

**UNIVERSITE DE NANCY I**

**UNIVERSITE DE FRANCHE COMTE**

**INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE  
PARIS-GRIGNON**

**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE AGRONOMIQUE DE RENNES**

**D.E.A. DE PEDOLOGIE**

**" LES SOLS DANS LES ECOSYSTEMES CONTINENTAUX "**

**Georges-Henri SALA**

**COMPORTEMENT DE MASSIFS D'AGREGATS SOUS CONTRAINTE  
HYDRIQUE , PUIS OEDOMETRIQUE**

**Application à la Kaolinite de Saint-Austell et à l'horizon B du sol de Versailles**

**1990 - 1991**

**Université de Nancy I**

**Station de Science du Sol  
INRA Versailles**

## **PREAMBULE**

*Ce DEA n'aurait pas vu le jour sans la convergence de circonstances rendues favorables par un certain nombre de personnalités dont deux des qualités, et pas des moindres, sont la compréhension d'autrui et un dévouement sans limites.*

*Elles sont nombreuses et se reconnaîtront certainement, qu'elles fassent partie (responsables, enseignants mais aussi environnement) du DEA, qu'elles appartiennent à l'ORSTOM (Commission Scientifique d'Hydrologie-Pédologie, Département Milieux et Activités Agricoles, UR 3D et aussi quelques autres) ou qu'elles travaillent à la Station de Science du sol de l'INRA de Versailles qui a bien voulu m'accueillir. J'ai trouvé dans cette dernière efficacité et compétences, disponibilité de tous les instants, encouragements dans les moments difficiles ou de doute, chaleur humaine. Je dois toutefois une reconnaissance particulière à Daniel TESSIER qui a encadré ce travail et qui m'a accompagné dans toutes les étapes de sa réalisation.*

*Grâce à toutes et tous, j'ai pu commencer à réapprendre ma spécialité d'origine après presque une dizaine d'années d'interruption.*

*Mais tout ceci n'a aussi pu se réaliser que grâce au soutien du groupe familial tout entier qui m'entoure, et en particulier à un certain nombre de sacrifices consentis par Evelyne, Eric, Stéphan et Emmanuel pour que j'arrive, dans les meilleures conditions possibles, au bout de cette entreprise.*

# SOMMAIRE

## CONVENTIONS

## INTRODUCTION

### I - GENERALITES : RAPPELS SUR L'ETAT ENERGETIQUE DE L'EAU DANS LE SOL ET SUR LES CONTRAINTES DEVELOPPEES

- 11 - Etat énergétique de l'eau dans le sol
  - 12 - Répartition des contraintes au sein d'un matériau
  - 13 - Caractérisation de l'état de l'eau
  - 14 - Contraintes développées dans les sols et domaine d'étude
- Conclusion

### II - MATERIAUX, METHODES ET APPAREILLAGES UTILISES

- 21 - Les matériaux argileux : généralités
  - 22 - Matériaux étudiés
  - 23 - Forme des matériaux étudiés
  - 24 - Fixation de l'état de contrainte et étude des échantillons
  - 25 - Mesures effectuées et présentation des résultats
- Conclusion

### III - PROBLEMES METHODOLOGIQUES : ANALYSE ET PROPOSITIONS

- 31 - Etablissement de la contrainte hydrique initiale
  - 32 - Mesure de la teneur en eau des échantillons à chaque étape de la procédure
  - 33 - Traitement des données
- Conclusion

### IV - COMPORTEMENT DES MATERIAUX LORS DE LA FIXATION DE L'ETAT HYDRIQUE : HUMECTATION, DESSICATION SANS CONTRAINTE MECANIQUE

- 41 - Etude de l'humectation des échantillons
  - 42 - Etude de la déshydratation des échantillons par application de contraintes hydriques depuis  $pF = 0$
- Conclusion

### V - COMPORTEMENT DES MATERIAUX SOUS COMPRESSION OEDOMETRIQUE

- 51 - Comportement hydrique des matériaux soumis à une contrainte de type oedométrique
  - 52 - Comportement volumique des matériaux soumis à une contrainte de type oedométrique
- Conclusion

## CONCLUSION GENERALE

## CONVENTIONS

### NOM DES MATERIAUX

Par convention, nous dénommerons les matériaux utilisés de la manière suivante, en tenant compte de leur mode de préparation et de la taille granulométrique des massifs d'agrégats:

