AMELIORATION DES PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS SABLEUX DU SAHARA ALGERIEN PAR AJOUT D'ARGILE

HALILAT M. T. [*] et TESSIER D. [**]
[*]Département d'Agronomie saharienne. Université de Ouargla (30000), Algérie
[**]INRA, station Science du Sol, route de Saint Cyr, Versailles 78026, France

RESUME

Ce travail est consacré à l'étude de l'amélioration des propriétés physiques des sols sableux du Sahara algérien par ajout d'argile. Son but est essentiellement de fournir des éléments d'interprétation des propriétés des sols en fonction des conditions qui président à leur fonctionnement en milieu aride surtout le potentiel de l'eau.

Le comportement de mélanges sable-argile dépend en premier lieu du taux de bentonite ajoutée. Le principal effet de l'augmentation de la teneur en argile est d'augmenter la teneur en eau et l'énergie de rétention de cette eau. La bentonite n'est en mesure de changer les propriétés physiques (hydratation, gonflement) que lorsque sa teneur atteint environ 12 %.

Mots clés : sable, argile, mélange, potentiel hydrique, Sahara

SUMMARY

This work is devoted to the study of the improvement of physical properties of sandy grounds of the Sahara Algerian by addition of clay. Its goal is essentially provided elements of interpretation of ground properties in function of conditions that preside to their functioning in arid middle especially the potential of the water.

The behavior of mix sand-clay depends in the first place on the rate of clay. The main effect of the increase of the content in clay is to increase the content in water and energy of retention of this water. The fraction < 2 µm is not in measure to change physical properties (hydration, swelling) that when its content reaches approximately 12 %.

Obtained results show that the change of behavior of the mix is before all linked to the evolution of its texture.

Key words : sand, clay, mix, hydrique potentiel, Sahara

I- INTRODUCTION

Les ressources de l'agriculture des régions arides et semi-arides sont limitées, surtout si on les compare aux besoins des populations locales. Dans ces régions l'extension et le développement de l'agriculture exigent la mobilisation des ressources naturelles, humaines et financières.

Dans le cadre de la mobilisation des ressources naturelles, les zones sahariennes relativement délaissées (sols renferment parfois plus de 90 % de sable) constituent aujourd'hui un des centres d'intérêt de la direction politique du pays.

L'écosystème dans ces zones sahariennes connaît un équilibre délicat et très fragile (Dutil, 1971). La mise en valeur des terres dans ces régions, l'augmentation de la productivité par unité de surface, leur conservation exige ici plus qu'ailleurs des études très détaillées (Halitim, 1988).

Dans les régions sahariennes plus qu'ailleurs, par rapport à la gestion de l'eau et au développement des plantes, le maintient de caractéristiques physiques les plus favorables à l'économie de l'eau et au développement des plantes doit être recherché.

Dans le Nord du Sahara algérien, les sols sont souvent constitués essentiellement de sables. Ils sont donc, compte tenu de leurs caractéristiques physiques et physico-chimiques, très défavorables à l'agriculture. Une solution possible pour améliorer leurs propriétés consiste à ajouter de l'argile aux matériaux sableux et ce, afin notamment d'augmenter à la fois leur réserve en eau et l'énergie de rétention de l'eau. L'existence de gisements importants d'argile au Sahara (Achiri, 1988) rend à priori possible cette opération. Le principal objectif de ce travail est donc de développer une étude expérimentale du comportement de sable additionné d'argile et ce en étudiant les paramètres précédents.

Ainsi, pour utiliser rationnellement une aussi précieuse matière que l'eau, pour mettre en valeur des sols souvent sableux et peu fertiles, pour contrôler l'érosion, enfin, pour proposer un système d'exploitation rationnel du sol répondant aux besoins des populations sans hypothéquer l'avenir, des recherches approfondies sont nécessaires, dans l'objectif de mettre entre les mains des utilisateurs, une base technique et scientifique de protection et d'aménagement de ces régions (Halitim, 1988).

II- MATERIAUX ET METHODES D'ETUDE

A- Préparation des matériaux

Le protocole utilisé pour préparer les différents mélanges sable-argile est celui mis au point par Kheyrabi et Monnier (1968), puis par Fiès (1971) dans le but de préparer des échantillons présentant une structure macroscopique ment continue à l'état sec.

