



HAL
open science

**Matieres organiques et proprietes physiques des sols.
Etude bibliographique. A.T.P. M.O.S. - PIREN**

Jérôme Guerif

► **To cite this version:**

Jérôme Guerif. Matieres organiques et proprietes physiques des sols. Etude bibliographique. A.T.P. M.O.S. - PIREN. INRA, Station de Science du Sol, 45 p., 1986. hal-02853297

HAL Id: hal-02853297

<https://hal.inrae.fr/hal-02853297>

Submitted on 7 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ANC 196

MATIERES ORGANIQUES ET
PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS

- Etude Bibliographique -

A.T.P. M.O.S. - PIREN

Jérôme GUERIF

INTRODUCTION

L'analyse des principaux types de propriétés et de comportements des matériaux terreux, responsables des aspects physiques de la fertilité des sols, laisse supposer le rôle déterminant des matières organiques à leur égard.

Dans cette étude bibliographique, j'ai tenté de faire le point sur les résultats concernant l'influence des matières organiques sur les propriétés physiques susceptibles d'être à l'origine des comportements mécaniques intrinsèques des matériaux terreux.

Il semble que ceux-ci soient directement régis par l'organisation de l'espace poral et ses propriétés hydriques : hydratation, rétention, transferts.

J'ai limité cette prospection aux comportements mécaniques tels que : gonflement-retrait, consistance, rupture et compactage, en éliminant, malgré leur caractère éclairant vis-à-vis du mode d'action des M.O. des comportements plus globaux tels que la stabilité structurale.

J'ajouterai pour information que les recherches bibliographiques ont été effectuées en combinant les recherches informatisées sur base documentaire (C.A.B. Commonwealth Agricultural Bureau, Agricola, Base agricole de l'U.S.D.A. et COMPENDEX, base américaine de Génie Civil) et des recherches de proche en proche par citations.

Les mots clés utilisés sont les suivants :

ORGANIC MATTER
ORGANIC COMPOUND
ORGANIC SUBSTANCE
HUMIC. SUBSTANCE

SWELLING
SHRINKAGE
BULK DENSITY
POROSITY
VOLUME WEIGHT
SOIL STRUCTURE
CRUMBS
AGGREGATE
AGGREGATION
STRUCTURAL STABILITY

WATER POTENTIAL
HYSTERESIS
WETTABILITY
SUCCION
PF
WATER RETENTION

COHESION
FRICTIONAL ANGLE
SOIL STRENGTH
COMPRESSIBILITY
COMPACTION
COMPACTIBILITY
CONSISTENCY LIMIT
FRIABILITY
SHEAR STRENGTH

1. INFORMATIONS RELATIVES AUX MATIERES ORGANIQUES GENERALEMENT ETUDIEES (Problèmes méthodologiques)

La diversité de nature de constitution des matières organiques présentes dans le sol est à l'origine de deux démarches qui s'opposent et se complètent parfois :

- soit l'étude est menée sur des échantillons naturels de sols où la caractérisation des matières organiques est menée à des niveaux divers de fractionnement,
- soit l'étude se fait après adjonction d'un produit organique à un support minéral. Il s'agit alors :
 - * de produits considérés comme modèles de constituants organiques de sol (molécules analytiquement définies, fraction organique de sol, résidus végétaux, tourbes, etc...)
 - * des produits organiques dont on attend un effet de conditionneur de sol.

1.1. Echantillons naturels de sol

1.1.1. Problèmes méthodologiques

L'étude de l'effet des matières organiques sur les propriétés physiques des sols à partir d'échantillons naturels se heurte à deux difficultés majeures :

- La difficulté de cerner les relations teneur en M.O.-propriétés physiques due à la difficulté d'avoir, pour un sol d'une même constitution minérale, une gamme suffisamment étendue de teneurs en matières organiques
- La difficulté d'imputer à une fraction organique particulière les modifications de telle ou telle propriété physique du sol.

L'utilisation d'échantillons naturels d'un même sol soumis à différents systèmes de culture permet d'avoir des teneurs en carbone variées, mais se trouve confrontée au fait que la nature et la proportion des constituants organiques de chaque échantillon sont différentes (on observe par exemple une grande variabilité de la répartition C libre/C lié ou du rapport C/N).

Certains auteurs tentent de contourner cette impasse en comparant les comportements d'un sol riche en matières organiques à un témoin minéral "fabriqué" en détruisant la matière organique. Mais cette destruction n'est généralement que partielle. De plus, les méthodes de destruction des M.O. sont nécessairement agressives pour l'organisation des constituants minéraux.

1.12. Quantification et Caractérisation des M.O. de sol

Le dosage du carbone est sans conteste la méthode la plus courante dans le domaine des recherches à caractère agronomique. La teneur en carbone est déterminée par le pouvoir réducteur de la matière organique (oxydation par le bichromate en milieu sulfurique). [Méthode d'Ane, Méthode de Walkley et Black...]

Les chercheurs du Génie Civil, à la fois confronté aux impératifs pratiques des laboratoires routiers, et à leur apparente méconnaissance du sujet, semblent découvrir la nécessité du dosage du carbone pour éviter l'imprécision de l'évaluation du taux de M.O. par la perte au feu ou par la destruction à l'eau oxygénée par exemple.

Peu d'auteurs tentent d'établir, à partir d'échantillons naturels, des relations entre propriétés physiques et un fractionnement, même grossier, des M.O.. Quand elles sont pratiquées, les méthodes de fractionnement ou d'identification dépendent de la fraction concernée (Acides Humiques ou Fulviques, Polysaccharides, Lipides, etc....).

1.2. Mélanges artificiels

Le moyen d'étudier à la fois la variable "teneur" et la spécificité d'action des différentes fractions, est d'enrichir, à différentes doses, un témoin minéral avec divers produits organiques.

Ces produits peuvent être :

- des fraction organiques extraites de sols (Acides Humiques, Fulviques, Lipides, etc...) définies par leurs modes d'extraction,

- des produits "modèles" choisis pour leur similitude avec des matières organiques de sol :

- au niveau de leur structure chimique (molécules) ou histologique (fragments ou poudre de résidus de récolte, fibres diverses,...),

- au niveau de leur origine biologique (modèles de produits transitoires : polysaccharides ou modèles de biomasse : filaments mycéliens...)

- des produits organiques dont on teste l'aptitude en tant que conditionneurs de sol. Il n'a été retenu dans cette revue bibliographique que les papiers qui ayant traité aux conditionneurs, éclairent d'un point de vue méthodologique ou phénoménologique l'étude des Matières organiques de sol.

Quel que soit le produit organique étudié se pose le problème du choix du mode d'incorporation à la phase minérale et donc de sa localisation dans l'assemblage des constituants minéraux.

Le mode d'incorporation comprend à la fois le choix de la technique de mélange (par exemple : mise en suspension, puis déshydratation ou mise en suspension puis cofloculation avec différents cations), mais aussi la technique d'élimination de l'eau, ressuyage, centrifugation et dessiccation de l'échantillon qui conditionnent dans certains cas l'organisation finale du mélange.

2. INFLUENCE DES MATIERES ORGANIQUES SUR LA STRUCTURE DU SOL

L'influence des M.O. sur l'assemblage des constituants minéraux est étudiée à différents niveaux définis par les échelles d'observation ou de mesure.

Ces échelles sont choisies en fonction de la nature de l'objet ou du phénomène étudié, mais sont aussi quelques fois imposées par les impératifs techniques inhérents aux méthodes d'observation, d'évaluation ou de mesure.

2.1. Appréciation de l'état structural par bilan de volume

Les travaux faisant état de mesures de masse-volumiques du sol à différentes échelles (agrégats, mottes, cylindres, couches de sol) indiquent que les matières organiques augmentent la porosité (**GRIERSON, HAMBLIN, BOELTER, ROGOWSKI, GUERIF...**) à l'exception près des sols à très faible teneur en argile mais contenant des matières organiques évoluées (**JUSTE, SAND et al., GRIERSON**).

L'analyse des résultats d'expérimentation de longue durée, où différents systèmes de culture induisent des teneurs variables en M.O. montre dans tous les cas une augmentation du volume de l'espace poral mais avec des variations d'intensité.

- chez **KORSCHENS** : une augmentation de 1 ‰ de la teneur en carbone total (liée à des apports de fumier) induit une diminution de la masse volumique (mesurée avec des cylindres de 100 cm³) de 0,035 g/cm³, soit une augmentation de la porosité de 1,3 point.

- chez **MONNIER** et al. : une augmentation de 1 ‰ de la teneur en carbone libre (liées à la concentration des pailles en surface) provoque une augmentation de la porosité texturale de 1,5 point (la teneur en carbone libre ainsi que la densité étant mesurée sur des agrégats de 2-3 mm).

- chez **HAMBLIN** : une diminution de teneur en matière organique (liée au retournement de prairies permanentes) de 1 %, s'accompagne d'une diminution de 0,4 à 0,5 point de porosité (en valeur absolue) (mesurée sur agrégats de 2 à 4 mm).

ADAMS, puis **RAWLS** retrouvent cette tendance sur 2 700 mesures de densité de sols en place.

Ils ont cherché, par voie statistique, à obtenir un outil de prévision de la densité de sol en place "à l'état naturel" à partir des seules données de la granulométrie et de la teneur en M.O..

Une telle tentative pour établir une relation entre des données aussi globales et contingentes que la densité d'un sol en place et sa constitution ne peut aboutir qu'à une caricature d'approche de ce problème.

2.2. Etude morphologique et quantitative de l'organisation des associations organo-minérales

2.2.1. Apports de la micro et de l'ultramicro morphologie

Les dix dernières années ont vu se développer des méthodes accroissant les possibilités d'observation :

- Le microscope électronique à transmission, allié à des techniques de marquages par les métaux lourds et de colorations histologiques spécifiques permet la localisation et l'identification de diverses matières organiques (**FOSTER, 1978 ; GUCKERT, 1983**).
- Le microscope électronique à balayage (MEB) avec le système cryoscan permet l'observation d'échantillons après en avoir figé l'organisation à divers états d'hydratation.

Les résultats acquis par ces techniques concernent par exemple :

a/ l'identification et le recensement des types (nature, origine, état) de matières organiques de sol et dans certains cas leur localisation privilégiée dans les organisations (**BABEL, BAL, BRUCKERT**) ainsi que les organisations spécifiques qu'elles semblent induire (**COULIBALY, PUSH**).

b/ la mise en évidence du rôle agrégatif joué par certaines molécules organiques dans les associations de particules argileuses.

On observe ainsi la structure en filet de certains polymères ou filaments mycéliens ainsi que le comportement de type "glu" (ROBERT, CHENU) des polysaccharides, mis en évidence par ailleurs par l'oxydation sélective du périodate (MARTIN J.P., CHESCHIRE).

c/ l'influence des lipides (acides oléique et stéarique) sur les associations de particules argileuses (Bentonite Na-Ca-Al et Kaolinite Na-Ca-Al). COULIBALY observe que, pour la bentonite, les lipides provoquent un rapprochement des tactoïdes et donc une diminution de la taille des pores, diminution confirmée par des mesures de rétention d'eau à pF2.

On note par contre, pour la kaolinite, une désorganisation dans l'empilement des cristallites et donc une augmentation de la taille des pores, confirmée par une augmentation de la rétention d'eau à pF2.

2.22. Analyse des isothermes d'adsorption

Les résultats issus de la technique BET interprétés par la méthode de Pierce montrent que l'influence de la teneur en carbone sur l'organisation des associations Montmorillonite Ca/Acides Humiques (CHASSIN et al.) dépend du mode de préparation des échantillons.

Ainsi, quand l'insolubilisation des acides humiques par cofloculation intervient avant la dessiccation de l'échantillon et quelle que soit la teneur en carbone, le volume des pores dont le diamètre est compris entre 50 et 400 Å est modifié de façon importante et ce par obturation par les acides humiques.

Par contre, lorsque l'insolubilisation des acides humiques par le calcium intervient postérieurement à la dessiccation du mélange, deux phénomènes distincts interviennent en fonction de la teneur en carbone.

Pour les teneurs en carbone < 4 %, les acides humiques, comme précédemment, se situent préférentiellement dans les pores dont le diamètre varie entre 50 et 400 Å diminuant ainsi leur volume.

Pour les teneurs en carbone > 4 %, on observe une diminution importante du volume des pores les plus petits ($\Phi < 30 \text{ \AA}$) et une légère augmentation du volume des pores les plus grands.