Matériau :

K : Kaolinite de Saint-Austell

BV : Horizon B de Versailles

Options :

Taille des agrégats du massif :

0 : tri 0,1 - 0,5 mm

2 : taille inférieure à 2mm, limitée à 0,1 mm dans notre étude

Mode de séchage :

E : étuve à 105 °c

A : air, équilibre avec l'humidité relative ambiante

Exemples: K 0 E = Kaolinite 0,1-0,5 mm, séchée étuve

BV 2 A = B Versailles 2 mm, séché air

### ABREVIATIONS DES GRANDEURS

Pour les grandeurs utilisées dans ce mémoire, nous noterons :

VM : volume massique en cm<sup>3</sup>/g

VM<sub>t</sub> : VM total de l'échantillon

VM<sub>s</sub> : VM de solide

VM<sub>w</sub> : VM d'eau

VM<sub>a</sub> : VM d'air

VM<sub>v</sub> : VM de vides ou de pores

### NOM DES CONTRAINTES

Pour les notations abrégées de contraintes, nous appellerons :

PH : pression hydrique ou contrainte hydrique amenant l'échantillon à un certain état énergétique de l'eau qu'il contient; exprimée en Pascal ou bar (1 bar = 10<sup>5</sup>Pa), ou représentée par la notion de pF

PM : pression mécanique oedométrique ou contrainte mécanique appliquée à l'échantillon; exprimée en Pa

### NOTATIONS PARTICULIERES AUX GRAPHIQUES

En ce qui concerne les graphiques, traités sous logiciel CHART,

la notation  $10^5$  signifie  $10^5$   
                   cm<sup>3</sup>                  cm<sup>3</sup>

Pour les données statistiques, CHART donne

r = coefficient de corrélation

r<sup>2</sup>= coefficient de détermination (≠ carré de r)

## INTRODUCTION

*Le sol, au sens agronomique large, est la couche supérieure travaillée du sol pédologique. Cette couche représente l'interface entre l'atmosphère et la plante, lieu privilégié de l'action anthropique, de l'installation, de la levée et de la croissance des plantes et zone des plus importantes dans la circulation de l'eau, pouvant par ailleurs se fermer à cette circulation (encroûtement, érosion, tassement...).*

*Cette couche est plus fragmentée que la zone non travaillée par l'activité de la micro et de la méso-faune, par la présence d'un mulch, mais aussi par les pratiques culturales. Cette fragmentation fait aussi intervenir des changements au plan géochimique, par les apports/restitutions minéralo-organiques, comme des interventions de type mécanique, par les techniques culturales utilisées. La connaissance des inter-actions entre ces différents facteurs ne peut qu'entraîner une meilleure maîtrise de la production agricole et de la conservation du potentiel sol.*

*A côté des facteurs anthropiques, interviennent des facteurs liés à l'évolution des sols à long terme, qui s'expriment principalement dans la zone non travaillée du profil pédologique. De ce fait, l'arrangement des constituants est lié aux caractéristiques intrinsèques des sols (granulométrie, nature des argiles ...), mais aussi résulte de l'action des facteurs du milieu (climat, végétation ...).*

*Quelle que soit la façon dont on aborde le sol, aspects hydrauliques, problèmes de portance, enracinement des plantes, la permanence de l'espace poral, et par voie de conséquence d'une structure, est une des conditions indispensables de l'activité biologique sensu largo et d'une mise en valeur du sol.*

*A ce niveau, des séries de cycles humectation/dessiccation (répétitions plus ou moins lentes et plus ou moins poussées) ainsi qu'un certain nombre de contraintes mécaniques (actions courtes), peuvent être importantes et avoir des effets plus ou moins profonds ou prolongés.*

*Jusqu'à présent, les recherches sur les matériaux argileux ont, entre autres, porté sur leur comportement mécanique, aussi bien en Génie Civil qu'en Science des Sols. FAURE (1978), GRIMALDI (1981), GUERIF (1982) ont étudié la réorganisation des sols argileux sous l'influence de contraintes mécaniques, mais se sont principalement attachés à l'étude du comportement macroscopique; plus récemment, TESSIER (1978, 1984), CAMARA (1982), ont pu décrire le rôle des cycles de dessiccation et d'humectation sur la microstructure; enfin, AZZAOUÏ (1988) a étudié le rôle spécifique et simultané des grands types de contrainte sur le comportement macroscopique et la microstructure des principaux types de matériaux argileux.*

