

Amélioration de la rétention en eau de matériau sableux par ajout de bentonite

Mohammed Tahar Halilat¹
Daniel Tessier²

¹ Laboratoire de bioressources sahariennes :
préservation et valorisation,
Département des sciences agronomiques,
Université de Ouargla,
30000 Algérie
<halilat@yahoo.com>

² Institut national de la recherche
agronomique (Inra),
Station Science du sol, Route de Saint Cyr,
78026 Versailles
<tessier@versailles.inra.fr>

Résumé

Ce travail est consacré à l'étude expérimentale de l'amélioration, par ajout d'argile, de certaines propriétés physiques de matériau sableux provenant du Sahara algérien. Le but est de fournir des bases d'interprétation concernant le potentiel de l'eau en milieu aride. Le sable utilisé, de taille comprise entre 63 et 160 µm, provient de la région de Gassi-Touil dans le Sud-Est algérien. L'argile apportée est de la bentonite de Mostaganem à l'état naturel. Le mélange sable-argile a été réalisé à sec et humecté après mélange. L'addition de bentonite modifie les propriétés physiques (hydratation, gonflement) lorsque sa teneur atteint environ 12 %. La teneur en eau et le gonflement des mélanges sable-argile obtenus dépendent alors principalement du taux d'argile. Le principal effet de l'augmentation de la teneur en argile est de faire gonfler le mélange, d'augmenter la teneur en eau et l'énergie de rétention de cette eau. L'argile est donc à l'origine d'un gonflement macroscopique dans la gamme des potentiels les plus hauts (-1 à -320 kPa). Les résultats montrent aussi que la porosité des matériaux à l'état sec n'est pas affectée par la présence d'argile. Les caractéristiques du sable déterminent donc cette propriété.

Mots clés : désert du Sahara ; sable ; argile ; rétention en eau ; bentonite.

Thèmes : sols ; eau ; agronomie.

Abstract

Improvement of sandy material water content by addition of bentonite

The aim of the present paper is to examine how some of the physical properties of a sandy material from the Algerian Sahara can be improved through the addition of clay, with a view to provide theoretical bases for interpreting water potential in an arid medium. The sandy material used, whose grain size ranged between 63 and 160 µm, came from the Gassi-Touil area in southeast Algeria. The clay added was Mostaganem bentonite used in its natural state. Sand and clay were mixed at air-dry state and then brought to different water potential levels. The water content and swelling of the sand-clay mixtures depended mainly on the percentage of clay added. The principal consequence of the increase in clay content was to increase the water content and the retention energy capacity of that water. Clay then produced a macroscopic swelling in the range of the highest potentials (-1 to -320 kPa). However, the addition of clay generally led to water saturation for these potentials. The results also showed that the porosity of the mixtures at dry state was not affected by the presence of clay. It follows that it is the characteristics of the sand material that determined this property. The sand-clay mixtures studied presented a shrinkage limit and their behaviour was influenced in different ways depending on the proportion of clay and on the water potential. The bentonite added did not modify the physical properties (hydration, swelling) of the mixture when its proportion was less than 12%. To lead to practical results, this study should be continued to test its results against *in situ* data, taking its feasibility into account.

Key words: Sahara desert; sand; clay; water retention; bentonite.

Subjects: soils; water; agronomy.

L'eau est le premier facteur limitant des rendements. Par conséquent, les ressources de l'agriculture des régions arides et semi-arides sont limitées, et ne permettent pas de faire face à l'augmentation actuelle de la population et de ses besoins alimentaires. Dans ces régions marquées par les déficits hydriques, l'extension et le développement de l'agriculture exigent de mobiliser des ressources naturelles, humaines et financières, et de tester et expérimenter des voies originales d'amélioration des caractéristiques des sols pour aboutir à une utilisation plus efficace des faibles quantités d'eau disponibles.

En Afrique du Nord, l'utilisation des ressources naturelles des zones sahariennes reste très faible. En effet, en plus des contraintes climatiques, les contraintes pédologiques sont extrêmement fortes car les sols renferment parfois plus de 90 % de sable quartzeux. Pour faire face à une demande toujours croissante en produits agricoles, ces régions sahariennes constituent aujourd'hui un des centres d'intérêt pour les pays d'Afrique du Nord. La mise en valeur des terres dans ces régions, l'augmentation de la productivité par unité de surface et leur conservation exigent ici plus qu'ailleurs des études très détaillées (Halitim, 1988).