L'auteur interprète ces résultats par un modèle d'enrobage pelliculaire des particules argileuses en accord avec les observations au MEB de CHEN et SCHNITZER (1976).

2.3. Appréciation de la structure du sol au travers de sa stabilité

On peut distinguer quatre grands types d'articles traitant de l'effet des M.O. sur la stabilité structurale.

2.31. La Stabilité : critère de jugement de "l'amélioration" de la structure par le mode de gestion des M.O.

De nombreux auteurs n'étudient pas le phénomène de stabilité en tant que tel, mais utilisent, dans l'interprétation d'essais agronomiques de plein champ, un indice de stabilité comme critère de discrimination entre deux ou plusieurs traitements (systèmes de cultures, nature des rotations, techniques culturales, apports d'amendements ou de conditionneurs de sol).

Il ressort généralement de ces travaux que l'apport de M.O. diminue avec une intensité variable en fonction de leur nature l'instabilité de la structure telle qu'elle est appréciée par le test choisi. Dans la plupart des cas, on conclut donc à une amélioration de la structure par l'apport de produits organiques.

2.32. Etude de la dégradation de la structure des couches de surface des sols cultivés sous l'action de l'eau

Deux approches nécessairement complémentaires existent avec comme objectif le contrôle des phénomènes de battance et/ou d'érosion.

2.321. L'étude, en "vraie grandeur" de l'évolution de l'état structural des couches de surface des sols cultivés (évolution de la répartition en classes de diamètres des éléments structuraux, de la rugosité de surface...) en fonction de l'état structural initial et du caractère des pluies (intensité, fréquence,...)

Les démarches les plus courantes sont : le suivi de parcelles expérimentales (**BOIFFIN**), l'utilisation des simulateurs de pluies, l'utilisation de tests où les éléments structuraux prélevés sont soumis en l'état à un processus standard d'agression par l'eau (**de BOODT**).

Dans ces travaux, la teneur en matières organiques de sols, au même titre que la constitution minérale, intervient plus comme paramètre que comme variable explicative du phénomène étudié.

Par contre, la localisation de M.O. en surface (mulch de paille par exemple) a un effet direct sur le niveau d'agressivité des pluies, en atténuant l'effet de l'intensité d'impact des gouttes de pluies sur la dislocation des éléments structuraux.

2.322. L'étude de la stabilité structurale, (que je qualifierai de "potentielle"), des matériaux terreux, directement corréllée à leur constitution, est le moyen de généraliser les résultats obtenus grâce à l'approche évoquée ci-dessus.

C'est cette démarche qui a prévalu notamment en France dans les années 60 avec le test d'Henin-Monnier où les variables de constitution : granulométrie des constituants minéraux, minéralogie des argiles, nature, état et teneur des constituants organiques sont les seules variables explicatives ; la taille des éléments structuraux, leur teneur en eau, et le mode d'agression par l'eau étant standardisés.

Le mode d'action des divers constituants organiques sur les mécanismes intervenant dans la stabilité des assemblages appréhendée comme un comportement global a été analysé par de nombreux auteurs. Je citerai pour mémoire les travaux de **MONNIER**, **GUCKERT**, **COULIBALY** ainsi que les papiers de **TISDALL** et **OADES** et de **SEQUI** et **GIOVANINI**.

2.33. Stabilité structurale et modèles d'organisation

En étudiant la structure au travers de la stabilité des assemblages, certains auteurs ont établi des modèles d'organisation dont les niveaux sont définis par l'intensité de l'agression nécessaire à leur mise en évidence (tamisage à l'eau, avec et sans prétraitements, dispersion aux ultrasons, etc...) qu'ils mettent en relation avec la nature des liaisons minéral-matières organiques. Ainsi **TISDALL** et **OADES** relient les cinq classes de diamètres d'éléments structuraux qu'ils mettent en évidence (et donc les quatre niveaux d'organisation de leur modèle), au degré d'évolution des matières organiques et à leur nature. En simplifiant, plus les éléments structuraux sont petits, plus ils sont résistants et plus la matière organique est évoluée et liée à la phase minérale. Certains auteurs, étudiant l'évolution des matières organiques, semblent en désaccord avec ce schéma, car ils dissocient le degré d'évolution des matières organiques et l'intensité de leur liaison avec la matrice minérale.

Ainsi, par exemple, les humines ne seraient pas nécessairement des produits très anciens, bien que fortement liées à la matrice minérale.

2.4. Nature des liaisons entre particules : Physicochimie des surfaces

La nature de la matière organique et le nombre important de minéraux capables d'être le siège d'une interaction dans les sols font que les études ont été principalement effectuées sur des argiles et des composés organiques bien définis.

La physicochimie des interactions entre polymères organiques et la surface des minéraux argileux a fait l'objet de nombreux travaux, aussi bien en Science du Sol, qu'à des fins industrielles.

Les modèles les plus couramment cités par les auteurs cherchant à relier les interactions Argile-M.O. à des comportements plus macroscopiques font état de l'importance des ponts de cations polyvalents entre particules argileuses et les groupes carboxyliques des polymères organiques (**TISDALL et OADES, PUSH**).

L'intégration directe, dans des modèles explicatifs des comportements physiques ou mécaniques, des couches de sol de surface, des résultats concernant la physicochimie des associations organo-minérales, est rendue difficile souvent impossible, par le changement d'échelle qu'elle implique nécessairement.

Néanmoins, ces résultats peuvent justifier et rendre pertinent le choix de certains facteurs de variation qui, en amplifiant les phénomènes, permettent de mieux en étudier les mécanismes.

Je me bornerai à citer pour mémoire la mise au point bibliographique de **CALVET et CHASSIN**, l'ouvrage de **THENG**, les travaux de **GREENLAND** et le papier de **HAYES et SWIFT** qui donnent un bon panorama des résultats acquis dans ce domaine.

3. PROPRIETES HYDRIQUES

3.1. Hydratation

3.1.1. La physicochimie de l'adsorption de l'eau sur les complexes organo-minéraux

Les travaux consacrés à ce sujet ont tous été menés sur des complexes d'argile minéralogiquement définie (montmorillonite principalement) et de diverses molécules (éthylène glycol, polyéthylène glycol, amines et acides humiques modèles). La méthode la plus couramment utilisée est l'étude des isothermes d'adsorption.

La présence de corps organiques adsorbés sur l'argile modifie ses caractéristiques d'hydratation. Ces effets dépendent de la nature et de la taille des molécules adsorbées.

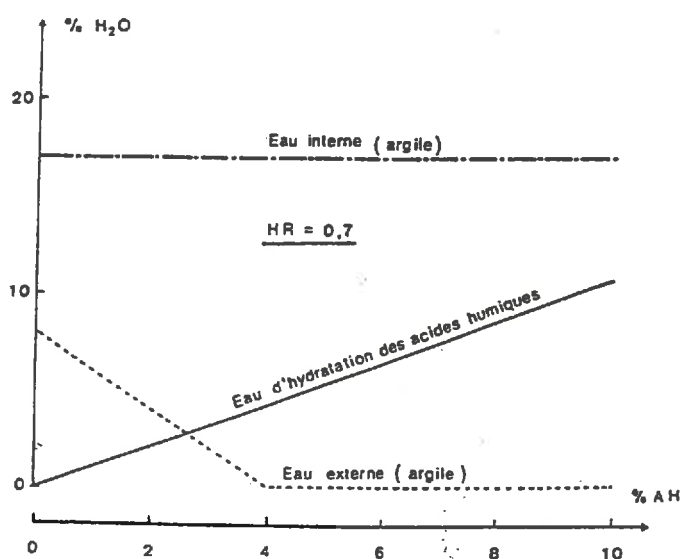
La présence de petites molécules (éthylène glycol) induit une fixation importante d'eau aux fortes humidités relatives (CHASSIN) alors que des polymères comme le polyéthylène 20 000 (GREENLAND) diminue la fixation d'eau observée sur l'argile seule.

Il a été montré que les modifications des propriétés d'hydratation de la montmorillonite contenant des produits de condensation de l'éthylène glycol dépendait étroitement du poids moléculaire (CHASSIN, 1975).

Par ailleurs, les amines diminuent globalement la teneur en eau retenue par l'argile, à une succion donnée. De plus, les résultats dépendent du nombre de carbone dans les molécules (PROST rapport ATP MOS 82).

L'étude des propriétés d'hydratation des associations montmorillonite calcique-humates calciques a montré l'importance de leur mode de préparation et notamment de l'occurrence de la phase de déshydratation par rapport à la phase d'insolubilisation des acides humiques par le calcium.

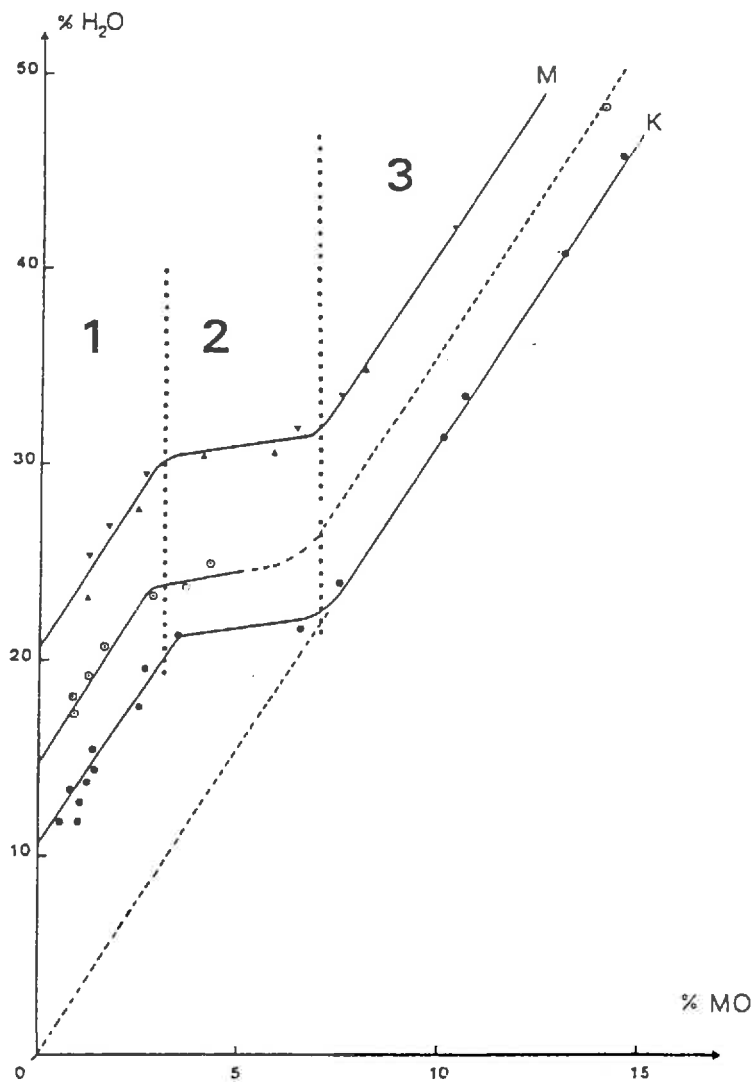
L'auteur explique l'effet du mode de préparation sur le comportement à l'hydratation par des différences de localisation des matières organiques dans les associations de particules argileuses (cf. § 2.3.).



Modèle de répartition de l'eau adsorbé sur les associations montmorillonite-AH préparées par déshydratation. Avant insolubilisation de AH en équilibre avec une humidité relative de 70 %. (d'après CHASSIN - LE BERRE)

Il montre par ailleurs que les sols sablo-humifères présentent des analogies de propriétés d'hydratation avec les associations préparées par cofloculation. Faisant l'hypothèse que les analogies de comportement traduisent l'équivalence des systèmes, il applique le modèle élaboré sur associations aux sable humifères en retrouvant trois phases :

- Phases 1 & 3** : hydratation des substances humiques dans l'espace inter agrégats
- Phase 2** : substitution de l'eau par la matière organique hydratée



— Relation entre les teneurs en eau et en matière organique dans les sols sablo-humifères.

Relationship between contents of water and organic matter in humic sandy soils.
in Chassin, et al.

3.12. La mouillabilité

La modification de la mouillabilité, induite par les matières organiques, en amplifiant l'hysteresis à l'humectation, est un des facteurs explicatifs des modifications de certains comportements des sols influencées par l'aspect cinétique de l'humectation. Ainsi, la stabilité structurale est, à cet égard, un exemple caractéristique.