*Dans ces domaines, les connaissances ont été acquises sur les horizons B (BRUAND, 1985) dans le cadre d'études sur la pédogenèse. Mais sur un matériau de type massif d'agrégats, l'étude des comportements est plus complexe.*

*GRIMALDI (1981), FAURE (1978) ont appliqué des contraintes mécaniques par le test PROCTOR. Il s'agit d'un système dynamique dont le handicap principal est la difficulté de la mesure de l'énergie. Le principal objectif de ces études était de mettre en évidence des seuils de sensibilité au compactage.*

*Ici le but est d'obtenir des données qui permettront de comprendre le comportement de matériaux argileux et de faire une analyse du système en terme de réorganisation. Le rôle des contraintes hydriques puis des contraintes mécaniques, en les faisant varier dans des gammes d'énergie aussi larges que le permet l'appareillage, sera examiné. En cela, cette étude se différencie de celle de AZZAOUÏ (1988) qui, rappelons-le, a appliqué simultanément ces contraintes hydrique et mécanique sur les matériaux utilisés, mais se situe dans la droite ligne de la poursuite de ce*

travail. C'est ainsi que la forme du matériau sera semblable: le massif d'agrégats, et que l'appareillage sera celui mis au point par AZZAOUÏ (1988).

Comme nous le verrons, un certain nombre de problèmes méthodologiques sont apparus au cours de l'expérimentation, et nous serons amenés à proposer quelques solutions.

Il s'agira donc, ensuite, de fixer les potentiels de l'eau dans les matériaux : fixation des états initiaux, puis d'analyser leurs conséquences sur ceux-ci en termes comportementaux, et enfin d'appliquer sur chacun de ces états initiaux des contraintes mécaniques progressives en étudiant là aussi les effets comportementaux induits.

On obtiendra ainsi une analyse du comportement mécanique des matériaux en fonction de divers états énergétiques de l'eau.

## CHAPITRE I

# GENERALITES: RAPPELS SUR L'ETAT ENERGETIQUE DE L'EAU DANS LE SOL ET SUR LES CONTRAINTES DEVELOPPEES

*Les sols sont, dans la nature, soumis à différents types de contraintes qui peuvent s'exercer :*  
+ sur l'eau du sol (contraintes hydriques),  
+ sur le matériau lui-même pris dans sa globalité (contraintes mécaniques).

*Les effets de ces deux types de contraintes ne sont pas indépendants et jouent notamment sur l'état énergétique de l'eau ainsi que sur l'organisation de la phase solide*

## 11 - ETAT ENERGETIQUE DE L'EAU DANS LE SOL.

### 111 - Définition générale

C'est la variation de l'énergie potentielle de l'eau du sol entre deux points qui provoque son écoulement. Le mouvement de l'eau est généralement suffisamment lent pour qu'on puisse négliger l'énergie cinétique: l'eau est alors retenue par des forces diverses qui font que son potentiel diffère de celui de l'eau pure et libre. Le système de référence est celui de l'eau libre et pure à la pression atmosphérique, à une température donnée et à une position dans l'espace fixe et spécifiée.

Le potentiel total  $\Phi_t$  de l'eau est défini comme étant la somme des potentiels gravitaire  $\Phi_g$ , matriciel  $\Phi_m$  et osmotique  $\Phi_o$ :  $\Phi_t = \Phi_g + \Phi_m + \Phi_o$

Le pF, expression d'une différence d'énergie libre de l'eau basée sur la hauteur h (cm) d'une colonne d'eau au-dessus d'une nappe d'eau libre [pF = log h], est défini comme étant la somme du potentiel osmotique et du potentiel matriciel:  $pF = \Phi_m + \Phi_o$

Ces différents potentiels sont affectés d'un signe négatif quand le potentiel de l'eau du système considéré est plus faible que celui de l'état de référence.

### 112 - Composantes du potentiel total de l'eau

#### 1121 - Potentiel gravitaire

Le potentiel gravitaire de l'eau du sol est déterminé par rapport à la surface du sol. Ainsi le potentiel gravitaire de l'eau en un point situé à une profondeur de 10 cm par rapport à la surface du sol, prise comme plan de référence, peut être assimilé à une contrainte de  $10^3$  Pa.