Dans les régions à fort déficit hydrique comme les zones sahariennes, les pratiques agricoles doivent avoir pour objectif la conservation d'une eau facilement accessible aux plantes. Cela est encore plus indispensable lorsque les sols sont constitués de sables à forte capacité de drainage dans lesquels l'eau de pluie ou d'irrigation a tendance à drainer rapidement en dessous de la zone accessible aux racines. Dans ces conditions, les sols de la partie nord du Sahara (50 mm de pluie par an) sont particulièrement défavorisés à la fois par le fort déficit hydrique et leur faible capacité de rétention. Ils sont donc, compte tenu de leurs caractéristiques physiques et physico-chimiques, très défavorables à l'agriculture. Une alternative pour améliorer leur potentiel agricole pourrait consister à ajouter de l'argile aux matériaux sableux, ce qui permettrait d'augmenter à la fois leur réserve en eau et leur capacité à retenir les éléments minéraux. Cette technique très ancienne est utilisée de façon traditionnelle dans le Sahara algérien ainsi qu'en Égypte (El-Hady et El-Sherif, 1988a et 1988b) dans le but d'améliorer les propriétés des sols sableux. Elle est utilisée en général dans les petites exploita-

tions dites « palmeraies » et les parcelles maraîchères.

L'existence d'importants gisements d'argile au Sahara (Achiri, 1988) rend *a priori* possible cette opération.

Le principal objectif de notre travail expérimental de laboratoire est donc d'étudier quelle pourrait être l'amélioration des propriétés physiques en relation avec la rétention de l'eau d'un sable additionné d'argile provenant d'un gisement naturel.

Matériaux et méthode d'étude

Préparation des matériaux

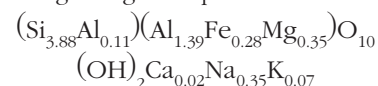
Le protocole utilisé pour préparer artificiellement des échantillons sable-argile de l'ordre de 2 cm³ environ et présentant une structure homogène est celui mis au point par Fiès (1971) et Bousnina (1993) qui consiste à ajouter, à sec, à une quantité du matériau argileux un poids égal de sable. La quantité restante de sable est introduite progressivement tout en assurant en permanence une homogénéisation de l'ensemble. Avant son incorporation au sable, le matériau argileux est rendu à l'état de poudre (particules < 50 µm) par broyage. Les mesures ont donc été réalisées sur des échantillons remaniés et les mélanges sable-argile ont été réalisés à sec et humectés après mélange. Le matériau n'a donc pas été préparé à l'état de pâte.

Afin d'étudier un lot aussi homogène que possible, et dans le but de limiter l'effet de dispersion lié à la présence d'un petit nombre de grosses particules sableuses, nous avons volontairement limité l'échelle de la taille des sables en sélectionnant la fraction 63-160 µm par tamisage à l'intérieur des sables fins. Après une attaque à l'acide chlorhydrique puis à l'eau oxygénée destinée à éliminer respectivement les traces de calcaire et de

matières organiques, l'échantillon a subi une série de lavages à l'eau distillée.

Le sable utilisé provient d'un sol sableux à végétation naturelle de la zone de Gassi-Touil dans le Sud-Est algérien, région caractérisée par des sols relativement gypseux et une texture sableuse. La bentonite naturelle de Mostaganem (tableau 1) a été utilisée à l'état naturel sans préparation. Ce matériau possède un pourcentage élevé de sodium échangeable (77 % de la capacité d'échange). Une telle proportion de sodium peut avoir, lors de l'introduction dans le sol, un effet néfaste sur les propriétés physiques du sol. Néanmoins, la présence de gypse dans les sols devrait renforcer la stabilité structurale des matériaux, permettre le remplacement d'une partie du sodium par du calcium sur les sites d'échange de l'argile, et donc éviter la dispersion. Le choix de cette argile se justifie par le fait qu'elle est disponible en grandes quantités et que des gisements similaires sont présents dans la région de Gassi-Touil. En outre, l'État algérien s'intéresse beaucoup à ce gisement pour son utilisation industrielle, notamment pour les fonds de décharges, pour le stockage des déchets, pour la fonderie, pour la céramique, et dans le domaine pharmaceutique. Les données obtenues sur ce matériau pourront donc éventuellement être valorisées dans d'autres domaines.

La composition chimique (tableau 2) et l'analyse en diffraction des rayons X effectuées sur la fraction < 2 µm montrent qu'il s'agit d'une smectite avec une formule structurale établie sur la base de 22 charges négatives par demi-maille :



Il s'agit d'une argile de basse charge dont les propriétés d'échange et de gonflement sont élevées.

Le mélange a été fait avec différentes proportions de bentonite : 0 % (sable pur), 3, 6, 12, 24, 50 et 100 %. Le matériau obtenu a été porté à différents potentiels de l'eau en fixant le potentiel matriciel.

Tableau 1. Caractéristiques physico-chimiques de la bentonite de Mostaganem.

Table 1. Physicochemical characteristics of Mostaganem bentonite.

	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	CEC (cmol _e /kg)	Na/CEC (%)	Surface spécifique (m ² /g)
Bentonite	63	20	17	49	77	347

Tableau 2. Caractéristiques chimiques de la fraction < 2 µm.