La mouillabilité est appréciée de différentes manières :

- mesure directe de l'angle de contact (par la méthode de SCHULTZ et PAPIRER) entre une goutte d'eau et un produit organique pur pastillé ou un mélange organo-minéral pastillé (**CHASSIN, PROST, TSCHAPECK**), dans l'air, ou sous heptane.

- mesure indirecte de l'angle de contact par comparaison d'ascension capillaire, dans des colonnes de sol, de l'eau et d'un liquide de référence supposé avoir un angle de contact nul (Heptane par ex.) (**Mc GHIE, TSCHAPECK**)

- mesure de la chaleur d'immersion par microcalorimétrie

- * de produits organiques purs : **TSCHAPECK**

- * de mélange organo-minéraux : **PROST**

- par une évaluation de la vitesse d'ascension capillaire (**MONNIER 1965**)

- grâce à un test où l'on mesure le temps de pénétration d'une goutte d'eau (Water-Drop Penetration Time : WDPT) déposée à la surface de l'échantillon (**NAKAYA/Mc GHIE**)

- indirectement par le test de stabilité d'Hénin-Monnier après prétraitement au benzène.

De nombreux auteurs font état de la diminution de la mouillabilité des sols due aux matières organiques. Ils évoquent le caractère hydrophobe de certains radicaux de molécules organiques, mais aussi les modifications de la rugosité des surfaces des constituants minéraux induites par la présence des revêtements organiques.

Le caractère hydrophobe dépend de toute évidence de leur composition chimique (densité de sites hydrophobes par rapport aux sites hydrophiles) mais aussi de la nature des cations associés. (Ca, Na, Fe).

Ainsi, on constate une forte différence d'activité selon que les produits organiques se sont formés en milieu aérobie ou anaérobie.

L'interprétation de cette différence semble devoir être rattachée aux propriétés des complexes organo-ferriques formés en condition anaérobie et qui sont particulièrement hydrophobes (MONNIER, 1965).

Le caractère hydrophobe d'un complexe organo-minéral est conditionné de surcroît par l'histoire hydrique antérieure et plus particulièrement par l'intensité de la dessiccation. Ce phénomène bien que souvent évoqué ne semble pas avoir fait l'objet de travaux récents.

Il semble, par ailleurs, que l'étude de l'évolution de la mouillabilité (par exemple de l'angle de contact) lors de la cinétique d'hydratation se heurte à la fois à des problèmes de techniques expérimentale et de lacunes dans les développements théoriques de la thermodynamique de l'hydratation.

(CHASSIN, Réunion du Groupe Matière Organique, Montpellier).

Suivant les auteurs, les substances de néoformation ont, ou n'ont pas, d'effet spécifique en fonction du matériel végétal qui est à leur origine.

La divergence des auteurs, en la matière, est probablement liée au fait qu'ils n'utilisent pas les mêmes critères d'appréciation de la mouillabilité. Il semble que l'aspect global du test de stabilité, au contraire du WDPT, privilégie le facteur teneur en carbone au détriment de la nature du matériau d'origine.

3.2. Propriétés de Rétention

La relation potentiel-teneur en eau est à la base de nombreux comportements des sols.

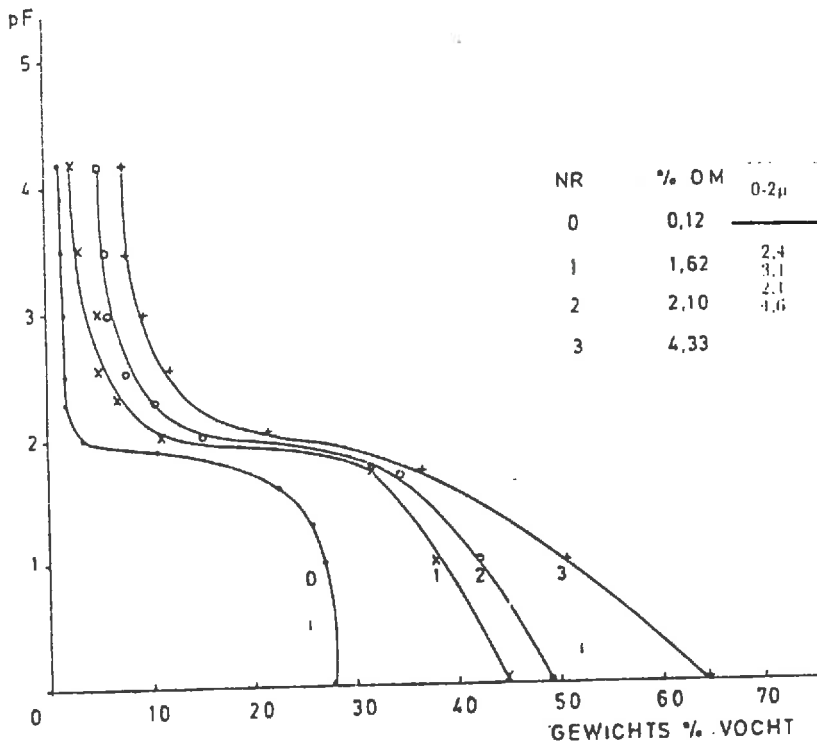
Sa connaissance est indispensable dans la plupart des modèles de transfert. Certains points particuliers (capacité de rétention WCR et point de flétrissement permanent WPF) sont utilisés couramment dans la pratique pour définir et gérer le réservoir que constitue le sol pour l'alimentation hydrique de la plante.

La Réserve Utile étant définie par :

$$R.U = (WCR - WPF) z \times \rho_d$$

z = épaisseur de la couche de sol concernée

ρ_d = masse volumique sèche de la couche de sol concernée



VOCHTKARAKTERISTIEK VAN ZANDIG MATERIAAL < 2 mm
 MET STIJGEND % O.M. (d'après HARTMANN)

Par ailleurs, le potentiel est une bien meilleure variable de caractérisation de l'état hydrique d'un sol que sa seule teneur en eau, dont la signification au niveau des comportements physiques et mécaniques varie avec la texture.

En indiquant globalement l'énergie de liaison entre l'eau et le milieu poreux que constitue le sol, le potentiel est une variable explicative prometteuse des comportements physiques et mécaniques sensibles aux variations de l'état d'hydratation.

Les matières organiques, à la fois par leurs propriétés d'hydratation propres, par les modifications de la mouillabilité des associations organo-minérales et par les modifications des assemblages des constituants minéraux qu'elles induisent, modifient -dans certains cas considérablement- la relation potentiel-teneur en eau.

L'étude de cette relation pose des problèmes techniques de deux ordres :

- L'humectation-dessiccation des associations organo-minérales présente une hystéresis marquée. La branche de courbe correspondant à la dessiccation peut être obtenue aisément avec les techniques habituelles utilisées pour les minéraux purs (Presses à plaque et à membrane). Mais l'obtention de la courbe en humectation est rendue délicate par les cinétiques d'hydratation des produits organiques et par l'évolution dans le temps de la mouillabilité des associations organo-minérales.

Ces phénomènes, bien que difficile à étudier directement, sont considérés notamment comme à l'origine de l'amélioration de la stabilité structurale (**MONNIER, TISDALL et OADES**).

Les résultats obtenus par **HARTMANN** sur des sols sableux, très pauvres en argile (<10 % de 0-2 μ) montrent une influence marquée des matières organiques sur la réserve utile, consécutive à une forte augmentation de la rétention d'eau aux faibles succions (< pF2).

Les résultats de **HAMBLIN** semblent montrer que les matériaux très riches en éléments fins (> 80 % de 0-5 μ) présentent le même type de phénomène : c'est-à-dire une augmentation de la rétention aux faibles succions.

Par contre, pour les matériaux dont la granulométrie est étalée, une augmentation de la teneur en M.O. semble provoquer une translation de la courbe potentiel-teneur en eau, l'incrément de teneur en eau résultant étant constant et indépendant de la succion appliquée. Cette augmentation identique des teneurs en eau à la capacité de rétention et au point de flétrissement n'induit donc pas de modification de la Réserve Utile.

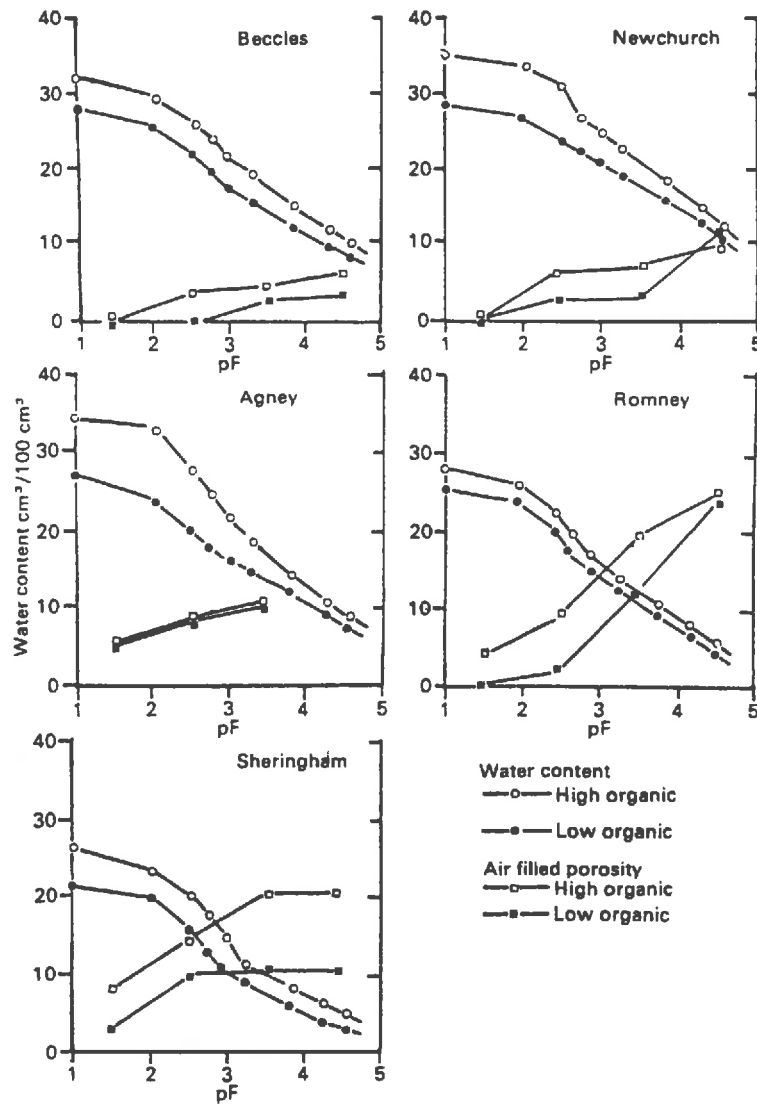


FIG. 1. Water release curves and air-filled porosities for high and low organic matter plots of five soils of medium to high silt content. The units of air-filled porosity are $\text{cm}^3/100 \text{ cm}^3$.