Le sable utilisé est de taille comprise entre 63 et 160 µm et provient de la région de Gassi-Touil au sud-est algérien. La bentonite naturelle de Mostaganem a été utilisée à son état brut (Tableau 1). La séparation de la fraction inférieure à 2 µm a été faite après agitation mécanique de la bentonite brute dans l'eau. Le matériau a été mis ensuite dans une allonge à sédimenter. Les particules dont la taille est < 2 µm ont été recueillies par une série de sédimentations.

Tableau 1 : Caractéristiques physico-chimiques de l'argile brute

	Argile (%)	Limon (%)	Sable (%)	CEC ($cmol^+/kg$)	Na/CEC (%)	Surface spécifique (m^2/g)
Argile brute	62,5	20,3	17,2	48,6	77 %	347,1

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 :

$$(Si_{3.88}\,Al_{0.11})(Al_{1.39}\,Fe_{0.28}\,Mg_{0.35})O_{10}(OH)_2\,Ca_{0.02}\,Na_{0.35}K_{0.07}$$

Tableau 2 : Caractéristiques chimiques de l'argile brute et de la fraction < 2 µm

Eléments	Argile brute (g/100 g)	Fraction < 2 µm (g/100 g)
Si	25,82	29,48
Al	7,00	8,24
Mg	1,47	1,53
Fe	2,39	2,81
Ca	3,80	0,14
Na	1,22	1,44
K	1,46	1,33

Le mélange a été fait à différentes proportions d'argile : **0 %** (sable pur), **3**, **6**, **12**, **24, 50** et **100 %** d'argile. Le matériau obtenu a été porté à différents potentiels de l'eau en fixant le potentiel matriciel. 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 localisation de l'eau et les changements d'organisation des matériaux.

B- Modalités expérimentales

1- Contrôle du potentiel d'eau

Le dispositif utilisé pour porter les échantillons à différents potentiels de l'eau a été décrit par Tessier et Berrier (1979), ceci jusqu'à – 1,6 MPa. Au-delà, les échantillons ont été soumis à des niveaux de dessiccation allant jusqu'à – 107 MPa, en mettant les échantillons à différentes humidités relatives. On couvre ainsi la gamme complète des contraintes hydriques que peut subir le sol au contact de l'atmosphère (Tessier, 1980). A chaque point expérimental, on procède à la détermination de la teneur en eau et du volume apparent (Monnier et *al.*, 1973). Dans la pratique, pour fixer le potentiel de l'eau, on applique une pression gazeuse **P** aux échantillons pour en extraire l'eau et ceci avec deux dispositifs expérimentaux.

* **P < 1 bar** : C'est un dispositif qui fonctionne selon le même principe que l'appareil de Richards (1947). Ce dispositif permet de dessécher ou de réhydrater les échantillons de sol de – 1 à – 100 kPa.

* **1 bar < P < 25 bars** : Dans ce cas, on utilise alors une presse à membrane, ou

l'appareil de Richards (1947), dont le principe est le même que dans le dispositif précédent.

* **Pressions > 25 bars** : On fixe le potentiel de l'eau dans l'échantillon en l'équilibrant avec une humidité relative qui fixe, selon la loi de Kelvin, la pression de succion soit :

$$P = \frac{RT}{Mg} \ln \frac{P_0}{P}$$

où : **R** : constante des gaz parfaits

g : l'accélération de la pesanteur

M : masse molaire de l'eau

P et **Po** sont les pressions réelle et maximale de vapeur d'eau

T = t + 273 (t : température de l'enceinte)

2- Détermination de la teneur en eau pondérale

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

III- RESULTATS ET DISCUSSION

A- 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 entre eux, fait apparaître globalement 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 de l'eau (bas pF) et tend à devenir beaucoup plus faible aux bas potentiels. Le comportement de l'argile brute et celui du mélange à 50 % d'argile, se distingue de celui des autres mélanges. A titre d'exemple, à un potentiel de l'eau très élevé de – 1 kPa, la teneur en eau pondérale est de 30 % pour le sable pur, elle passe à 120 % pour le mélange à 50 % et à 206 % pour l'argile brute.

Pour toutes les courbes (Fig. 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 % à – 1,6 MPa. Pour les autres matériaux, la chute de la teneur en eau correspond à des potentiels plus bas et ce, même pour l'argile brute, pour laquelle on note une chute importante au voisinage de – 1,6 MPa. Un phénomène similaire est observé avec le matériau à 50 % d'argile.