Table 2. Chemical characteristics of the fraction < 2 µm.

Éléments	Si	Al	Mg	Fe	Ca	Na	K
Fraction < 2 µm (g/100 g)	29,48	8,24	1,53	2,81	0,14	1,44	1,33

Pour les mélanges sable-argile ainsi préparés, on a appliqué toute la gamme de potentiel allant de - 1 kPa à - 107 MPa, et ce afin d'étudier la teneur en eau et les changements d'organisation des matériaux.

Modalités expérimentales

Contrôle du potentiel de l'eau

Les échantillons ont été portés à différents potentiels de l'eau à l'aide d'une presse à membrane (Tessier et Berrier, 1979) jusqu'à - 1,6 MPa. Au-delà, les échantillons ont été soumis à des niveaux de dessiccation allant jusqu'à - 107 MPa en les mettant en équilibre avec différentes humidités relatives dans une enceinte fermée (tonométrie). On couvre ainsi la gamme complète des contraintes hydriques que peut subir le sol au contact de l'atmosphère (Tessier, 1980). À chaque point expérimental, on procède à la détermination de la teneur en eau et du volume apparent (Monnier *et al.*, 1973).

Détermination de la teneur en eau pondérale

Après avoir soumis les matériaux résultant des mélanges sable-argile à un potentiel connu, nous avons mesuré la teneur en eau au potentiel correspondant. Connaissant le poids humide initial d'un échantillon à une contrainte donnée et son poids sec à 105 °C, on calcule la teneur en eau pondérale à cette contrainte.

Résultats et discussion

Relation contrainte/teneur en eau

L'ensemble des résultats caractérisant le comportement hydrique des différents mélanges sable-argile est regroupé dans la *figure 1*.

La comparaison des différents mélanges sable-argile fait apparaître que plus la teneur en argile est importante, plus la rétention de l'eau par le matériau est forte. L'écart observé entre les teneurs en eau est très important aux hauts potentiels d'eau (bas pF) et tend à devenir beaucoup plus faible aux bas potentiels. Le comportement de l'argile et celui du

mélange à 50 % de bentonite se distinguent de celui des autres mélanges. À titre d'exemple, à un potentiel d'eau très élevé de - 1 kPa, la teneur en eau pondérale est de 30 g/100g pour le sable pur, de 120 g/100g pour le mélange à 50 % et de 206 g/100g pour la bentonite naturelle.

Pour toutes les courbes (*figure 1*) on note une chute brutale de la teneur en eau à un potentiel d'eau bien défini. Le sable pur perd presque toute son eau entre - 3,2 et - 10 kPa et il n'en reste que 0,5 g/100g à - 1,6 MPa. Pour les autres matériaux dont le taux de bentonite est < 12 %, la chute de la teneur en eau correspond à des potentiels plus bas. Pour la bentonite naturelle, on note une chute importante au voisinage de - 1,6 MPa. Un phéno-

mène similaire est observé avec le matériau à 50 % de bentonite.

Variation du volume et structuration des matériaux

L'approche expérimentale utilisée permet de suivre les variations de volume de l'échantillon en fonction de la teneur en eau du matériau. L'évolution de l'indice de vide "e", [volume des pores (eau+air) rapporté au volume de solide dont la densité réelle des particules est de 2,7] en fonction de la pression de succion de l'ensemble des mélanges sable-argile et en fonction de la teneur en bentonite naturelle est représentée *figure 2*.

Il apparaît que les mélanges à 3 et 6 % de bentonite possèdent les propriétés du sable, c'est-à-dire que le volume du matériau ne varie pas de façon significative en présence d'argile et en fonction du potentiel de l'eau. Autrement dit, 6 % de bentonite ne suffisent pas pour gonfler le matériau sableux étudié. Il faut atteindre 12 % de bentonite pour observer, à - 1 kPa, une augmentation de volume de l'ordre de 50 % et une augmentation de 100 % et de 250 % respectivement pour les mélanges à 24 et 50 % de bentonite.