(d'après HAMBLIN)

Series	Plot	Organic Carbon %	Years out of grass	pH	<2 μm	2-50 μm	CaCO ₃ %	Liquid limit %	Plastic limit %	Cation Exchange Capacity (meq/100g)
Beccles	1	2.8	6	7.5	32	19	1.5	51.1	28.0	25.4
	2	1.9	many	7.0	32	17	3.6	45.0	22.0	20.4
Newchurch	1	3.3	6	5.5	42	45	0	61.4	36.5	26.2
	2	2.0	many	7.5	40	44	0.4	48.0	26.5	22.6
Agney	1	3.0	10	7.1	28	54	0.2	54.4	34.0	21.2
	2	1.7	many	7.6	28	54	2.6	40.0	24.5	14.2
Romney	1	2.8	16	7.0	18	50	0.2	46.0	33.5	16.4
	2	2.0	many	7.6	20	55	1.6	37.0	26.1	14.4
Sheringham	1	2.9	0	4.9	13	38	0	32.4	25.7	19.0
	2	1.3	many	6.7	13	48	0.3	24.6	20.7	8.5

Organic carbon determined by wet (dichromate) oxidation (Tinsley, 1950).
 pH in 0.01 M CaCl₂.
 Mechanical analysis by peroxide and calgon dispersion, with pipetting.
 Free CaCO₃ by modified Collin's calcimeter.
 Atterberg limits according to Sowers (1965).
 Cation exchange capacity by leaching at pH 7.0 with 1.0 M NH₄ OAc.

ation in $\theta_{vf}(0.05)$ of surface horizons ($n = 76$) accounted for by single and multiple factor combinations

Regression equations	Variation (%) accounted for by linear regression			z	x	Variation (%) accounted for by curvilinear regression	Variation (%) accounted for by multiple linear regression	Extra variation accounted for by factors additional to x
	z+c	c	z					
$Y = 28.83 + 0.248(z+c) r = 0.579^{***}$	32.7							
$Y = 31.62 + 0.556(c) r = 0.678^{***}$		45.2						
$Y = 37.06 + 0.207(z) r = 0.334^{**}$			10.0					
$Y = 30.82 + 3.94(x) r = 0.833^{***}$				68.9				
$Y = 22.26 + 1.38(c) - 0.0147(c)^2$					49.4^{***}			4.6^{***}
$Y = 23.88 + 7.85(x) - 0.43(x)^2$					73.5^{***}			
$Y = 24.29 + 0.188(c) + 0.102(z) + 3.20(x)$							76.5^{***}	7.6^{***}
$Y = 29.15 + 0.523(c) + 0.076(z)$							45.9^{***}	
$Y = 23.98 + 0.129(z+c) + 3.38(x)$							76.4^{***}	7.5^{***}
$Y = 27.69 + 0.240(c) + 3.13(x)$							74.3^{***}	5.4^{***}
$Y = 25.30 + 0.139(z) + 3.79(x)$							73.6^{***}	4.7^{***}

$\theta_{vf}(0.05)$
 z + c = silt + clay (< 60 μm)
 c = clay (< 2 μm)
 z = silt (2-60 μm)
 x = organic carbon

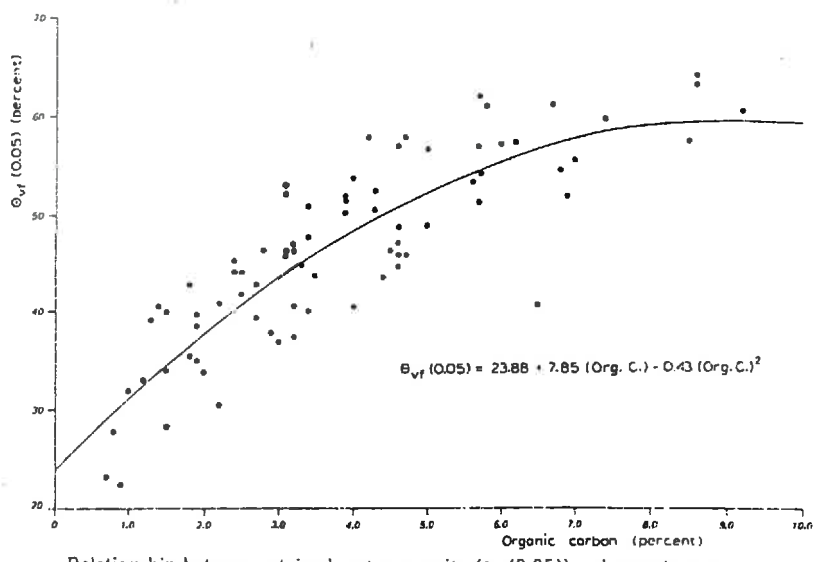
Significance levels:
 * $P < 0.05$
 ** $P < 0.01$
 *** $P < 0.001$
 ns not significant

TABLE IV

Variation in A_{vf} of surface and subsurface horizons ($n = 144$) accounted for by single and multiple factor combinations

Regression equations	Variation (%) accounted for by linear regression			z	x	Variation (%) accounted for by multiple regression	Extra variation accounted for by factors additional to x
	z+c	c	z				
(i) $Y = 18.56 + 0.0372(Z+c) r = 0.140$ ns	1.3						
(ii) $Y = 21.72 - 0.0245(c) r = -0.055$ ns		-0.4					
(iii) $Y = 16.80 + 0.102(z) r = 0.261^{**}$			6.2				0.2 ns
(iv) $Y = 15.60 + 2.14(x) r = 0.700^{***}$				48.7			8.7^{***}
(A) $Y = 16.82 - 0.0207(z+c) + 2.21(x)$						48.9^{***}	0.2 ns
(B) $Y = 18.46 - 0.141(c) + 2.46(x)$						57.4^{***}	8.7^{***}
(C) $Y = 13.32 + 0.0593(z) + 2.06(x)$						50.6^{***}	1.9*

$Y = A_{vf}$
 z + c = silt + clay (< 60 μm)
 c = clay (< 2 μm)
 z = silt (2-60 μm)
 x = organic carbon (0-9.5%)



Relationship between retained water capacity ($\theta_{vf}(0.05)$) and organic carbon (Org. C.) for surface horizons (A horizons) of some west Midlands soils.
 (d'après HOLLIS)

- Les mesures permettant d'établir la relation potentiel-teneur en eau, nécessitent dans tous les cas des temps d'équilibre relativement long. Pour éviter, entre autres, des développements mycéliens susceptibles de modifier les phénomènes étudiés, il convient de bloquer toutes évolutions des matières organiques.

On trouve, dans la littérature, relativement peu de travaux concernant l'influence des Matières organiques sur les propriétés de rétention des sols.

La plupart d'entre eux font état de relations statistiques entre la teneur en eau pour des potentiels particuliers (capacité de rétention, point de flétrissement) et la teneur en matières organiques, associée ou non aux teneurs en argile et en limon (**HOLLIS**).

Quels que soient les potentiels choisis, les matières organiques augmentent la rétention en eau mais pas nécessairement la réserve utile.

Transferts :

Peu de travaux font état d'analyse des relations entre matières organiques et propriétés de transferts de l'eau.

Ce sont pour la plupart des compte-rendus d'essais agronomiques où les mesures de perméabilité en saturé sont choisies, entre autres, comme indicateurs des modifications de propriétés physiques du sol, liées à différents mode de gestion des matières organiques (restitutions (nature, quantité), amendements...)

Il est généralement constaté que plus la teneur en matière organique est élevée plus la perméabilité est grande.

Cet effet est bien entendu modulé par la texture du matériau ; il est notamment d'autant moins accentué que la teneur en argile est grande (**GRIERSON et al.**).

Dans le cas particulier de sols très sableux, les travaux de **SANDS et al.** (entre autres) montrent que l'augmentation de la teneur en matières organiques s'accompagne :

- d'une diminution de la conductivité hydraulique en saturé (K_o)

- d'une augmentation de la conductivité hydraulique en non saturé (pour des potentiels de 1 bar ou de 15 bar).

The effect of organic matter (OM) and bulk density (ρ_b) on the saturated hydraulic conductivity (K_0) and unsaturated hydraulic conductivities ($K_{-10 \text{ kPa}}$, $K_{-1500 \text{ kPa}}$) of Mt Burr Sand at -10 and -1500 kPa matric potentials

(Standard errors of the mean for K_0 are based on five observations)

OM (% loss on ignition)	ρ_b (g cm^{-3})	K_0	$K_{-10 \text{ kPa}}$ (cm hr^{-1})	$K_{-1500 \text{ kPa}}$
0.012	1.4	157 ± 10	2.5×10^{-3}	2.5×10^{-14}
	1.5	87 ± 10	3.5×10^{-3}	2.5×10^{-13}
0.97	1.4	43 ± 3	2.2×10^{-3}	10^{-10}
	1.5	24 ± 2	4×10^{-3}	3.5×10^{-9}
2.46	1.4	16 ± 0.8	8.5×10^{-3}	8×10^{-8}
	1.5	10 ± 0.3	9.5×10^{-3}	8×10^{-8}

(d'après SANDS & al.)

4. PROPRIETES MECANIQUES

4.1. Les phénomènes de Gonflement-Retrair

L'humectation et la dessiccation des couches de surface provoquent des variations de leur masse volumique. Comme la structure, ces phénomènes de gonflement-retrait sont étudiés à différents niveaux. Je privilégierai ici l'échelle de l'assemblage des constituants élémentaires.

Bien évidemment, les modifications de l'organisation des constituants par les matières organiques retentit sur les phénomènes de gonflement-retrait, mais ceux-ci présentent une hystérésis qu'amplifient les matières organiques en modifiant la mouillabilité des sols.

L'étude du gonflement et l'étude du retrait ne présentent pas les mêmes difficultés méthodologiques et techniques.

4.11. Résultats sur échantillons naturels

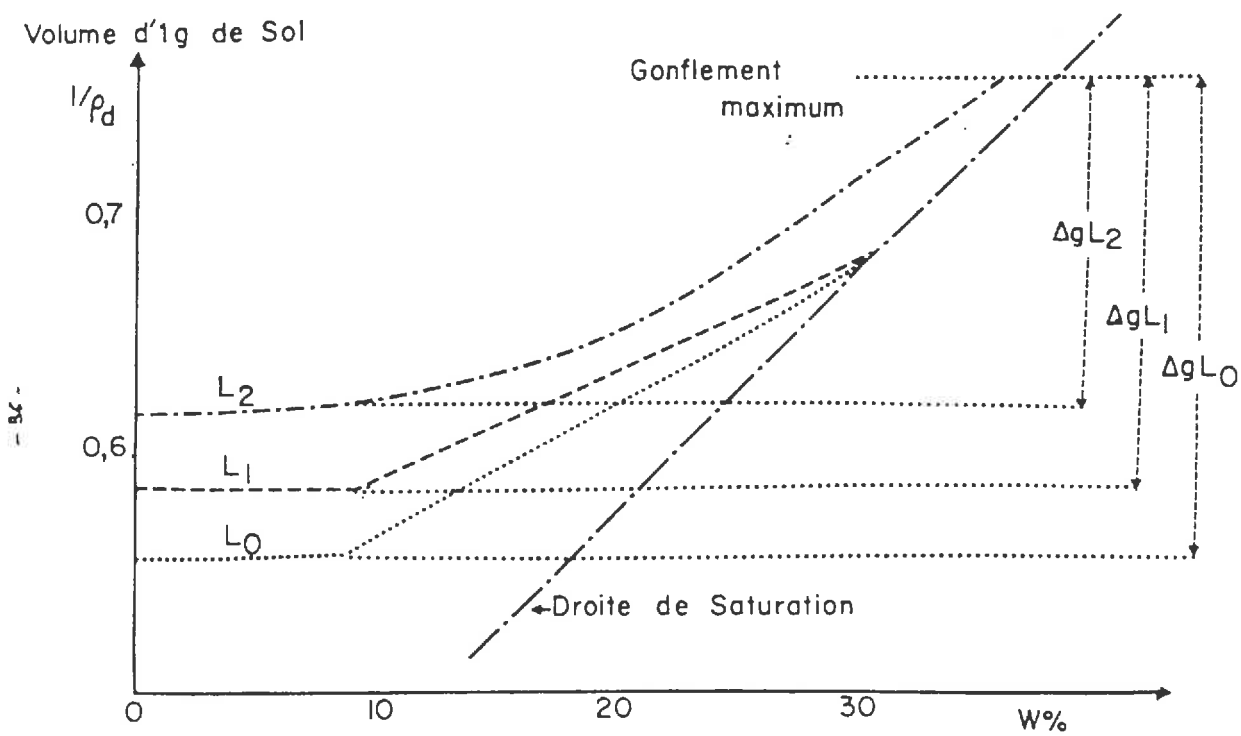
Compte-tenu des problèmes techniques que pose la maîtrise de la cinétique d'hydratation, le gonflement d'associations organo-minérales naturelles est très peu étudié.

On définit généralement un gonflement potentiel ou maximum en dehors de toute contrainte de confinement : les échantillons sont portés à une succion nulle ou voisine de zéro et le gonflement est apprécié in-fine par la teneur en eau de l'échantillon (**THENG**) ou par le couple teneur en eau-masse volumique (**STENGEL-GUERIF**). Dans ce dernier cas, il convient de se prémunir contre les problèmes d'instabilité structurale et l'humectation est donc réalisée sous vide ménagé.

Certains auteurs (**DAVIDSON S.E. et PAGE J.B.**) évaluent la pression de gonflement, c'est-à-dire la charge qu'il faut exercer pour maintenir à volume constant un échantillon porté de l'état sec à une succion nulle.

L'étude du retrait par compte n'implique pas nécessairement que l'on prenne en compte une cinétique. Elle présente donc moins de difficultés, on peut pour chaque incrément de succion choisi, mesurer une teneur en eau et une masse volumique du ou des échantillons.