B- Variation du volume et structuration des matériaux

L'approche expérimentale que nous avons utilisée permet à chaque teneur en eau d'un matériau, de suivre les variations de volume de l'échantillon. Nous allons présenter les différents résultats de l'évolution de l'indice des vides "e", [volume des pores (eau + air) rapporté au volume de solide], de l'ensemble des mélanges sable-argile ainsi que ceux de l'argile brute. Nous présenterons les courbes de variation de volume seul(Fig. 2).

Ces courbes montrent que les comportements sont très différents entre le sable pur, les mélanges sable-argile et l'argile brute.

Il apparaît d'abord que les mélanges à 3 et 6 % d'argile possèdent les propriétés du sable, c'est à dire que le matériau, en présence d'argile et en fonction du potentiel de l'eau, ne varie pas de volume de façon significative. Autrement dit, 6 % d'argile ne suffisent pas au cours des variations de teneur en eau à structurer un matériau sableux. Il faut atteindre 12 % d'argile pour observer une augmentation de volume de l'ordre de 50 % à – 1 kPa et on a environ 100 % d'augmentation de volume à – 1 kPa pour 24 % d'argile, qui passe ensuite à 250 % avec le mélange à 50 % d'argile.

D'un autre côté, il apparaît que tous les mélanges sable-argile aboutissent au-delà de – 320 kPa à un volume stable et quasi identique. L'ajout d'argile joue donc très peu sur la capacité des matériaux à devenir plus compacts dans le domaine des fortes dessiccations et l'essentiel de la structuration se produit pour les potentiels de l'eau ≥ – 10 kPa (bas pF). Chrétien (1986) et Bruand et *al.* (1988) ont abouti à conclusions similaires.

C- Réserve d'eau utile (RU)

La réserve utile en eau du sol, 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.

Il est important de présenter l'effet de l'ajout d'argile sur la réserve en eau utile (RU) du sol.

Les résultats de la réserve en eau utile sont présentés dans le Tableau 3. Ils sont exprimés en teneur en eau pondérale. Nous avons pris comme potentiel de référence – 10 et – 1600 kPa. Les données montrent que l'apport d'argile au sable engendre effectivement une augmentation du pourcentage d'eau utilisable par les plantes.

Tableau 3 : La réserve d'eau utile (%) des différents mélanges

Potentiel de l'eau (kPa)	Sable pur	Mélange à différentes teneurs en argile brute					Argile brute
		3 %	6 %	12 %	24 %	50 %	
- 10	7,02	21,4	30,22	39,08	55,13	85	134,5
- 1600	0,53	2,46	2,93	4,33	9,57	22,07	41,47
R U %	*6,49*	*18,94*	*27,29*	*34,75*	*45,56*	*62,93*	*93,03*

L'examen des résultats présentés Tableau 3 permet de constater immédiatement que la RU (6 %) du sable pur est très faible, elle augmente brusquement à 19 % pour le mélange à 3 % d'argile, 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 93 % obtenue avec l'argile brute. On peut dire donc qu'il y a une bonne corrélation entre la

réserve d'eau utile et la teneur en argile incorporée ($R^2 = 0,99$).

A la lumière de ces résultats, il ressort que la réserve d'eau utile des mélanges sable-argile est proportionnelle à la quantité d'argile incorporée. Cela nous a conduit à chercher une équation générale exprimant cette relation. L'équation de régression ($R^2 = 0,99$) trouvée est de la forme :

$$RU_m\ (\%) = (RU_s + 5\ RU_a.T) / (1 + 1,17\ RU_s.T - 0,03\ RU_a.T^2)$$

où :

RU_m (%) : réserve d'eau utile du mélange,
RU_s (%) : réserve d'eau utile du sable,
RU_a (%) : réserve d'eau utile de l'argile,
T (%) : teneur en argile dans le mélange.

D'une façon générale, on peut calculer la réserve d'eau utile des mélanges sable-argile, de la façon suivante :

$$RUm\ (\%) = (6,5 + 491.T) / (1 + 7,6.T - 3,3.T^2)$$

A 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. Ceci a été confirmé par le coefficient d'activité de l'argile et est conforme aux résultats obtenus sur l'hydratation des matériaux en présence d'eau distillée.