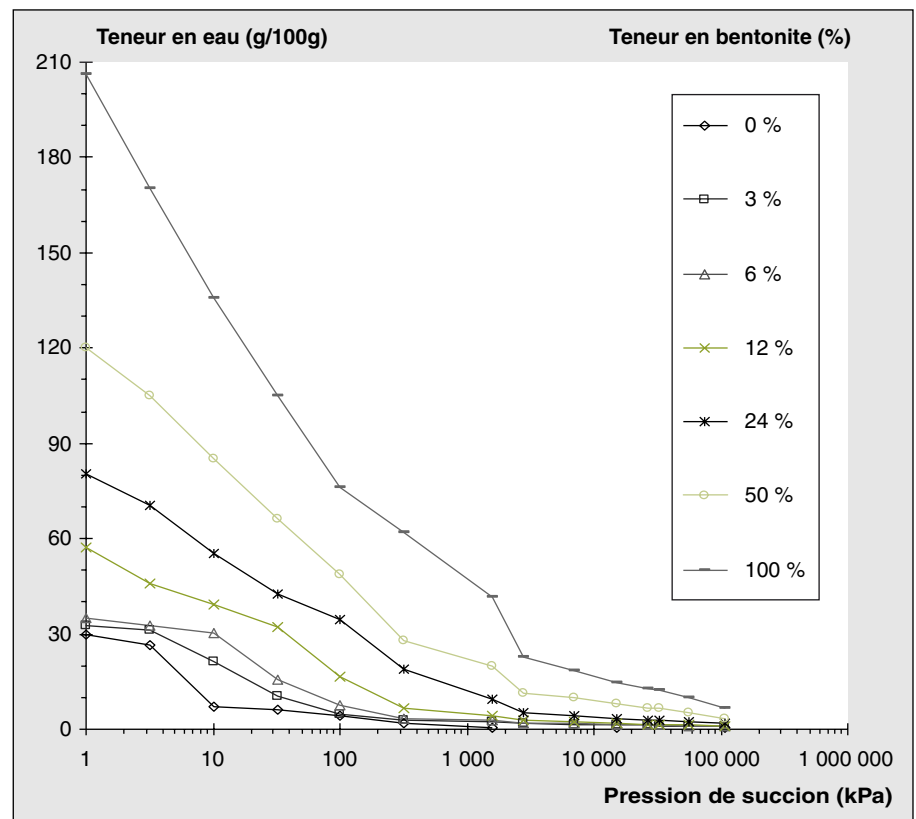


Figure 1. Teneur en eau (g/100g) des mélanges sable-argile en fonction de la pression de succion (kPa).

Figure 1. Water content (g/100g) of the sand-clay mixtures according to the pressure of suction (kPa).

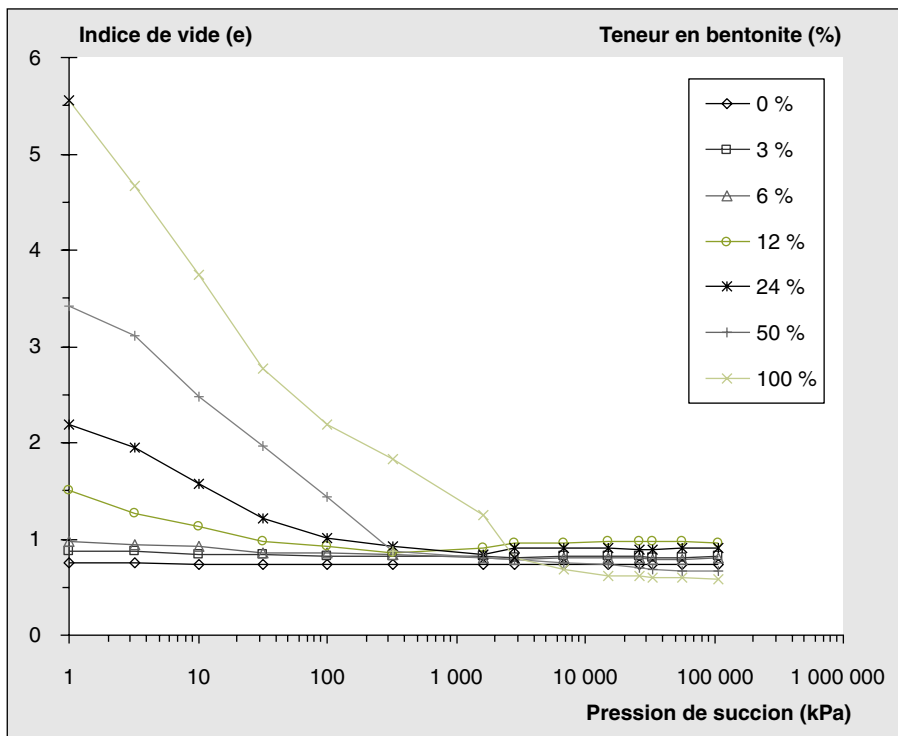


Figure 2. Changement de l'indice de vide des mélanges sable-argile en fonction de la teneur en bentonite.

Figure 2. Void ratio changes of the sand-clay mixtures according to the content in bentonite.

Il apparaît aussi que tous les mélanges sable-argile aboutissent, au-delà de - 320 kPa, à un indice de vide stable et quasi identique, en accord avec les résultats de Fiès et Bruand (1992). L'ajout d'argile joue donc très peu sur la capacité du matériau à devenir plus compact dans le domaine des fortes dessiccations. L'essentiel de l'augmentation du volume apparent se produit pour les potentiels de l'eau \geq - 10 kPa (bas pF). Chrétien (1986) et Bruand *et al.* (1988) ont abouti à des conclusions similaires.

