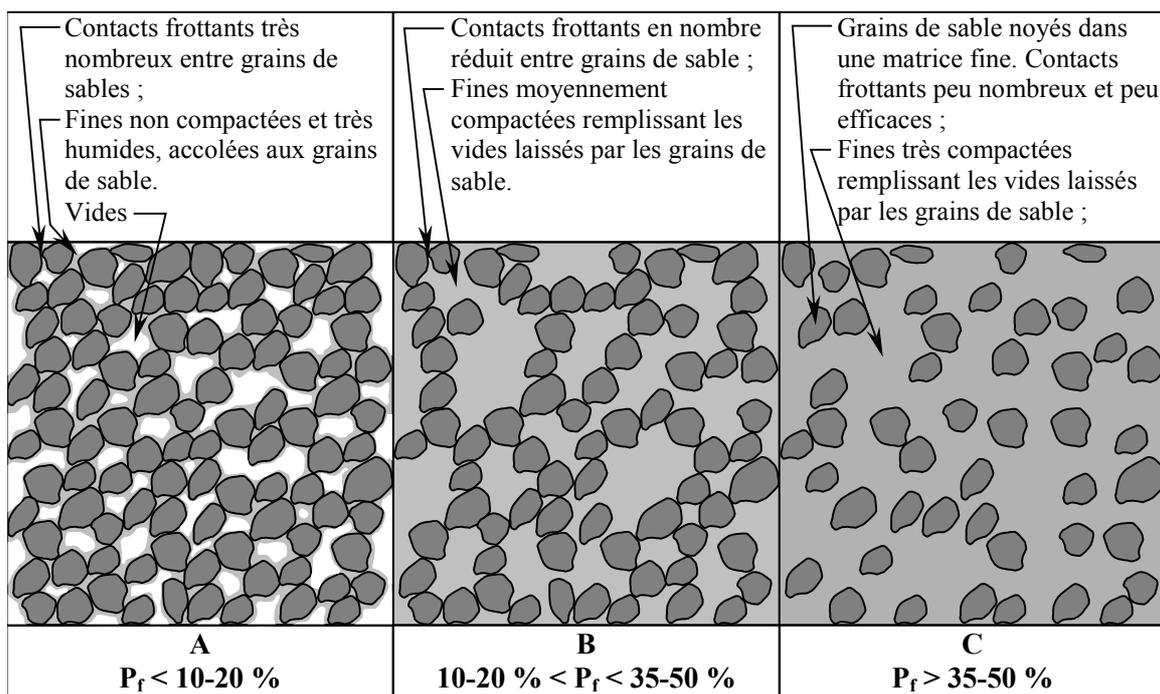


Figure 8 – Organisation schématique des particules selon la proportion de fines.

## 5. DISCUSSION SUR LES SEUILS

Ces observations sur l'état des fractions fines et grossières dans les mélanges apportent un éclairage sur les seuils de proportion de fines, ce qui permet de proposer une discussion sur la signification des seuils utilisés dans les classifications en vigueur. Suite à une enquête internationale menée par Havard (2003) auprès des pays membres de l'AIPCR, nous avons fait une synthèse des seuils de proportion de fines utilisés dans les classifications des pays ayant répondu à l'enquête (tableau 2). La dimension de coupure entre les fractions fine et grossière varie entre 63 et 80  $\mu\text{m}$  selon les pays, différence que nous considérerons ici comme négligeable.

Tableau 2 – Seuils de proportion de fines dans les principales classifications nationales (Havard, 2003)

Pays (coupure)	Seuil sable / sol intermédiaire	Seuil sol intermédiaire / sol fin
Belgique (63 $\mu\text{m}$ )	10 %	-
Allemagne (63 $\mu\text{m}$ )	5 %	40 %
Angleterre (63 $\mu\text{m}$ )	15 %	80 %
Espagne (80 $\mu\text{m}$ )	25 %	35 %
France (80 $\mu\text{m}$ )	12 %	35 %
Italie (75 $\mu\text{m}$ )	10-15 %	35 %
Québec (80 $\mu\text{m}$ )	-	50 %
Cuba (75 $\mu\text{m}$ )	-	50 %
États-Unis (75 $\mu\text{m}$ )	-	35 %
Japon (74 $\mu\text{m}$ )	-	50 %
Portugal (75 $\mu\text{m}$ )	-	50 %
Suisse (63 $\mu\text{m}$ )	-	50 %

On constate que les classifications se regroupent en trois familles :

- les classifications différenciant uniquement les sols fins, avec un seuil unique (Québec, États-Unis, Japon, ...)
- les classifications différenciant les sols sableux, les sols intermédiaires et les sols fins, basées sur l'emploi de deux seuils (Allemagne, Angleterre, Espagne, France, Italie) ;
- une classification ne différenciant que les sols sableux, avec un seuil unique (Belgique).