Tableau 4 : Effet d'un gramme d'argile sur la RU

	Teneur en argile dans le mélange (%)						
	0	**3**	**6**	**12**	**24**	**50**	**100**
RU (%)	6,49	18,94	27,29	34,75	45,56	62,93	93,03
RU / % argile	-	4,15	3,46	2,35	1,62	1,26	0,93

IV- DISCUSSION GENERALE

Rappelons que ce travail s'inscrit dans le cadre de préoccupations d'ordre agronomique et concerne principalement une contribution à l'étude de l'amélioration des propriétés physiques des sols sableux du sud algérien. Parmi les problèmes posés dans cette région, l'abondance de sable dans le sol (parfois à plus de 90 % de sable) est déterminante par rapport aux propriétés du sol. Il est à l'origine de

problèmes physiques et physico-chimiques majeurs. Il en est ainsi de la réserve en eau, de la perméabilité et ainsi que de la rétention des éléments fertilisants sur le complexe adsorbant. 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.

Cette étude est avant tout expérimental. Néanmoins nos résultats permettent certainement de fournir 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,
- la structuration,

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 qui est vidée de l'essentiel de son contenu en eau entre – 3,2 et – 10 kPa. Ceci correspond d'après la loi de Jurin-Laplace à des pores de 50 à 15 µm environ. Nous avons observé un phénomène similaire avec les mélanges à 3 et 6 % d'argile, mais il apparaît déjà moins important que dans les sables. Ceci rejoint les résultats de Chrétien (1986) qui a montré que les horizons sableux sont caractérisés par une très forte 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 % d'argile, l'inflexion des courbes commence à partir de – 32 kPa et – 100 kPa respectivement. Ceci 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. Il en résulte donc que l'argile détermine alors le spectre poral du matériau ce qui conduit à un accroissement de l'énergie 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 % d'argile) 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 % d'argile et l'argile brute, 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 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 l'argile brute et du mélange à 50 % d'argile diminue encore très progressivement. Ce domaine correspond à la vidange de la porosité interne de l'argile qui concerne en fait à l'hydratation interfoliaire (Tessier, 1984).

Afin de mieux démontrer l'effet de l'ajout d'argile sur le comportement hydrique des sols sableux, nous avons effectué une analyse statistique sur les données obtenues à partir de la teneur en eau en fonction du potentiel hydrique. Cette analyse concernant bien sûr les différents mélanges sable-argile, est faite sur quinze échantillons pour chaque matériau. Les résultats de cette étude statistique (Tableau 5) montrent que le coefficient de variation (CV) et l'écart type (ET) sont très faible. Nous montrons par là qu'il existe une différence significative entre les différentes teneurs en eau lorsque le potentiel hydrique augmente. Ceci permet de conclure comme cela était attendu que la teneur en eau de – 1 kPa à – 107 MPa, décroît avec l'augmentation de la pression de succion

Tableau 5 : Résultats des analyses statistiques

Matériaux à	**Variance**	**F calculé**	**C. V. (%)**	**ET**	**Signification**
3 % d'argile	118,61	47,16	1,0	0,15	S
6 % d'argile	110,15	59,1	2,1	0,19	S
12 % d'argile	138,18	41,4	1,6	0,2	S
24 % d'argile	129,24	35,52	1,1	0,13	S
50 % d'argile	149,45	67,9	1,9	0,09	S

(C. V. : coefficient de variation ; ET : écart type ; S : significatif)

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 Bousnina et Mhiri (1997).

Ainsi, d'après les courbes de retrait, on remarque qu'une teneur en argile faible n'apparaît pas suffisante pour améliorer les propriétés du sable surtout sur le plan de changement de volume. Il faut donc atteindre environ 12 % d'argile 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.

CONCLUSION

On peut conclure que les résultats 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. A partir de matériaux sableux et d'une argile 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 est proportionnelle à la teneur en argile.
- pour l'ensemble des mélanges, il apparaît que – 5 kPa est la valeur de potentiel moyen au-dessus de laquelle les matériaux restent saturés.
- la teneur en argile nécessaire pour obtenir une variation de volume macroscopique est de l'ordre de 12 %.

Cependant l'ajout d'argile ne perturbe pas la porosité du matériaux sableux, qui, quelle que soit sa teneur possède une porosité résiduelle (limite de retrait) similaire.

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.