Discussion

Rappelons que ce travail s'inscrit dans le cadre de préoccupations d'ordre agronomique et qu'il constitue principalement une contribution à l'étude de l'amélioration des propriétés physiques des sols sableux du Sahara algérien. Parmi les problèmes posés dans cette région, l'abondance de sable dans le sol (généralement plus de 90 %) est déterminante pour la caractérisation des propriétés du sol. Elle est à l'origine de problèmes physiques et physico-chimiques majeurs. Il en est ainsi de la réserve en eau, de la perméabilité et de la rétention des éléments fertilisants sur le complexe adsor-

bant. Les principales conséquences en sont un faible rendement des cultures et des pertes énormes d'ordre économique, accompagnées d'une gestion problématique à la fois de l'eau et des éléments fertilisants.

Même si cette étude est avant tout expérimentale, nos résultats fournissent un cadre pour optimiser la proportion d'argile afin que le sol ait, du point de vue physique, des qualités aussi satisfaisantes que possible.

Pour les changements des propriétés physiques, le choix de la proportion d'argile va jouer sur plusieurs paramètres :

- la rétention de l'eau ;
- l'aération.

L'allure générale des courbes des différents mélanges sable-argile montre que plus la teneur en argile augmente, plus la teneur en eau de l'échantillon est élevée. On constate, d'après la forme des courbes, que le sable perd le maximum de son eau à partir de - 3,2 kPa. Ce phénomène s'explique par la présence d'une macroporosité (figure 3A) qui est vidée de l'essentiel de son contenu en eau entre - 3,2 et - 10 kPa. Cela correspond, d'après la loi de Jurin-Laplace, à des pores de 50 à 15 μ m environ. Nous avons observé un

phénomène similaire avec les mélanges à 3 et 6 % de bentonite, mais il apparaît déjà moins important que dans les sables. Ces mesures rejoignent les résultats de Chrétien (1986) qui a montré que les horizons sableux sont généralement caractérisés par une macroporosité. Ces horizons possèdent par conséquent très peu de micro- et méso-porosité. Des résultats analogues ont été obtenus par Assouline *et al.* (1998) sur des matériaux sableux.

Pour les mélanges à 12 et 24 % de bentonite, l'inflexion des courbes commence respectivement à partir de - 32 kPa et - 100 kPa. Cela apparaît logique dans la mesure où le remplissage de l'espace poral du sable par l'apport de doses croissantes d'argile est de plus en plus important (figure 3B et 3C). Il en résulte donc que l'argile détermine alors le spectre poral du matériau, ce qui provoque un accroissement de l'énergie de rétention de l'eau. Des conclusions similaires ont été établies par Chrétien (1986) et Bruand *et al.* (1988).

Au-delà de - 2,8 MPa, l'allure des courbes des différents mélanges (sauf pour le mélange à 24 % de bentonite) devient similaire, ce qui montre que la contribution de l'argile, lorsqu'elle est faiblement hydratée, ne joue plus un rôle déterminant dans les propriétés d'hydratation.

Pour le mélange à 50 % de bentonite et la bentonite naturelle, la forme de la courbe de la teneur en eau est beaucoup plus régulière, et ce jusqu'à - 1,6 MPa. Les teneurs en eau obtenues montrent qu'il s'agit d'une argile qui a une très grande capacité à retenir l'eau. Ce phénomène est accentué par la présence d'une forte teneur en sodium échangeable sur la capacité d'échange de cette argile. Ce domaine correspond à la vidange de la porosité résultant de l'arrangement des particules d'argile seules. Entre - 1,6 et - 2,8 MPa, la courbe change d'allure et le matériau perd environ 50 % de son eau par rapport au potentiel précédent, ce qui traduit une sensibilité particulière de l'argile dans ce domaine de contrainte.

De - 6,9 à - 100 MPa, la teneur en eau de la bentonite naturelle et du mélange à 50 % de bentonite diminue encore très progressivement. Ce domaine correspond à la vidange de la porosité interne de l'argile qui concerne en fait l'hydratation interfoliaire (Tessier, 1984).

Au total, on peut dire que les résultats obtenus ont confirmé l'efficacité de l'amendement argileux du sable dans l'amélioration de sa rétention d'eau. Des résultats similaires ont été obtenus par