Il faut donc remarquer que, dans toute étude au laboratoire d'un matériau de faible épaisseur, le potentiel gravitaire est très faible et peut être négligé.

#### 1122 - Le potentiel matriciel au sens large

Comme la notion de potentiel matriciel ne peut en toute rigueur être appliquée qu'à des systèmes parfaitement rigides, l'AISS (1976), BOURRIE et al. (1984) ont été amenés à définir la notion de potentiel matriciel au sens large.

Si on considère une mole d'eau, de volume  $V_w^\circ$ , l'énergie dépensée pour faire passer le volume molaire de la pression de référence  $P_0$  à la pression P correspond à la variation de l'enthalpie libre, soit:

$$\Delta G = \int_{P_0}^P V_w^\circ dP$$

Or  $V_w^\circ$  est constant puisque l'eau peut être considérée comme incompressible dans le domaine de pression considéré; d'où

$$\Delta G = V_w^\circ (P - P_0)$$

Si on se réfère à la pression de l'eau dans le système, on peut déduire que :

$$\Phi_m = V_w^\circ (P - P_0)$$

On peut aussi écrire (BOURRIE et PEDRO, 1979):  $\Phi_m = RT \ln a_w$   
où R = constante gaz parfaits, T = température en d°K,  $a_w$  = activité de l'eau.

Dans les sols qui peuvent être considérés comme rigides (sables par exemple), le potentiel matriciel est accessible en utilisant un tensiomètre. Dans le cas d'un matériau déformable (sols très argileux), on mesure un potentiel de pression qui inclut le potentiel matriciel et le poids de la colonne de matériau au-dessus du point de mesure considéré (overburden potential: AISS, 1976)

#### 1123 - Potentiel osmotique - Cas d'une solution libre

Il intervient à chaque fois que l'eau du sol est chargée en électrolytes et peut être déterminé par un abaissement de la pression de vapeur d'eau à la surface de la solution.

Il faut remarquer que le potentiel osmotique n'est pas directement fonction de la concentration du sel en présence mais est en relation avec la force ionique de la solution.

## 12 - REPARTITION DES CONTRAINTES AU SEIN D'UN MATERIAU

Dans les sols, le potentiel osmotique  $\Phi_0$  (lié à la force ionique des solutions) et le potentiel matriciel  $\Phi_m$  (en relation avec la géométrie du sol) peuvent être modifiés par une évaporation ou une dilution, en particulier d'une saison à l'autre. D'un autre côté, les changements de géométrie du sol sont aussi imputables à l'intervention de contraintes externes actuelles ou passées, de type mécanique au sens large, telles que le poids des couches géologiques, le poids du sol, les pressions exercées par les passages d'engins agricoles, les pressions de gonflement... . Comme le rôle de ces contraintes ne peut être considéré indépendamment des contraintes physico-chimiques, il faut donc aborder le problème de la répartition des contraintes.

### 121 - Rappels sur la théorie de TERZAGHI

Dans le sol à une profondeur déterminée, la pression qui s'exerce sur un élément de sol considéré n'est jamais négligeable. Si l'on admet en outre que le sol n'est pas parfaitement rigide, cela peut être à l'origine, à un moment donné, d'une déformation du matériau. Pour préciser le rôle des grands types de contrainte, il faut partir du cas le plus général, c'est à dire d'un sol constitué de trois phases : solide, liquide et gaz. Or, de nombreux auteurs ont montré qu'il n'est pas possible d'envisager cet ensemble comme un tout homogène auquel on pourrait appliquer une loi unique. C'est pourquoi on utilise la notion de contrainte effective développée par TERZAGHI (1927).

#### **1211 - Considérons le cas d'un sol saturé**

Dans ce matériau où la phase "air" est absente, la connaissance de la loi rhéologique de ce "mélange" nécessiterait la connaissance des lois de comportement suivantes:

- loi rhéologique du matériau solide,
- loi rhéologique de l'eau interstitielle,
- loi d'interaction solide/solide,
- loi d'interaction eau/solide.

Devant cet état de choses, TERZAGHI a eu l'idée simplificatrice de définir des contraintes et des déformations au lieu des forces de contact entre les éléments du solide et des déplacements de grains. Il déduit par un raisonnement théorique que:  $\sigma' = \sigma - u$

- où  $\sigma$  est la contrainte totale en un point du sol, géostatique ou due à une surcharge extérieure,
- $u$  est la pression interstitielle  $\Phi_m$  au sens large,
- $\sigma'$  est la contrainte effective, celle qui s'exerce sur la matrice du sol.