BIBLIOGRAPHIES

Achiri A., 1988. Essai de comportement de trois variétés de blé sur un sol amendé de doses croissantes d'argile. INRA, St. Mahdi Boualem, Alger, 62p

Assouline S., Tessier D. and Bruand A., 1998. A conceptual model of the soil water retention curve. Water resources research, vol. 34 (2), 223-231

Bousnina H. et Mhiri A., 1997. Amélioration de la réserve d'eau utile des sols sableux des régions arides par un amendement argileux. Sécheresse, 8 (4), 241-246

Bruand A., Tessier D. et Baize D., 1988. 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. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 307, Série II, 1937-1941

Chrétien J., 1986. 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 Doct. és Sci. Univ . de Dijon, 412p

Dagnelie P., 1970. Théorie et méthodes statistiques. Vol. 2, Duculot, S.A., Gembloux

Dutil P., 1971. Contribution à l'étude des sols et des paléosols sahariens. Thèse de Doct. Es sciences de l'Université de Strasbourg. 346p

Fiès J. C. 1971. Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. Ann. Agron. 22 (6), 655-685

Halitim A., 1988- Sols des régions arides d'Algérie. Thèse de Doctorat d'Etat. OPU, 384p

Kheyrabi D. et Monnier G., 1968. Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. Ann. Agron. 19 (2), 129-152

Monnier G., Stengel P. et Fiès J.C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. Ann. Agron., 24 (5), 533-545

Richards L. A., 1947. Pressure membrane apparatus-construction and use. Agric. Eng., 28, 451-454

Tessier D. et Berrier J., 1979. Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. Observations des sols humides soumis à différents pF. Science du sol, 1, pp. 67-82

Tessier D., 1980. Sur la signification de la limite de retrait dans les argiles. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 291, Série D, p. 377-380

Tessier D., 1984. Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Doct. és Sci. Univ. Paris VII, 361p

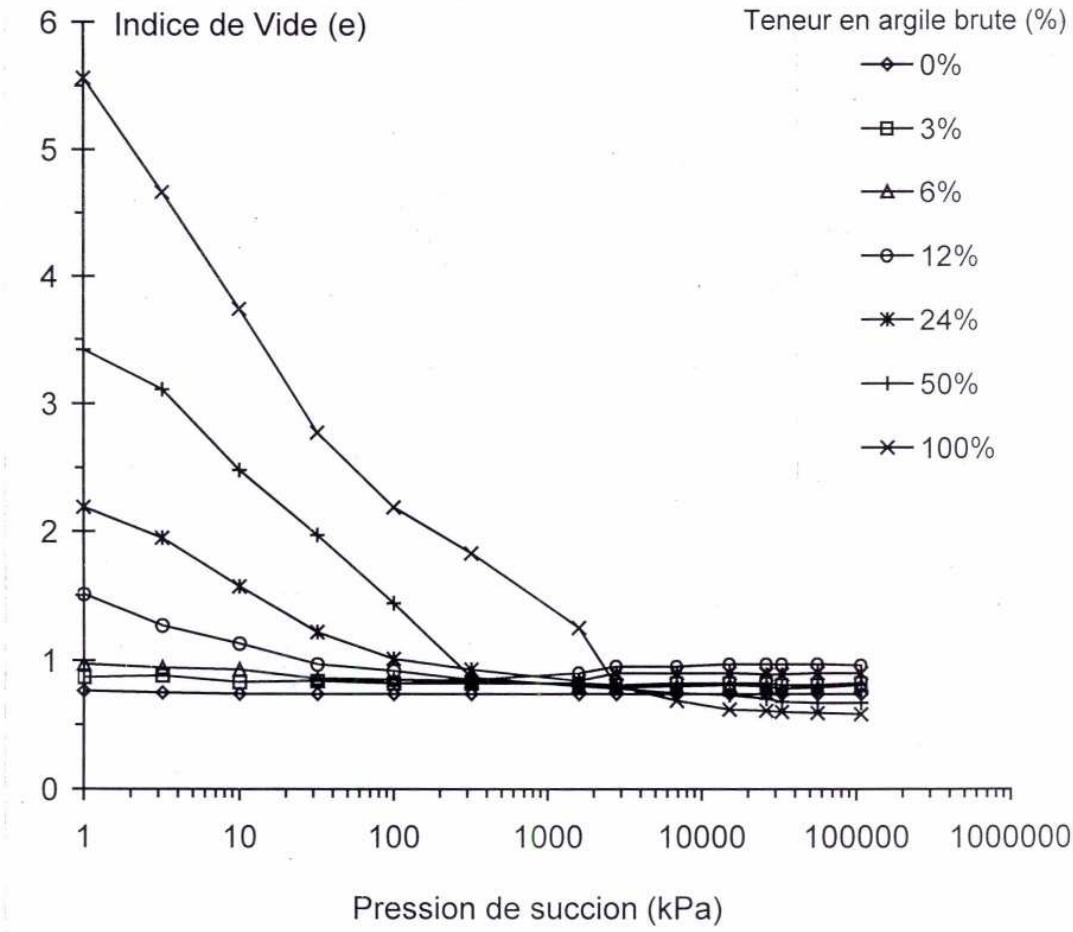

Figure 2 : Changement de l'indice de vide des mélange sable-argile en fonction de la teneur en argile