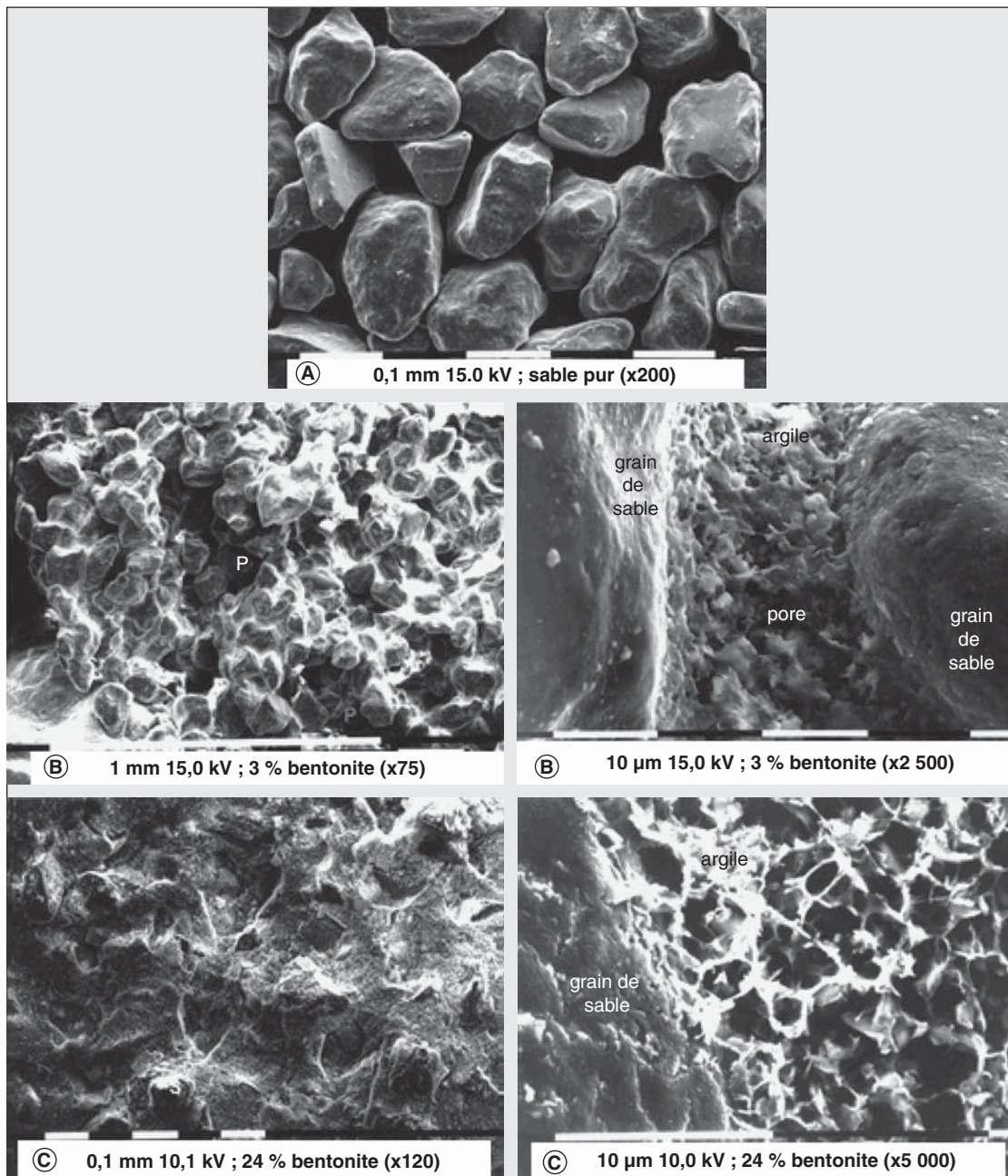


Figure 3. Observation des grains de sable et des mélanges sable-bentonite au microscope électronique à balayage (MEB).

Figure 3. Sandgrains and sand-bentonite mixture as observed by scanning electron microscopy.

A) vue d'ensemble des grains de sable ; B) recouvrement des grains par l'argile dans les mélanges à 3% ; C) 24 % à - 32 kPa.

Bousnina et Mhiri (1997) et Lhotsky (1971).

Ainsi, d'après les courbes de retrait, on remarque qu'une faible teneur en argile n'apparaît pas suffisante pour améliorer les propriétés du sable, surtout sur le plan du changement de volume (le mélange reste rigide). Il faut donc atteindre environ 12 % de bentonite pour que la rétention en eau soit augmentée par rapport au sable pur. En même temps que la teneur

en eau, l'énergie de rétention de l'eau est considérablement modifiée.

Enfin, nous pouvons conclure que les mélanges sable-argile étudiés présentent une limite de retrait et que leur comportement est influencé de manière différente suivant la proportion d'argile et le domaine de potentiel de l'eau concerné. Dans cette étude il apparaît important de présenter l'effet de l'ajout d'argile sur la réserve en eau utile (RU) du sol, qui est

définie comme étant la quantité d'eau contenue dans le sol entre la capacité de rétention et le point de flétrissement permanent. Elle concerne donc une eau facilement extractible.

Les résultats de la réserve en eau utile sont présentés dans le *tableau 3* et à la *figure 4*. Ils sont exprimés en teneur en eau volumique. Nous avons pris comme potentiels de référence - 10 et - 1 600 kPa, qui correspondent à la teneur en eau

Tableau 3. Réserve d'eau utile (%) des différents mélanges.