Les quelques résultats actuellement disponibles semblent montrer que les M.O. de sol, toutes fractions confondues diminuent l'amplitude des variations de volume (**GUERIF**) et essentiellement en diminuant la masse volumique à l'état sec, mesurée sur agrégats de 2 ou 3 mm de diamètre.



Effet des Matières Organiques sur les phénomènes de Gonflement-Retrait.
(d'après GUERIF)

On peut penser à l'action des matières organiques libres qui modifient l'arrangement des constituants au niveau textural.

En tout état de cause, il semble que les courbes de retrait de matériaux terreux contenant de la matière organique (et mesurée sur agrégats de 2-3 mm de diamètre) conservent la même allure générale : Retrait normal le long de la droite de saturation ou parallèlement à cette droite ; Retrait résiduel du point d'entrée d'air à la limite de retrait ; et pallier horizontal jusqu'à l'état sec.

4.12. Résultats concernant les argiles

L'évaluation de l'influence des produits organiques sur le gonflement-retrait des associations de particules argileuses est généralement effectuée grâce à une mesure de la teneur en eau d'un échantillon en équilibre avec une succion donnée, choisie dans le domaine saturé.

Ce genre de travail est toujours effectué sur une argile minéralogiquement définie à laquelle est incorporé le produit choisi (polysaccharides, lipides, amines, acides humiques, ou conditionneurs de sol).

Certains auteurs mettent en cause l'homogénéité de répartition des produits dans les échantillons pour expliquer la relative dispersion des résultats.

Il semble que le sens d'action des M.O. dépend en grande partie du caractère hydrophile ou hydrophobe des molécules concernées.

Ainsi, l'adjonction du Krilium (hydrophile) augmente la pression de gonflement des argiles alors que **THENG, GREENLAND et QUIRK** montrent que le Polyvinyl Alcool restreint le gonflement maximum de la Montmorillonite (apprécié par la teneur en eau à 15 mb de succion).

Mais il semble que cette hypothèse ne soit que partiellement vérifiée.

Si elle ne présente pas de contradiction avec le comportement des smectites, par contre elle n'explique pas le comportement de la Kaolinite.

Ainsi, dans le cas des smectites, l'adjonction de lipides et d'amines provoque apparemment une diminution de la teneur en eau retenue aux pF choisis et donc une diminution de l'espace poral (par rapport à l'argile témoin) et les polysaccharides l'augmentent bien que faiblement.

Dans le cas de la Kaolinite par contre, l'adjonction de polysaccharides et de lipides provoque une augmentation de la teneur en eau aux pF choisis.

Dans les deux cas, les variations du volume de l'espace poral sont en accord avec les observations au MEB effectuées sur échantillons, à structure "figée", correspondantes aux conditions de pF choisis.

4.2. Limites d'Atterberg

Les tests d'Atterberg permettent d'évaluer deux teneurs en eau pondérales caractéristiques de la nature des matériaux terreux : Limites de plasticité LP, Limite de liquidité LL.

L'indice de plasticité IP est défini par :

$$IP = LL - LP$$

Malgré les dénominations utilisées, ces tests ne définissent en aucun cas les domaines hydriques de comportement plastique et liquide, domaines qui ne pourraient être définis que par rapport à un état de contrainte donné.

Cet indice est utilisé par les experts du Génie Civil comme un indicateur global et grossier, permettant d'accéder en routine à des références, abaques, et autres relations pour évaluer la "qualité" d'un matériau terreux pour établir des ouvrages.

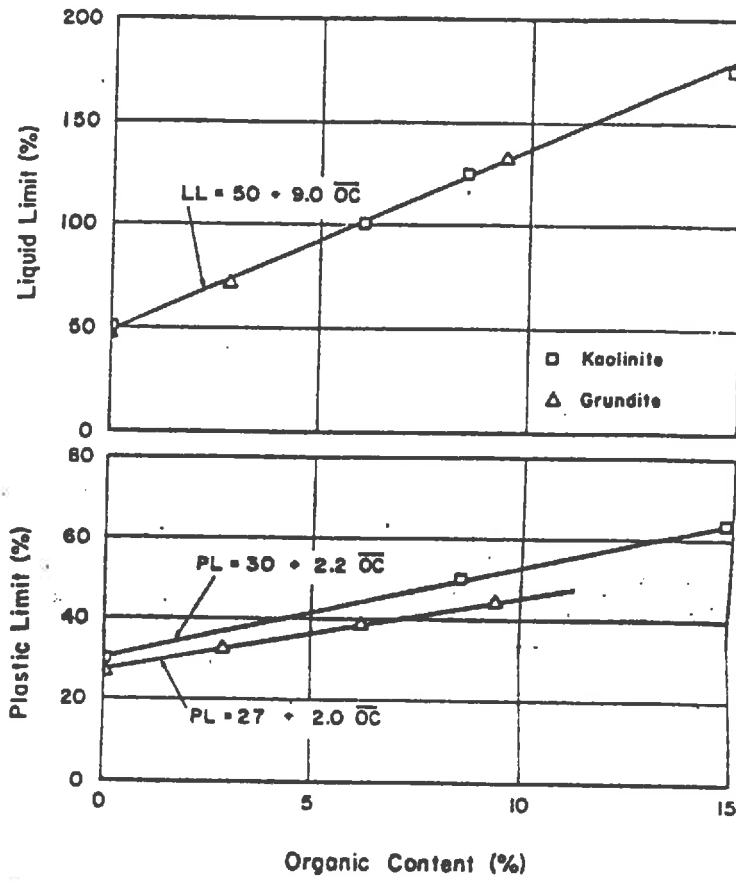
La présence de matières organiques dans les couches de sol de surface perturbe ce référentiel. Le coût du décapage de ces couches de surface pour implanter les ouvrages a conduit les mécaniciens du sol à tenter d'évaluer l'incidence de ces matières organiques sur cette "qualité" des matériaux terreux.

La plupart des travaux publiés en la matière indiquent qu'un incrément de teneur en matière organique s'accompagne d'une augmentation de la limite de liquidité, et comparativement, d'une moindre augmentation de la limite de plasticité et donc provoque une augmentation de l'indice de plasticité.

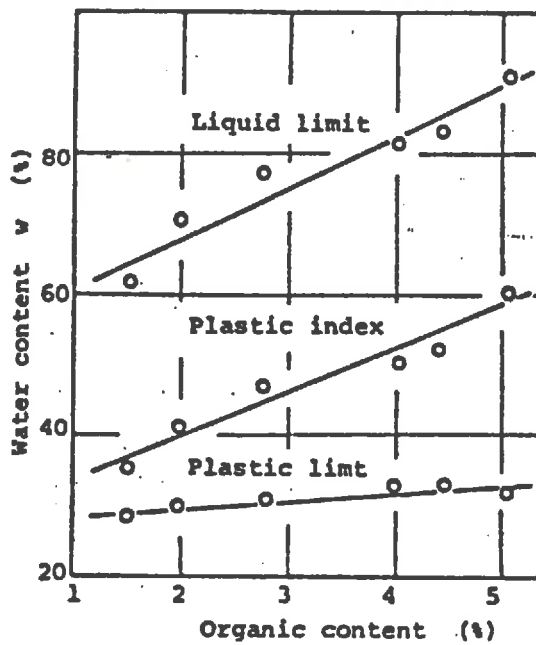
Mises à part les restrictions vis-à-vis du contenu analytique de ces indicateurs, ces résultats montrent bien l'ampleur que l'on peut attendre de l'effet des matières organiques sur les propriétés mécaniques des matériaux terreux.

Ces limites de consistance, dépendant fortement des caractéristiques de constitution des échantillons (étalement du squelette, minéralogie des argiles), ne peuvent être corrélées simplement à une teneur en carbone.

La plupart des relations statistiques présentées sont des régressions multiples prenant en compte la teneur en argile, voire la teneur en montmorillonite, et les auteurs expliquent généralement la dispersion des résultats par la variabilité de la nature des constituants organiques, en opposant produits organiques "bien décomposés" à produits organiques "fibreux".



(d'après KRIZEK & al.)



(d'après SHIN-ICHIRO MATSUO)

Par ailleurs, J.C. REMY a mis en évidence que le sens d'action des matières organiques, sur l'indice de plasticité est différent selon que le taux de matière organique est supérieur ou inférieur à un certain seuil.

Exemples de relations statistiques	%
<p>ODELL ; THORNBURN ; Mc KENZIE (1960)</p> $LL = 11.14 + 4.94 C_1 + 0,67 C_2 + 0,11 M$ $PL = 14.78 + 3.76 C_1 + 0,10 C_2 + 0,04 M$	<p>C_1 = carbone organique C_2 = Argile M = Montmorillonite</p>
<p>SKEMPTON + PETLEY (1970)</p> $LL = 50 + 5 N$	<p>N = perte au feu</p>
<p>SCHMIDT</p> $LL = (46.6 \text{ à } 55.3) + 4.94 C_1$	<p>C_1 = carbone organique</p>

4.3. Le Compactage

Dans ce domaine, tous les résultats présentés résultent de tests de compactage au laboratoire, mis au point pour le Génie Civil ou dérivés de ces tests. Ces tests sont de deux sortes :

- description de la relation masse volumique atteinte-teneur en eau lors du compactage pour une énergie donnée (il s'agit le plus souvent du test Proctor).

- description de la relation masse volumique atteinte-intensité de la pression appliquée pour une teneur en eau donnée (généralement dans le domaine saturé). Ce sont les courbes de compression obtenues à l'oedomètre.

Résultats obtenus par test Proctor :

La relation masse volumique après compactage-teneur en eau lors du compactage permet de définir trois domaines de comportement.

Domaine 1

L'augmentation de la teneur en eau s'accompagne :

- de la diminution de la cohésion des agrégats et donc de leur passage de l'état solide à l'état fragile : la compacité de l'éprouvette dépend alors du réarrangement des agrégats fragmentés.
- du gonflement des agrégats.

Domaine 2

Le matériau devient plastique. L'augmentation de la compacité de l'éprouvette dépend alors aussi de la déformation des agrégats.

La masse volumique croît en fonction de la teneur en eau jusqu'à un maximum défini par la saturation de l'échantillon (au volume de gaz piégé près). La teneur en eau en ce point est appelée : Optimum Proctor.

Domaine saturé

Certains auteurs tentent, sans préjuger des mécanismes, de relier les variations des limites de ces domaines aux variations des teneurs en matières organiques (SOANE et al. 1972 ; FRANKLIN et al., GUERIF et FAURE).

Quand la teneur en matières organiques augmente on constate que :

a/ La masse volumique au maximum Proctor diminue

$$-\rho_d^{\max} = 1,86 - 0,0555 \text{ MO}^T \quad r = 0,720^{***} \quad n = 58$$

SOANE

$$-\frac{1}{\rho_d^{\max}} = 0,197 A + 2,645 \text{ MO} + 0,503 \quad r = 0,873^{***} \quad n = 91$$