A propos de la distinction sols fins / sols intermédiaires, on notera que les classifications adoptent généralement un seuil soit de 35 % soit de 50 % de fines. D'après les résultats expérimentaux présentés ici (cf figure 6), il est difficile de juger quelle valeur est la plus pertinente car dans les deux cas, la masse volumique de la fraction fine dans le mélange est inférieure à son optimum. Ceci signifie que la fraction sableuse perturbe le compactage de la fraction fine, qu'il y ait 35 ou 50 % de fines.

Dans les classifications qui distinguent les sols sableux des sols intermédiaires, le seuil varie entre 5 et 15 % de fines. Nous avons vu dans les résultats expérimentaux que ce seuil semble dépendre de la granulométrie de la fraction grossière, et notamment de sa

bonne ou mauvaise gradation. Ainsi, un seuil de 5 % paraîtrait pertinent pour une fraction sableuse très bien graduée, à l'inverse d'un seuil de 15 % qui serait plus adapté pour un sol dont la fraction sableuse est à granulométrie resserrée. La plasticité de la fraction fine a probablement aussi un rôle dans ce phénomène.

Cette courte discussion montre que les phénomènes sont complexes et obligent à des choix arbitraires pour construire des classifications pertinentes mais simples d'utilisation.

## **6. CONCLUSION**

Les essais de compactage réalisés sur des mélanges de diverses fractions sableuses avec diverses argiles, et à différentes énergies de compactage, apportent un éclairage sur les relations entre la proportion de fines et l'aptitude au compactage des sols. La description de l'état physique de la fraction fine et de la fraction sableuse à l'optimum Proctor fait ressortir les trois grandes familles classiques de mélanges :

- les mélanges contenant entre 0 et 10-20 % de fines, dont le comportement au compactage est gouverné par la fraction sableuse, et dans lesquels la présence de fines peut permettre un meilleur réarrangement des particules sableuses. Le seuil de 10-20 % de fines dépend apparemment de la bonne gradation de la fraction sableuse ;
- les mélanges contenant plus de 35-50 % de fines, dont le comportement au compactage est gouverné par celui de la fraction fine. On notera que ce seuil pourrait dépendre de l'énergie de compactage ;
- les mélanges intermédiaires, dont le comportement au compactage est influencé de manière complexe à la fois par la fraction fine et par la fraction sableuse.

On observe que cette distinction en trois familles est reprise de manière plus ou moins complète dans les différentes classifications de sols, avec des valeurs de seuils variées. Etant donné que la nature de la fraction grossière ou de la fraction fine peuvent avoir une influence sur les seuils de comportement, on comprend qu'il soit nécessaire de faire des choix arbitraires pour simplifier les classifications. C'est une explication possible à la variété des choix d'un pays à l'autre.

Par ailleurs, cette étude apporte aussi des éléments de réflexion sur l'aptitude des sols au traitement. Ainsi, dans un sol à tendance sableuse (moins de 10-20 % de fines), l'action de la chaux risque d'être limitée par la pauvreté en fines alors qu'un liant hydraulique sera particulièrement efficace pour lier les grains de sable entre eux. Au-delà de 10-20 % de fines, le fait que les fines remplissent les vides constituera un obstacle à l'efficacité d'un liant hydraulique. En revanche, étant donné que la fraction fine remplit intégralement les vides et contribue de plus en plus fortement au comportement global du sol, l'action pouzzolanique de la chaux sera de plus en plus adaptée pour un traitement efficace.

## **REFERENCES**

- Al-Shayea, N. A. (2001) The combined effect of clay and moisture content on the behaviour of remoulded unsaturated soils. Bull. Assoc. of Engineering Geology. Vol 62, pp 319-342
- Havard, H. (2003) Limites d'emploi des sols naturels, spécifications et contrôles dans les travaux de terrassement. Rapport AIPCR, Comité technique 12, Sujet n°1 : Matériaux

naturels hors spécification courante et pertinence du contrôle des travaux de terrassements, 89 p.

Mvondo-Ondoa, J. (1979) Rôle de la granularité et de la composition minéralogique sur la compactabilité et la résistance au cisaillement des mélanges de sable et d'argiles. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle Université P. Et M. Curie - Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 149 p.

Norme NF P 94 093 (1999) Détermination des références de compactage d'un matériau - Essai Proctor normal - Essai Proctor modifié. Association Française de Normalisation (AFNOR)

Post G., Londe P. (1953) Les barrages en terre compactée. Pratiques américaines. Gauthier-Villars Ed.148 pp.