Table 3. Available water content (%) of the mixtures.

Potentiel de l'eau (kPa)	Sable pur	Mélange à différentes teneurs en bentonite					Bentonite naturelle
		3 %	6 %	12 %	24 %	50 %	
- 10	10,18	32,13	41,72	50,85	67,96	97,75	147,99
- 1 600	0,75	3,69	4,45	6,17	11,79	33,11	50,59
RU (%)	9,43	28,44	37,27	44,68	56,17	64,64	97,40

proche de la capacité au champ et au point de flétrissement. Les données montrent que l'apport d'argile engendre une augmentation du pourcentage d'eau utilisable par les plantes.

L'examen des résultats présentés *tableau 3* permet de constater que la RU du sable pur (~ 9 %) est très faible. Elle augmente à 28 % environ pour le mélange à 3 % de bentonite, ce qui représente en fait 3 fois celle obtenue avec le sable pur, puis l'accroissement de la RU devient progressif et ceci jusqu'à 97 %, valeur obtenue avec la bentonite naturelle.

À partir de ces données, on peut déterminer la part de la réserve d'eau utile qui revient à l'argile incorporée dans chaque mélange. Les résultats de ce calcul révèlent que plus la teneur en argile augmente dans le mélange, plus la part de l'eau revenant à l'argile diminue (*tableau 4*). Autrement dit, le sable joue un rôle important dans l'hydratation aux faibles teneurs en argile. Aux fortes teneurs, l'argile devient apparemment moins active car la contribution dans l'hydratation de ce qui revient spécifiquement au sable devient négligeable. Cela a été

confirmé par le coefficient d'activité de l'argile et est conforme aux résultats obtenus sur l'hydratation des matériaux.

Conclusion

On peut conclure que les résultats présentés plus haut donnent un cadre explicatif à l'étude de la rétention de l'eau dans les matériaux sableux lorsqu'on ajoute de l'argile. Il est important de souligner que ces travaux ont été effectués avec des sables de granulométrie très resserrée de façon à bien mettre en évidence le rôle de l'argile au sein de la porosité. Si le matériau sableux ou la nature de l'argile étaient de nature différente, les conclusions qui suivent devraient sans doute être modulées, même si les phénomènes identifiés sont de nature similaire.

Il apparaît qu'il est possible d'améliorer considérablement les propriétés de rétention de l'eau de matériaux sableux à partir de l'ajout d'argile :

- la teneur en eau retenue par le matériau augmente avec la teneur en argile ;
- la teneur en argile nécessaire pour obtenir une variation de volume macroscopique est de l'ordre de 12 %.

Cependant l'ajout d'argile ne modifie pas la porosité du matériau sableux à faible teneur en eau. La porosité résiduelle (limite de retrait) reste similaire quelle que soit sa teneur.

Finalement, on peut dire que l'extraction d'eau dans les matériaux se produit dans un premier temps sans qu'il y ait désaturation en eau. Mais il apparaît que la géométrie du sable conditionne largement la valeur de l'indice au point d'entrée d'air, ce qui signifie que le choix du sable, aussi bien dans la valeur résiduelle de la porosité du matériau à l'état sec que pour l'énergie de rétention de l'eau, est d'un poids important dans le comportement des matériaux. Enfin, il faut ajouter le rôle très positif de l'argile au plan chimique, puisque dans le cas des sols sableux seule l'argile possède les