GUERIF

b/ La teneur en eau à l'optimum Proctor augmente

$$W_m = 0,246 A + 1,642 \text{ M.O.} + 0,089 \quad r = 0,90 \quad n = 91$$

GUERIF

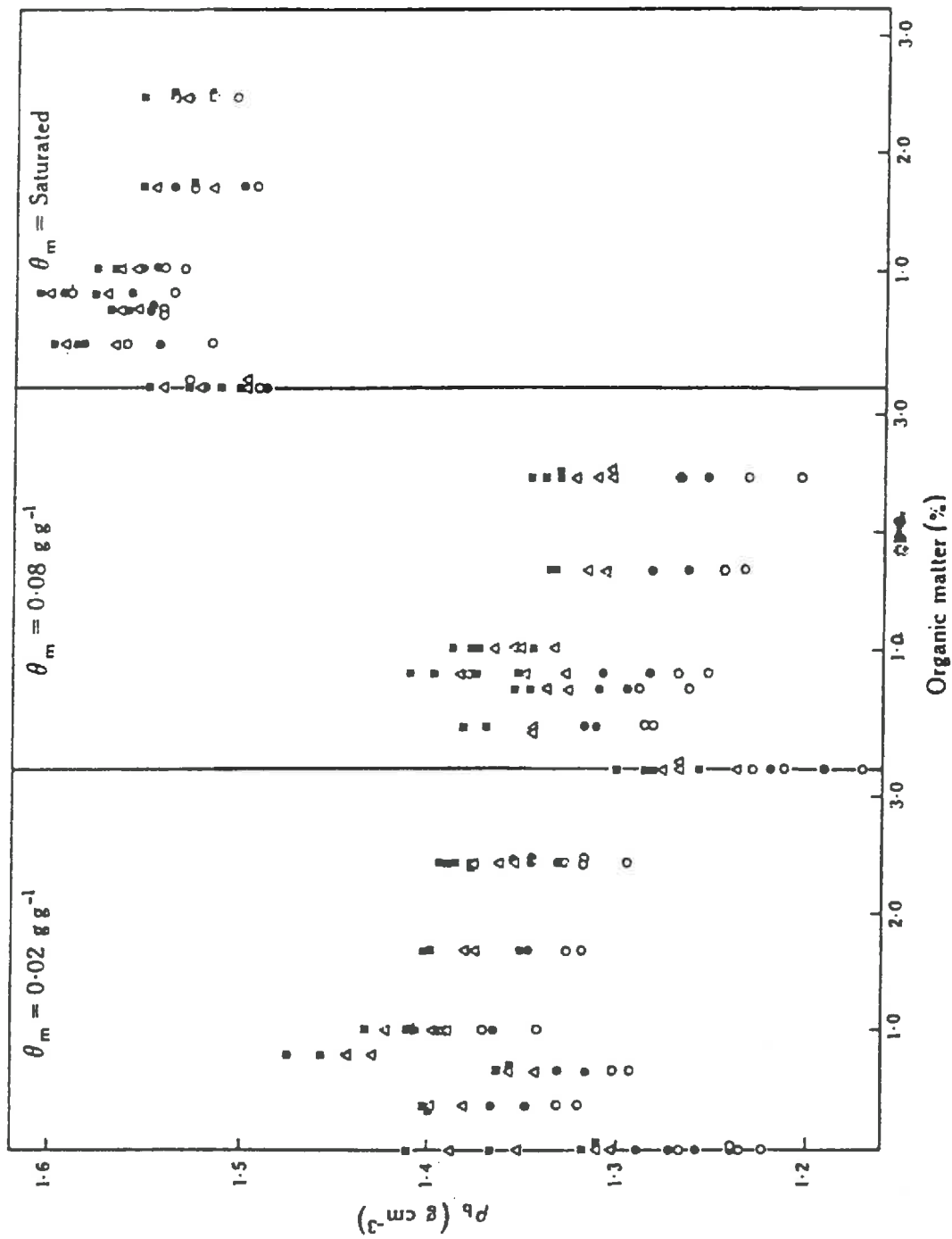
A = teneur en Argile

M.O. = teneur en Matière Organique

c/ La teneur en eau à la limite entre domaine fragile et domaine plastique augmente

$$W_s = 0,27 A + 1,52 \text{ M.O.} \quad r = 0,84^{**} \quad n = 55$$

GUERIF



Consolidometer tests showing the effect of different loads (■ 360 kPa, △ 240 kPa, ● 120 kPa, ○ 60 kPa) on Mt Burr Sand at different OM content and at different gravimetric water content (θ_m).

d'après SANDS R. et al.

Cette diminution de l'aptitude au compactage des matériaux terreux par les matières organiques semble vérifiée pour presque toutes les textures de sol.

On constate cependant que pour les matériaux sableux (SANDS et al.) les matières organiques jouent alors le rôle lubrifiant habituellement tenu par la phase argileuse et facilitent le réarrangement des grains en abaissant l'angle de frottement interne.

Au-delà d'un certain seuil, la densité diminue quand la teneur en matière organique augmente.

Peu de travaux jusqu'alors ont tenté d'explicitier l'influence de la nature et de l'état des différents constituants des matières organiques.

Il ressort cependant (GUERIF, 1979) que les matières organiques liées, en modifiant les propriétés d'hydratation du matériau, modifie ses propriétés rhéologiques, alors que la fraction libre induit un espace poral supplémentaire et confère au matériau, par ses propriétés mécaniques propres, une certaine résistance au tassement.

Résultats obtenus à l'oedomètre :

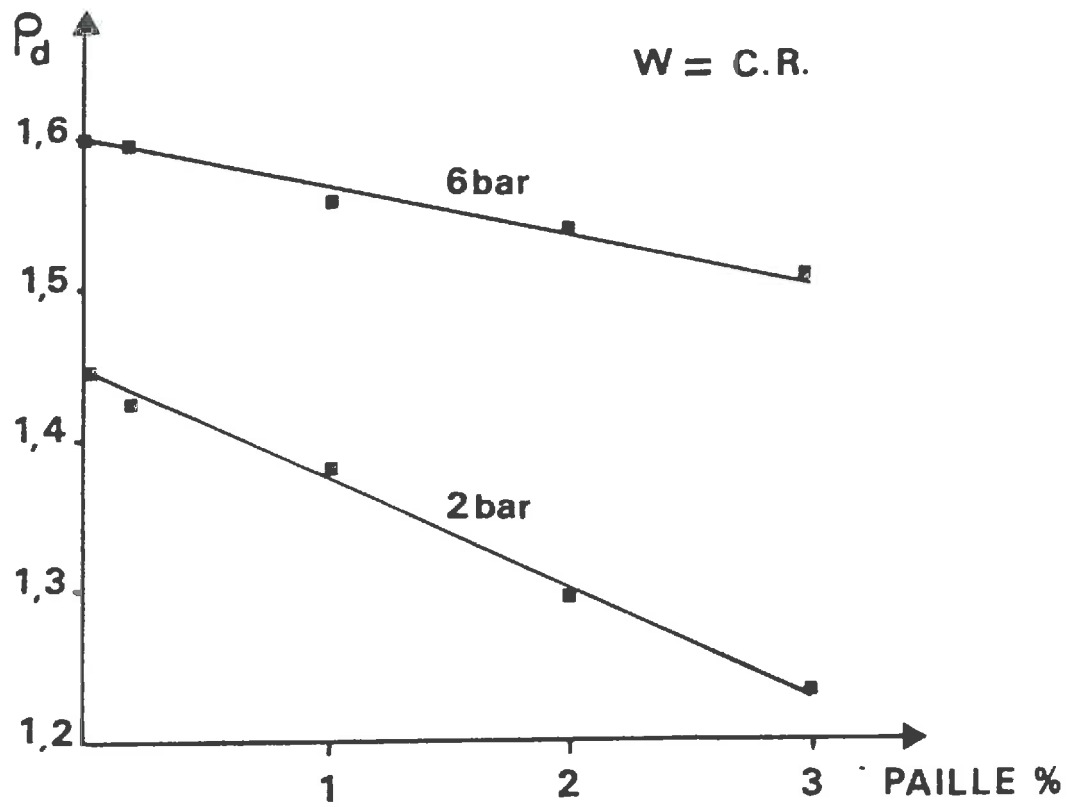
Une des principales caractéristiques de la matière organique libre, et notamment des pailles, est son aptitude à recouvrer une part de son volume et de sa forme initiale après déformation sous charge. Cet effet protecteur est d'autant mieux marqué que la pression est faible.

Ce comportement que l'on peut qualifier de "pseudo-élastique" (GUERIF, 1980) est évidemment lié à un certain nombre de variables caractéristiques

- de la fraction libre : sa nature, son niveau de fragmentation, de biodégradation,
- de la localisation de la fraction libre dans l'organisation structurale du matériau,
- des interactions entre les propriétés mécaniques de la fraction libre et celle du matériau minéral.

L'étude de courbes de compression de mélange artificiel paille-sol (GUERIF, 1979 et 1980) a montré que :

- la pseudo-élasticité des pailles diminue quand leur structure biologique est dégradée. Elle semble plus affectée quand la dégradation est biologique (fermentation) que quand elle est seulement mécanique (fragmentation),



W = C.R.

(d'après GUERIF, 1980)

- la part de l'espace poral induit par la présence de fragments de paille est d'autant plus grand qu'ils sont intimement incorporés à l'assemblage des constituants minéraux. Le volume de cet espace poral supplémentaire est proportionnel à la teneur en paille. La pression nécessaire à sa suppression est directement proportionnelle à la teneur en paille.

4.4. Les paramètres de la Rupture

L'influence des M.O. sur le comportement des sols à la rupture est très peu étudiée.

Ce comportement intéresse bien entendu les agronomes car il concerne directement les conditions de travail du sol et les conditions mécaniques d'implantation du système racinaire. Mais il concerne aussi indirectement de nombreux comportements tels que la stabilité structurale ou les phénomènes de tassement.

La résistance au cisaillement d'un échantillon de sol homogène, isotrope et continu dépend de la résistance des liaisons qui unissent ses différents constituants, ainsi que des frottements entre les différents constituants lors des déformations.

Dans les théories de la rupture les plus classiques, et notamment dans la théorie de Coulomb, on caractérise un échantillon, dans un état physique donné, par deux paramètres : la cohésion et l'angle de frottement interne.

Il existe différents tests, plus ou moins standardisés, permettant d'obtenir une évaluation quantitative de ces deux paramètres. Ils se ramènent tous à des mesures de la force nécessaire pour provoquer la rupture des échantillons. Seules les conditions d'application et de contrôle des différentes contraintes à la rupture varient.

Dans les quelques travaux consacrés à l'effet des M.O., on rencontre principalement deux types de test :

- dans la majeure partie des cas, on évalue la résistance à l'écrasement en conditions non confinées (compression simple) soit sur éprouvettes géométriquement définies remaniée ou non soit sur agrégats naturels (de taille variable)
- dans une moindre mesure, on évalue la résistance au cisaillement à l'appareil de Casagrande. On accède alors à l'évaluation de l'angle de frottement interne et de la cohésion telle qu'elle est définie par la théorie de Coulomb.

La résistance à l'écrasement est une variable globale qui dépend de plusieurs facteurs :

- le volume et la forme de l'échantillon qui conditionnent le choix du modèle permettant de convertir la force mesurée en contrainte et de comparer divers échantillons entre eux.
- l'homogénéité de répartition des constituants tant minéraux qu'organiques dans les éprouvettes ou agrégats testés.
- la continuité de la structure des éprouvettes ou agrégats. En effet, la cohésion d'un échantillon dépend des dimensions relatives de la maille de fissuration et de l'échantillon soumis à compression. Celles-ci résultent de l'interaction entre constitutions minérale et organique/histoire hydrique (alternance humectation-dessiccation)/Volume de l'éprouvette ou de l'agrégat.

Certains auteurs contournent cette difficulté en remaniant les échantillons pour leur conférer une structure continue.

Les principaux résultats sont les suivants :

Sur un échantillonnage de matériaux pour lesquels la gamme de variation de teneur en M.O. est très étendue (0-40 %), **FRANKLIN et al.** observent que la résistance à l'écrasement diminue quand la teneur en M.O. augmente.

Une telle gamme de variation traduit essentiellement une variation de teneur en M.O. libres (Tourbes), et on peut interpréter le rôle des M.O. comme l'introduction d'un facteur d'hétérogénéité et de discontinuité dans l'éprouvette.

Cependant, dans la gamme de variation maximale compatible avec les sols agricoles (0-10 %), la dispersion des résultats, interdit raisonnablement, d'en tirer quelque tendance que ce soit.

Les résultats obtenus par **ROGOWSKI et DON KIRKHAM** sur des agrégats naturels de différents sols soumis à des compressions simples, montrent bien la difficulté d'isoler l'effet d'un facteur et notamment de la matière organique, compte-tenu des diverses interactions entre teneur en argile, teneur en M.O., et masse volumique.

On peut cependant interpréter schématiquement leurs résultats de la façon suivante :

Pour les matériaux à teneur en argile élevée ($A > 40\%$), la microfissuration intra-agrégat prédomine en diminuant la résistance à l'écrasement et masque l'effet des M.O.

Quand la taille des agrégats est suffisamment petite pour éliminer une part importante de cette microfissuration, la matière organique diminue conjointement la masse volumique et la "résistance à l'écrasement".

Pour les matériaux à teneur en argile comprise entre 10 % et 40 %, cet effet microfissuration est d'autant plus faible que la teneur en argile décroît et on retrouve l'effet de l'interaction M.O./masse volumique sur la résistance à l'écrasement.