La variation du volume du sol ainsi que sa déformation (et aussi la force de cisaillement) ne dépendent pas de la contrainte totale, mais de la différence entre celle-ci et la pression interstitielle, c'est à dire de la contrainte effective. D'où son nom et son importance (BISHOP, 1959).

#### **1212 - Pour un sol comportant trois phases: sol-eau-air**

Il faut alors rajouter aux lois précédentes

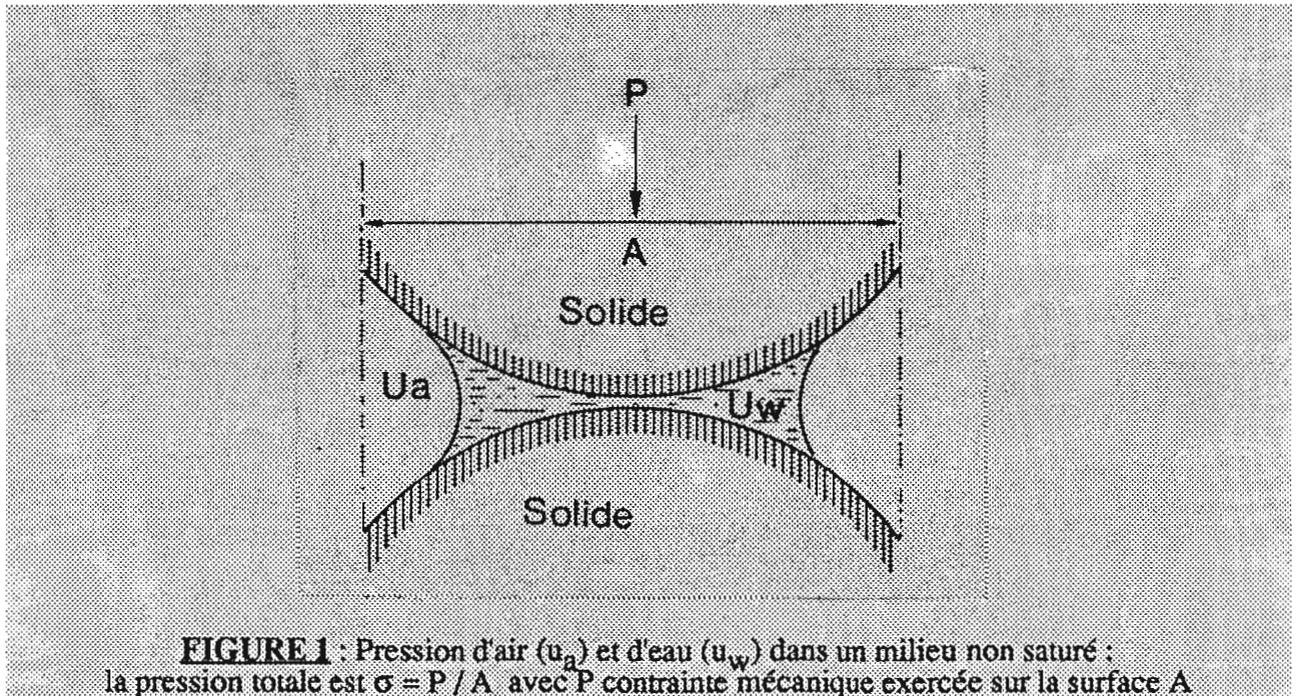
- loi rhéologique de l'air,
- loi d'interaction air/grains,
- loi d'interaction air/eau.

On se rend donc compte que la mise en évidence d'une loi rhéologique d'un milieu non saturé en eau pose un problème. Parmi les tentatives les plus intéressantes, on citera la formule de BISHOP (BISHOP et BLIGHT, 1963) :  $\sigma' = \sigma - u_a + \chi (u_a - u_w)$

où  $u_a$  et  $u_w$  représentent respectivement la pression de l'air et la pression de l'eau (Cf. fig. 1)  
 $\chi$  est un coefficient empirique, qui dépend surtout du degré de saturation ( $V_w / V_v$ )  
 Dans les cas extrêmes ( $\chi=1$  pour les sols secs et  $\chi=0$  pour les sols saturés), la formule de BISHOP se réduit à celle de TERZAGHI.