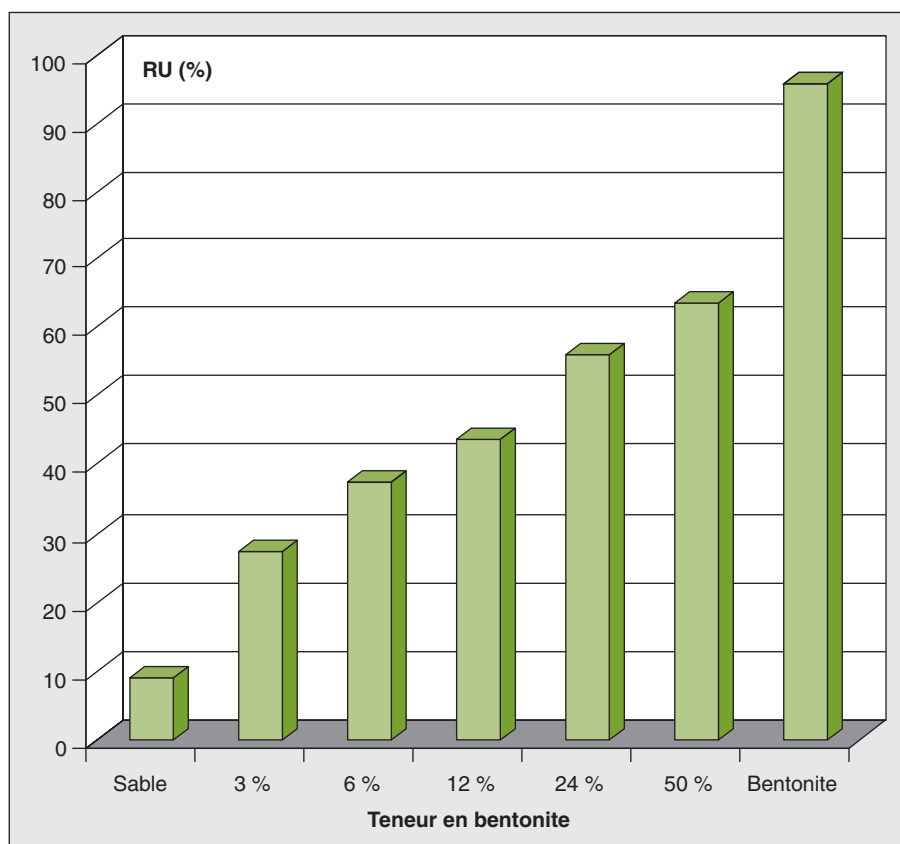


Figure 4. Réserve d'eau utile (%) des différents mélanges sable-argile.

Figure 4. Available water content (%) of various sand-clay mixtures.

Tableau 4. Effet de l'argile sur la réserve utile.

Table 4. Effect of clay on the water content available.

	Teneur en bentonite du mélange (%)						
	0	3	6	12	24	50	100
RU (%)	9,43	28,44	37,27	44,68	56,17	64,64	97,40
RU/% argile	-	9,48	6,21	3,72	2,34	1,29	0,97

propriétés de rétention d'eau et d'échange des ions indispensables pour les plantes.

Pour aboutir à des résultats pratiques, ce travail devra être poursuivi dans le cadre d'études futures afin de confronter ces données expérimentales au terrain, avec tout ce que cela comporte en termes de faisabilité. ■

Références

Achiri A. *Essai de comportement de trois variétés de blé sur un sol amendé de doses croissantes d'argile*. Alger : Institut national de la recherche agronomique (Inra), Station Mahdi Boualem, 1988.

Assouline S, Tessier D, Bruand A. A conceptual model of the soil water retention curve. *Water Resour Res* 1998 ; 34 : 223-31.

Bousnina H. *Bonification du régime hydrique des sols sableux des zones arides par un amendement argileux : étude dans une oasis du sud tunisien*. Thèse de doctorat de la faculté des sciences agronomiques et biologiques appliquées, Gand, 1993.

Bousnina H, Mhiri A. Amélioration de la réserve d'eau utile des sols sableux des régions arides par un amendement argileux. *Sécheresse* 1997 ; 8 : 241-6.

Bruand A, Tessier D, Baize D. Contribution à l'étude des propriétés de rétention en eau des sols argileux : importance de la prise en compte de l'organisation de la phase argileuse. *CR Acad Sci Paris* 1988 ; 307(II) : 1937-41.

Chrétien J. *Rôle du squelette dans l'organisation des sols. Conséquences sur les caractéristiques de l'espace poral des sols sur arènes et sur terrasses fluviales*. Thèse de doctorat ès Sciences, Dijon, 1986.

El-Hady OA, El-Sherif AF. Egyptian Bentonitic deposits as soil amendements. Evaluation as conditioners for sandy soils. *Egypt J Soil Sci* 1988 ; 28 : 205-14.

El-Hady OA, El-Sherif AF. Egyptian Bentonitic deposits as soil amendements. Hydrophysical characteristics and mechanical strength of sandy soils treated with Bentonites. *Egypt J Soil Sci* 1988 ; 28 : 215-33.

Fiès JC. Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. *Ann Agron* 1971 ; 22 : 655-85.

Fiès JC, Bruand A. Analysis of soil textural porosity to skeleton particle size using mercury injection porosimetry. *Soil Sci Soc Am J* 1992 ; 56 : 1062-7.

Halitim A. *Sols des régions arides d'Algérie*. Thèse de Doctorat d'État, Office des publications universitaires d'Algérie (OPu), 1988.

Lhotsky J. Influence de la bentonite sur le changement des dimensions de pores dans un sol sableux. *Science Sol* 1971 ; 2 : 97-109.

Monnier G, Stengel P, Fiès JC. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. *Ann Agron* 1973 ; 24 : 533-45.

Tessier D, Berrier J. Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observations des sols humides soumis à différents pF. *Sci Sol* 1979 ; 1 : 67-82.

Tessier D. Sur la signification de la limite de retrait dans les argiles. *CR Acad Sci Paris* 1980 ; 291 D : 377-80.

Tessier D. *Étude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation*. Thèse de doctorat ès Sciences, Paris VII, 1984.