Cette tendance s'inverse lorsque la teneur en argile est très faible (**HARTGE**) : la cohésion ainsi que l'angle de frottement interne augmentent avec la teneur en M.O.. A l'état sec, cette action des M.O. est nulle, par contre elle se manifeste lorsqu'elles sont hydratées. Pour les deux valeurs de potentiels testés par l'auteur ($\psi = 100$ cm d'eau et $\psi = 300$ cm d'eau), leur effet est d'autant plus marqué que la teneur en eau est élevée. L'auteur interprète ces résultats par une modification des ménisques d'eau par les matières organiques susceptible d'augmenter les phénomènes d'adhésion.

Le sens et l'intensité de l'effet des conditionneurs de sol varient avec leur nature.

Ainsi les conditionneurs de type Krilium diminuent la résistance à l'écrasement des matériaux traités (**JAMISON-ALLISON et MOORE, PUGH et al.**) alors que les conditionneurs de type PVA (polyvinyl alcool) l'augmentent considérablement, les échantillons étant préparés de manière à présenter la même densité quelle que soit la teneur en PVA (**WILLIAMS et al.**)

De plus, l'effet des PVA est d'autant plus marqué que le potentiel augmente en valeur absolue (dessiccation plus grande).

Les auteurs attribuent l'effet des PVA à leurs grandes aptitudes à être adsorbés sur les argiles.

CONCLUSION

Les chercheurs étudiant les propriétés physiques et mécaniques des couches de surface des sols sont confrontés aux problèmes posés par la présence de Matières organiques. Mais la prise en compte nécessaire de cette variable reste généralement globale et aveugle.

Ainsi, à part les travaux sur la stabilité structurale, seulement évoqués dans ce mémoire, il existe très peu de travaux concernant le mode d'action

des matières organiques sur les comportements physiques et mécaniques, où l'état de ces matières organiques (degré d'évolution) ainsi que leur localisation soient pris en compte.

Par ailleurs, les chercheurs traitant des matières organiques, travaillent à une échelle d'investigation, telle que leurs résultats sont difficilement intégrables dans l'étude des comportements physiques et mécaniques des couches de surface des sols.

LISTE BIBLIOGRAPHIQUE

- 1 : Chapitre 1 : Informations relatives aux matières organiques généralement étudiées (Problèmes méthodologiques)
- 2 : Chapitre 2 : Influence des matières organiques sur la structure du sol
- 3 : Chapitre 3 : Propriétés hydriques
- 4 : Chapitre 4 : Propriétés mécaniques

	1	2	3	4
ADAMS, W.A. - The effect of organic matter on the bulk and true densities of some uncultivated podzolic soils. J. of Soil Sci., 1973, 24-1, 10-17.		X		
ADHIKARI, M. ; GANGULY, T.K. - Influence of soil Organic Matter in improving soil physical properties. Indian J. of Agric. Research, 1971, 5-4, 227-232			X	X
ALLISON, F.E. - Organic matter and its role in crop production. Elsevier, 1973, Amsterdam				X
ALTEMULLER, H.J. ; BANSE, H.J. - Die Bedeutung der mikromorphologie hinsichtlich der organischen düngung. in Soil micromorphology, Jongerius A(Ed), 1964, Elsevier.		X		
ANDERSLAND, O.B. ; AL KHAFAJI, A.W.N. - Organic material and soil compressibility. J. of the Geotechnical Engineering Div. American Soc. of Civil Engineers, 1980, 106 GT7 : 749-758				X
ARINGHERI, P. ; SEQUI, P. - The arrangement of organic matter in a Soil Crumb. in Modification of Soil Structure. EMERSON ; BOND ; DEXTER (Editors), 1978 WILEY, London, 145-150		X		
BABEL, U. - Micromorphology of soil organic matter. in Soil components, 1975, vol. 1, chap. 7, pp. 369-473, Springer Verlag, N.Y.		X		
BAL, L. - Micromorphological analysis of soils, lower levels in the organization of organic soil materials. Soil Survey Papers, 1973, n° 6, Netherlands Soil Survey Institute, Wageningen.		X		
BAVER, L.D. - The effect of organic matter upon several physical properties of soils. Amer. Soc. Agron. J., 1930, <u>22</u> : 703-708		X	X	
BLÖEMEN, G.M. - Calculation of hydraulic conductivities of soils from texture and organic matter content. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 1980, <u>143-5</u> : 581-605			X	
BOELTER, D.H. - Physical properties of peats as related to degree of decomposition. Proc. Soil Sci. Soc. Am., 1969, <u>33</u> : 606-609	X	X	X	X
BOIFFIN, J. - La dégradation des couches superficielles du sol sous l'action des pluies. Thèse, 1984, I.N.A.-P.G.		X		

	1	2	3	4
BRUCKERT, S. ; KILBERTIUS G. - Fractionnement et analyse des complexes organo-minéraux des sols bruns et chernozems. Plant & Soil, 1980, 57: 271-295		X		
CALHOUN, F.G. ; HAMMOND, L.C. ; CALDWELL, R.E. - Influence of particle size and organic matter on water retention in selected Florida Soils. Soil and Crop Science Soc. of Florida Proc., 1973, 32 : 111-113			X	
CHASSIN, P. - Etude des interactions montmorillonite calcique-Eau-Diols. Hydratation de complexes Montmorillonite-Diols. Thèse Paris VI, 1975, n° C.N.R.S. A.O. 11.909		X	X	
CHASSIN, P. - Influence des substances humiques sur les propriétés des argiles - Apports des études sur modèles. Science du Sol, Bul. de l'A.F.E.S., 1976, n° 2		X	X	
CHASSIN, P. ; LE BERRE, B. ; NAKAYA, N. - Influence des substances humiques sur les propriétés des argiles. Importance du mode de préparation sur les propriétés d'hydratation des associations montmorillonite-acides humiques. C.R. Acad. Sc. Paris, 1977, t. 284, Série D, 1659-1660		X		
CHASSIN, P. ; LE BERRE, B. ; NAKAYA, N. - Influence des substances humiques sur les propriétés des argiles - IV. Hydratation des associations montmorillonite-acides humiques. Clay Minerals, 1978, 13, 1-16			X	
CHENU, C. - Etude du rôle des polysaccharides dans la micro organisation des argiles. 1982, D.E.A. PARIS VII-I.N.A.-P.G.	X	X		
CHESCHIRE, M.V. - Nature and Origine of Carbohydrates in soil. London Academic Press, 1979	X	X		
CLAPP, C.E. ; EMERSON, W.W. - The effect of periodate oxidation on the strength of soil crumbs I Qualitative studies - II Quantitative studies. Soil Sci. of America Proc., 1965, 29 : 127-130/130-134	X	X		
COULIBALY, G. - Influence des Lipides sur les propriétés physiques des sols. Formation de complexes argilo-lipidiques. 1984, These POITIERS	X	X		
DAVIDSON, S.E. ; PAGE, J.R. - Factors influencing swelling and shrinking in soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 1956, 20: 320-324				X

	1	2	3	4
DEBRUCK, J. - The variation of soil fertility parameters during long-term manuring with straw. <i>Landwirtschaftliche Forshung</i> , 1974, Supplement 30, part 2 : 167-177.				X
DE LEENHER, DE BOODT - Aggregate stability determination by the change in mean weight diameter. West-European methods for soil structure determination. State Faculty of Agricultural Sciences, 1967, GHENT (Belgium) VI, 28		X		
EDWARDS, A.P. ; BREMNER, J.M. - Microaggregates in soils. <i>J. of Soil Sci.</i> , 1967, 18 : 64-73		X		
EMERSON, W.W. - The effect of polymer on the swelling on montmorillonite. <i>J. of Soil Sci.</i> , 1963, <u>14</u> : 52-63	X			X
FLAIG, M. - Contributions of Biochimistry of soil organic matter to soil conditioning. <i>Mededelingen van de Faculteit Landbouwwetenschappen Rijksuniversiteit, Gent</i> , 1976, 41,1 : 23-39	X	X		
FOSTER, R.C. - Ultramicromorphology of some South-Australian Soils. in <i>Modification of Soil Structure</i> , EMERSON ; BOND ; DEXTER (Editors), 1978, WILEY, London, 103-109		X		
FRANKLIN, A.J. ; OROZCO, L.F. ; SEMRAU, R. - Compaction and strength of slightly organic soils. <i>ASCE J. Soil Mech. Found. Div.</i> , 99.SM7, Jul 1973, n° 9873 : 541-557	X			X
FREE, G.R. ; LAMB, J. Jr ; CERLETON, E.A. - Compactability of certain soils as related to organic matter and erosion. <i>J. Am. Soc. Agron.</i> , 1947, 39 : 1068				X
GRAFFIN, P. - Etude intégrée de la décomposition d'apports organiques dans le sol. Evolution du Carbone et de l'Azote, liaison à la fraction minérale, modification des propriétés physiques. <i>Ann. agron.</i> , 1971, <u>22</u> : 213-239	X	X		
GREENLAND, D.J. - Interaction between clays and organic compounds in soils. 1. Mechanism of interaction between clays and defined organic compounds. 2. Adsorption of organic compounds and its effect on soil properties. <i>Soils Fertil.</i> , 1965, <u>28</u> : 415-425/521-532		X	X	
GRIERSON, I.T. ; KIJNE, J.W. ; GREENLAND, D.J. - Changes in some physical properties of red-brown earthe of different texture associated with increasing content of organic matter. <i>S. Aust. Dep. Agr. Exp. Rec.</i> , 1972, <u>6</u> : 16-22		X		

	1	2	3	4
GUCKERT, A. - Contribution à l'étude des polysaccharides dans les sols et de leur rôle dans les phénomènes d'agrégation. 1973, Thèse Doctorat NANCY, 129 p.	X	X		
GUERIF, J. ; FAURE, A. - Rôle des matières organiques sur le comportement des sols au compactage. 1. Etude statistique Ann. agron., 1979, 30 : 387-399				X
GUERIF, J. - Rôle des matières organiques sur le comportement des sols au compactage. 2. Matières organiques Libres et liées. Ann. agron., 1980, 31 : 469-480	X			X
GUERIF, J. - Mechanical properties of straw. The effect on the soil. Straw Decay and its effect on disposal and utilization Symposium on straw decay ; Hatfield (U.K.), 1979/04/10-11, Wiley, Chichester (U.K.), 73-81	X			X
GUERIF, J. ; MONNIER, G. - Effets des pailles sur les propriétés mécaniques des sols. Rapport de contrat C.E.E. : "Production de paille de céréales comme source de combustible et de produits associés". Protection des sols en régime d'exportation maximale de Matière organique. 1980, INRA, PARIS				X
GUERIF, J. - Effect of cultivation on organic matter status and compaction behaviour of soil. 1982, 9th Conference of ISTRO, OSIJECK, YUG. ISTRO Wageningen, 207-212		X		X
GUERIF, J. ; MONNIER, G. - Evolution de la fertilité physique des sols dans les systèmes de cultures fourragères de l'Ouest de la France. Forum des Fourrages de l'Ouest, RENNES, 1982/12/23-24, 113-132	X	X		X
GUERIF, J. - Modification de la répartition et de l'évolution des matières organiques par la simplification du travail du sol conséquences sur quelques propriétés physiques. Journées d'étude Rotations céréalières intensives, PARIS, 1983/05/16-17, ONIC, Paris		X		
HAMBLIN, A.P. ; DAVIES, D.B. - Influence of Organic Matter on the physical properties of some East Anglian soils of high silt content. J. of Soil Sci., 1977, 28-1 : 11-22	X	X	X	
HAMBLIN, A.P. ; GREENLAND, D.J. - Effects of organic constituents and complex metal ions on aggregates stability of some East Anglian soils. J. of Soil Sci., 1977, 28-3 : 410-416		X		