### 122 - Applications

Il sera fait état ici, tout d'abord de la valeur de la contrainte effective dans des cas simples, avant d'envisager les conséquences de la variation de l'état des contraintes.



**FIGURE 1 :** Pression d'air ( $u_a$ ) et d'eau ( $u_w$ ) dans un milieu non saturé : la pression totale est  $\sigma = P/A$  avec  $P$  contrainte mécanique exercée sur la surface  $A$

### 1221 - Valeurs de la contrainte effective dans les principaux cas.

Appliquons sur un sol une contrainte mécanique  $\sigma$ . A l'équilibre, avec cette contrainte et en se plaçant dans les conditions où l'échantillon draine librement, la pression de l'eau de l'échantillon est à la pression atmosphérique. Par conséquent, la pression interstitielle est nulle et nous avons  $\sigma' = \sigma$ . Si l'élément de sol se trouve au-dessous de la surface libre de la nappe phréatique à une cote  $z$ , nous avons :  $u = \gamma_w z$  avec  $\gamma_w$  densité du fluide. Donc  $\sigma = \sigma' - \gamma_w z$ .

Considérons maintenant que le sol se trouve au-dessus de la nappe phréatique à une cote  $z$ , celui-ci peut être saturé, notamment si les pores sont de petite taille, en raison des phénomènes de capillarité et de surface. Dans ce cas, la pression interstitielle est négative et égale à  $u = -\gamma_w z$ . Par conséquent  $\sigma' = \sigma + \gamma_w z$ .

### 1222 - Changement de l'état de contraintes et conséquences

Considérons un élément de sol saturé non drainé ne supportant aucune charge. Nous avons dans ce cas  $u = \sigma = \sigma' = 0$ . Appliquons alors une charge sur ce sol. Toute la charge est supportée par la solution, de sorte que  $\sigma' = 0$  et  $u = \sigma$ .

Si maintenant on supprime la charge, un phénomène inverse se produit et immédiatement  $u = -\sigma$  et  $\sigma' = \sigma$  et, à l'équilibre,  $\sigma' = 0$  et  $u = 0$ , étant supposé que le sol est parfaitement élastique (PARCEVEAUX, 1980).

Ainsi la consolidation correspond à une diminution de la pression interstitielle ( $u$ ) sous l'influence d'une contrainte mécanique croissante jusqu'à son annulation; alors que le gonflement exprime une diminution de la succion ( $-u$ ) jusqu'à son annulation consécutive à l'arrivée d'eau.

## 13 - CARACTERISATION DE L'ETAT DE L'EAU

### 131 - Aspect général

Appliquons une contrainte mécanique donnée sur un sol saturé en assurant le drainage. Quelle que soit la valeur de cette contrainte, et à l'équilibre, la solution interstitielle est à la pression atmosphérique et, par conséquent, son potentiel matriciel est nul. Ainsi, lorsqu'une contrainte mécanique, quelle que soit sa valeur, est appliquée dans le domaine saturé et si la pression interstitielle est nulle, l'activité de l'eau pure reste égale à l'unité. En revanche, si l'on fait

varier la pression interstitielle (par une succion ou une pression de gaz), le potentiel matriciel de l'eau change. Il en est de même de l'activité de l'eau  $a_w$  (cf. tableau 1).

**TABLEAU 1** : Niveaux énergétiques et modes d'expression des différents états de l'eau dans le sol, relation avec la pression externe appliquée et taille maximale des pores correspondante

PRESSION		pF	$a_w$	Taille max. des pores $\mu\text{m}$
Pascals	Bars			
$10^2$	0,001	0	1	
$10^3$	0,01	1	0,999993	150
$10^4$	0,1	2	0,99993	15
$3 \cdot 10^4$	0,3	2,5		
$10^5$	1	3	0,9993	1,5
$10^6$	10	4	0,993	0,15
$1,58 \cdot 10^6$	15,8	4,2	0,98888	
$10^7$	100	5	0,927	0,015
$10^8$	1000	6	0,484	0,0015
$10^9$	10000	7		0,00015

L'état de l'eau dans un sol peut donc être, pour une même contrainte totale, très différent selon le type de contrainte appliqué au sol. Il s'agit donc de comprendre le comportement des sols en fonction de l'état de l'eau, lui-même en fonction du type de contrainte appliquée.