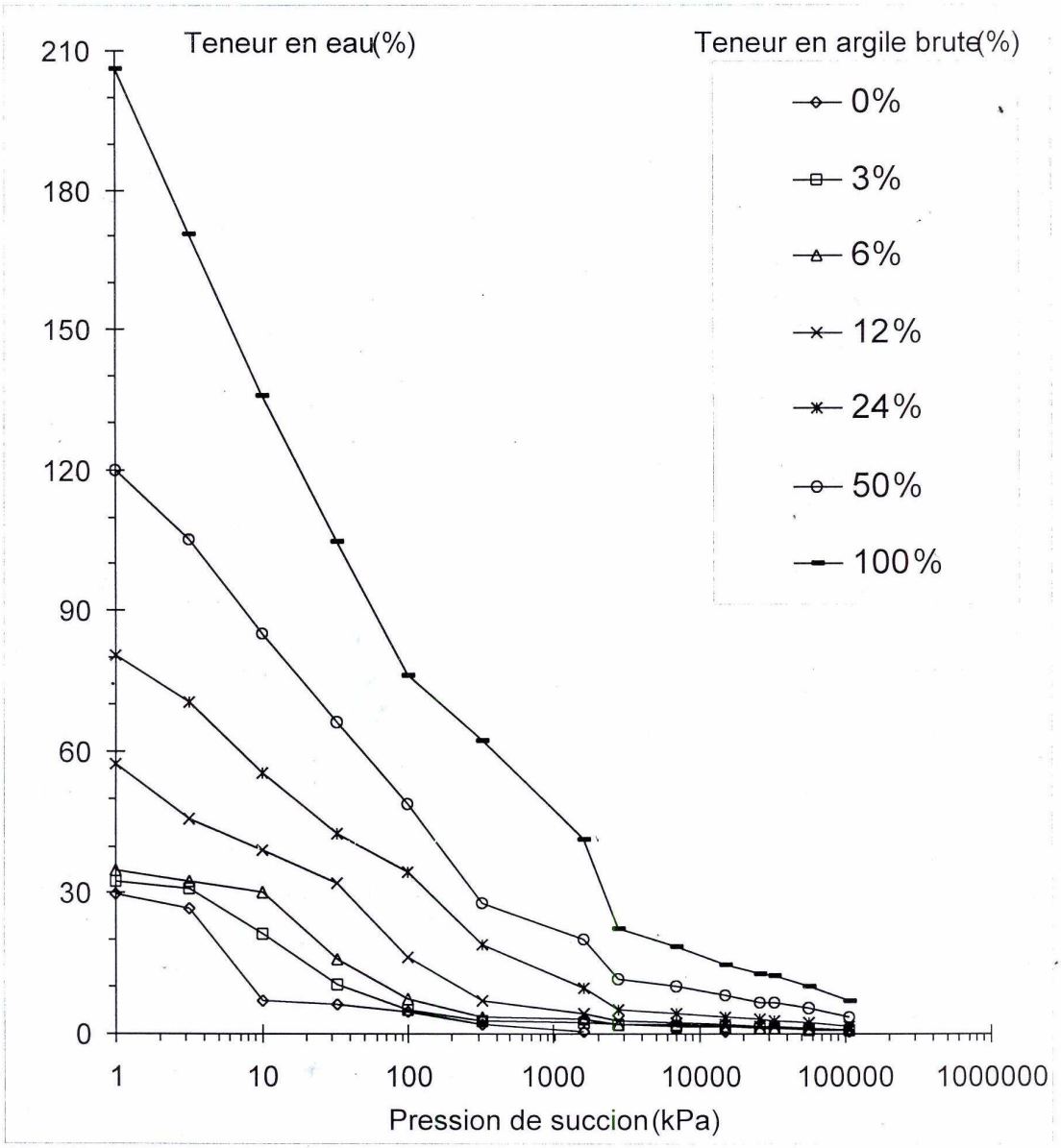

Figure 1 : Teneur en eau (%) des mélanges sable-argile en fonction de la pression de succion (kPa)