	1	2	3	4
HAMBLIN, A.P. - Structural Features of aggregates in some East Anglian Silt Soils. J. of Soil Sci., 1977, <u>28</u> -1 : 23-28	X	X		
HARTGE, K.H. - Organic matter contribution to stability of soil structure. in Soil conditioners, 1975, Soil Sci. Soc. of America, Inc 677 South Segoe Road, Madison, Wis. 53711 USA		X		
HARTMANN, R. - The moisture characteristics of Pleistocene deposits in the Vlaam Valley region Mededelingen Faculteit Landbouwwetenschappen, 1973			X	
HARTMANN, R. - The influence of soil conditioners on the liquid-solid contact angles of sands and silt loams. Soil Sci. 1976t, 121-6 : 346-352	X		X	
HAYES, M.H.B. ; SWIFT, R.S. - Organic colloids and organo-mineral Association in the Nature and properties of soil colloïd surfaces. Bull. of the Int. Soc. of Soil Sci., 1981, n° 60: 67-74	X	X		
HEINONEN, R. - Humus supply, soil structure and water relations. Landwirtschaftlich Forschung, 1974, supplement 30, part 2, 123-126			X	
HOLLIS, J.M. ; JONES, R.J.A. ; PALMER, R.C. - The effects of organic matter and particle size on the water retention properties of some soils in the west midlands of England. Geoderma, 1977, 17 : 225-238			X	
HOLTZ, R.D. ; KRIZECK, R.J. - Properties of slightly organic topsoils. ASCE J. Constr. Div. <u>96</u> , n° CO1, June 1970, 7358, 29-43	X			X
ILNICKI, P. - Soil water hysteresis in organic soils. Zeitschrift fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde, 1982, 145,4 : 363-374			X	
IRWIN, R.W. - Subsidence of cultivated organic soil in Ontario. ASCE J. Irrig. Drain. Div. v103, n° 2, June 1977 197-205			X	X
JAMISON, V.C. - The effect of some soil conditioners on friability and compactibility of soils. Proc. Soil Sci. Soc. Amer., 1954, 18:391-394				X
KIMPE, C.R. de ; BERNIER-CARDOU, M. ; JOLICŒUR, P. - Compaction and settling of Quebec soils in relation to their soil water properties. Canadian J. of Soil Sci., 1982, 62-1 : 165-175			X	X

	1	2	3	4
KORSCHENS, M. ; GREILICH, J. - Relationships between organic matter particle density and bulk density of soil. Archiv fur Acker - und Pflanzenbau und Bodenkunde, 1981, 25-9 : 519-523	X	X		
KRIZEK, R.J. ; GIGER, M.W. ; HUMMEL, P.L. - Organic Content and Engineering behaviour of typical maintenance dredgings. Southeast Asian conf on Soil Eng 4th, Proc Kuala Lumpur Malays Apr 7-10 1975, 6-3 15, Publ by Inst. of Eng. Malays Kuala Lumpur	X			X
KUIPERS, H. - Preliminary remarks on porosity of soil aggregates in air-dry state and at pF 2. Netherland J. Agric. Sci., 1967, 9/3 : 168-173		X		
MARTIN, J.P. - Décomposition and Binding action of Polysaccharides in Soil. Soil Biology an Biochemistry, 1971, 3 : 33-41		X		
MATSUO, Shin Ishiro ; KAMON, Masashi - Engineering properties of inferior clayey soil material and its improvement. Aust. Conf. on Eng Mater 1st Proc. Sydney Aug 26-28 1974, 385-410, Publ : Univ of NSW, Sch of Civ Eng Kensington Australia				X
Mc GHIE, D.A. ; POSNER, A.M. - The effect of plant top material on the water repellence of fired sands and water repellent soils. Australian Journal of Agric. Research, 1981, 32-4 : 609-620			X	
MILLER, D.E. ; AARSTAD, J.S. - Furrow infiltration rates as affected by incorporation of straw on furrow cultivation Proc Soil Sci Soc Am, 1971, 35 : 492-495			X	
MONNIER, G. - Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse, Fac des Sciences, PARIS, 1965	X	X		
MONNIER, G. ; KONAN, L. - Influence des conditions de séchage des terres sur leur stabilité structurale. Ann. agron., 1968, 19/5 : 541-551	X	X		
MONNIER, G. ; STENGEL, P. ; BODET, J.M. - Conséquence de la répartition des matières organiques sur le comportement du sol. C.R. Colloque "Simplification du travail du sol en production céréalière", ITCF, PARIS, 1976		X		

1 2 3 4

MONNIER, G. - Facteurs biologiques de la structuration des sols. INRA, Dept. de Science du Sol : Séminaire Biologie des Sols, DIJON, 1980		X		
MONNIER, G. ; STENGEL, P. ; GUERIF, J. - Recherche des critères de la fertilité physique du sol et de son évolution en fonction du système de culture. Séminaire C.E.E.-Agrimed "Evolution du niveau de fertilité des sols dans différents systèmes de culture. Critères pour mesurer cette fertilité". BARI (Italie) 1981/09/28-30, 35-52		X		X
MONNIER, G. - Les recherches sur la stabilité structurale des sols : exemples d'application. 1984, Livre Jubilaire du Cinquantième de l'Association Française pour l'Étude des Sols 293-297	X	X		
MORACHAN, Y.B. ; MOLDENHAUER, W.C. ; LARSON, W.E. - Effects of increasing amounts of organic residues on continuous corn. 1. Yields and Soil Physical Properties. Agronomy Journal, Marsh 1972, 64 : 199-203.		X	X	X
MURALI, V. ; MURTI, G.S.R.K. ; SINHA, A.K. - Statistical relationships of water flow parameters with soil matrix and porosity properties. J. of Hydrology, Amsterdam, 1979, 41, 3/4, 371-376			X	
NAKAYA, N. ; NOMOTURA, S. ; YOKOI, H. - Some aspects on water repellency of soils. Soil Sci. and Plant Nutrition, 1977, 23-4 : 409-415		X	X	
NATH, J. ; SARKAR, M.C. ; SINGH, H. - Dynamics of the effect of F.Y.M. on physical properties and organic build up of soil. Haryana Agric. Univ. J. of Research, 1972, 2-3 : 165-168		X		
ODELL, R.T. ; THORNBURN, T.H. ; MCKENZIE, L.J. - Relationships of Atterberg limits to some other properties of Illinois Soils. Proc. of Soil Sci. Soc. of America, 24:287-300				X
PAGE, E.R. - The effect of polyvinylalcohol on the crust strength of silty soils. J. of Soil Sci., 1979, 30-4 : 643-651				X
PAGLIAI, M. ; GUIDI, G. ; PETRUZZELI, G. - Effect of molecular weight on Dextran-Soil interaction. in Modification of Soil Structure, EMERSON ; BOND ; DEXTER (Editors), 1978, WILEY, London, 175-180		X		

	1	2	3	4
POSKITT, T.J. - Consolidation of clay and peat with variable properties. ASCE J. Soil Mech. Found. Div. v97. n SM6 June 1971 pap. 8178 : 841-880				X
PUSH, R. - Influence of organic matter on the geotechnical properties of clays. National Swedish Building Research, Stockholm 011 : 1973, 64 p.	X	X		X
QUASTEL, J.H. ; WEBLEY, D.M. - The effects of the addition to soil of alginic acid and other form of organic matter on soil aeration.	X	X	X	
RAWLS, W.J. - Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. Soil Sci. Feb 1983, 135/2 : 123-125		X		
REMY, J.C. - Influence de la constitution physique du sol sur leur comportement mécanique ; signification des limites d'Atterberg en matière de travail du sol. Ann. agron., 1971, 22/3 : 267-290				X
ROBERT, M. ; SCHMIT, J. - Rôle d'un exopolysaccharide (le xanthane) dans les associations organo minérales. C.R. Acad. Sc. Paris, 1982, t. 294, série II : 1031-1036		X		
ROD, P. ; GUILLET, C. - La matière organique en rapport avec ses propriétés physiques. Rev. Suisse Agric. 2(6) : 131-136		X		
ROGOWSKI, A.S. ; MOLDENHAUER, W.C. ; DON KIRKHAM, - Rupture parameters of soil aggregates. Soil Sci Soc of Am Proc., 1968, 32/5 : 720-724		X		X
ROGOWSKI, A.S. ; DON KIRKHAM, - Strength of soil aggregates : influence of size, density and clay and organic matter content. Med. Fac. Landbouww, Rijksuniv. Gent A1/1, 1976		X		X
RUSSEL, M.B. ; KLUTE, A. ; JACOB, W.C. - Further studies on the effect of long-time organic matter additions on the physical properties of Sassafra Silt-loam. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 16 : 156-159, 1952		X	X	X
SANDS, R. ; GREACEN, E.L. ; GERARD, C.J. - Compaction of sandy soils in Radiata Pine forests. I a penetrometer study.		X	X	X

1 2 3 4

SAINI, G.R. - Organic matter as a measure of bulk density of soils. Nature, 1966, 210/5042 : 1295-1296				
SAINI, G.R. - Properties of water stable aggregates. Relationship of organic matter to particle and bulk density of soil. Diss. Abstr 21/3220, 1961		X		
SCHMIDT, N.O. - A study of the isolation of organic matter as a variable affecting properties of a soil. Thesis (Ph.D) Univ. Illinois, Urbana, 1965.				X
SEQUI, P. ; GIOVANNINI, G. - Organic matter and the soil structure - Sostanza organica e struttura del terreno. Ital Agric Juin 1975, 112/6 : 65-83		X		
SHARMA, D.P. ; NATH, J. - Soil moisture retention characteristics for Hissar Majar command aeria. Haryana Agricultural Univ. Journal of research, 1979, 9/1 : 43-52			X	
SKEMPTON, A.W. ; PETLEY, D.J. - Ignition loss and other properties of peats and clays from Avonmouth, King's lynn and Crauberry Moss. Geotechnique, 1970, 20: 343-356				X
SOANE, B.D. ; CAMPBELL, D.J. ; HERKES, S.M. - The characterization of some Scottish arable top-soils by agricultural and engineering methods. J of Soil Sci, 1972, 23-93				X
STENGEL, P. ; DOUGLAS, J.T. ; GUERIF, J. ; GOSS, M.J. ; MONNIER, G. ; CANNEL, R.Q. - Factors influencing some properties of soils in relation to their suitability for direct drilling Soil and Tillage Res., 1984, 4 : 35-53		X		X
STRIKLING, E. - The effect of soy beans on volume weight and water stability of aggregates. Soil Sci Soc Amer. Proc., 1950, 15 :30-33		X		
TAYLOR, H.M. ; HENDERSON, D.W. - Some effects of organic additives on compressibility of yolo silt loam soil. Soil Sci., 1959, 88 : 101-106				X
THENG, B.K.G. - Formation of Properties of Clay-Polymer Complexes. 1979, ELSEVIER, Amsterdam		X		
THENG, B.K.G. ; GREENLAND, D.J. ; QUIRK, J.P. - The swelling in water of complexes of Montmorillonite with polyvinyl alcohol. Aust. J. Soil. Res., 1967, 5 : 69-75				X

	1	2	3	4
TIETJEN, C. ; SAUERLANDT, W. - Relation between humus content and volume weight of field soils after the application of stable manure, compost and straw. Landwirtschaftliche Forshung, 1974, supp. 30 part 2 : 131-136		X		
TISDALL, J.M. ; OADES, J.M. - Organic matter and water-stable aggregates in soils. J. of Soil Science, 1982, 33, 141-163	X	X		
TSCHAPEK, M. ; POZZOARDIZI, J. ; BUSSETI (de), S.G. - Wettability of humic acid and its salts. Zeitschrift fur Pflanzenernahrung and Bodenkunde, 1973, 135/1 : 16-31			X	
TURCHENEK, L.W. ; OADES, J.M. - Organomineral Particles in Soils. in Modification of Soil Structure, EMERSON ; BOND ; DEXTER (Editors), 1978, WILEY, London, 137-144		X		
UNGER, P.W. - Surface soil physical properties after 36 years of cropping to winter wheat. Soil Sci Soc of America J. 1982, 46/4 : 796-801		X		
VINCENTE, M.A. ; ROBERT, M. - Rôle des Acides fulviques et humiques dans la microagrégation des particules argileuses. C.A. Acad. Sc. PARIS, 1981, t. 292, série II : 1161-1166		X		
WEBBER, J. - The influence of bulky organic materials and soil conditioners on soil properties and crop yields.		X	X	X
WILLIAMS, B.G. ; GREENLAND, D.J. ; QUIRK, J.P. - The tensile strength of soil cores containing polyvinyl alcohol. Aust. J. Soil Res., 1967, 5 : 85-92.	X			X
YAMANOUCHI, T. ; YASUHARA, K. - Secondary compression of organic soils. Soil Found 15/1 : 69-79, Mar 1975				X
CALVET, R. ; CHASSIN, P. - Complexes organiques des argiles : mécanismes de formation, méthodes d'étude et applications. Bulletin du Groupe Français des Argiles, 1973, XXV-2:87-114	X	X		
CHASSIN, P. ; LE BERRE, B. ; NAKAYA, N. - Influence des substances humiques sur les propriétés des argiles. IV- Interprétation des propriétés d'hydratation des andosols et des sols sablo-humifères. Science du Sol, 1978, 3:155-166			X	