### 132 - Rôle de l'histoire hydrique

Plusieurs auteurs ont montré que l'état hydrique et l'organisation d'un matériau à un potentiel d'eau fixé peuvent être différents selon que l'on est en adsorption ou en désorption d'eau. En outre, il est connu qu'en soumettant les matériaux argileux à des valeurs extrêmes du potentiel de l'eau, on peut modifier complètement leur organisation et leur comportement. En outre, TESSIER (1984) a montré, en réhumectant un échantillon sec préparé à un potentiel donné, directement ou par étapes, que le gradient de potentiel jouait un rôle majeur.

Tout ceci permet de conclure que **les matériaux naturels possèdent une histoire hydrique qu'il convient de définir et dont il faut tenir compte.**

## 14 - CONTRAINTES DEVELOPPEES DANS LES SOLS ET DOMAINE

### D'ETUDE

Dans ce travail qui vise à mieux comprendre le comportement des sols, **il est important de manipuler dans le domaine des valeurs de contraintes rencontrées dans le sol, quelles qu'elles soient, afin que les expérimentations aient un sens par rapport au milieu naturel.**

### 141 - Valeurs des composantes du potentiel de l'eau

Si, dans les sols, le potentiel gravitaire ne peut être négligé, ce n'est pas le cas dans les expérimentations au laboratoire sur des échantillons de faible épaisseur.

Le potentiel matriciel est très variable: de quelques centaines de Pascals (sols engorgés) à environ  $-10^5$  kPa (pF = 6) pour des surfaces de sols sous climat à saison sèche marquée et longue.

Le potentiel osmotique n'interviendra pas dans notre expérimentation.

## **142 - Valeurs des contraintes mécaniques**

Elles peuvent être de nature très différente :

- contraintes géostatiques ou pédostatiques: c'est l'action due au poids des couches géologiques ou au poids des horizons pédologiques (overbuden potential). Pour un sol de densité apparente de 2, la pression exercée à 1m de profondeur est voisine de 20 kPa;
- pressions de gonflement (vertisols par exemple) qui peuvent être de l'ordre de 5000 kPa;
- passages d'animaux: quelques centaines de kPa pour des bovins;
- roulage d'engins agricoles: aux environs de quelques milliers de kPa.

Les contraintes mécaniques exercées sur le sol sont donc au maximum de quelques milliers de kPa.

## **CONCLUSION**

*Dans ce rappel de généralités sur les contraintes hydriques et mécaniques, ont donc été exposés les principaux paramètres qui jouent un rôle quant aux propriétés physiques et physico-chimiques du sol en tenant compte de son histoire énergétique.*

*Nous allons voir maintenant quels sont les matériaux que nous avons choisis et quelles sont les méthodes qui seront utilisées, tout en gardant l'optique fondamentale qui était la poursuite des travaux de AZZAOUÏ par une analyse plus décomposée des effets des contraintes appliquées à ces matériaux.*

## **CHAPITRE II :**

# **MATERIAUX, METHODES ET APPAREILLAGES UTILISES.**

*Les minéraux argileux sont parmi les constituants les plus actifs du sol, dans leurs propriétés tant chimiques que physiques. En fonction de la nature de l'argile, de sa minéralogie, des modifications dans l'organisation des argiles sont observées.*

*On devra aussi tenir compte de la présence d'eau dans les différents niveaux d'organisation de la phase solide, car ce qui existe en fait, ce sont des systèmes argile/eau.*

*C'est pourquoi notre étude s'intéressera dans un premier temps à un minéral argileux "pur", la kaolinite de Saint-Austell, que nous considérerons à deux niveaux de granulométrie, puis à un échantillon de sol, l'horizon B de Versailles. Nous les considérerons à deux états initiaux de préparation: séchage étuve ou séchage air. De cette façon, nous essayerons de passer d'un cas particulier (argile) à un cas plus général (sol).*

## **21 - LES MATERIAUX ARGILEUX : GENERALITES**

### **211 - Définition minéralogique**

Les minéraux argileux sont des silicates finement cristallisés en micro-cristaux, dont la principale catégorie est celle des phyllosilicates. Ils sont constitués de particules dont l'unité de base est le feuillet. Celui-ci est soit formé, dans le cas des phyllosilicates 2/1, par deux couches de tétraèdres  $\text{SiO}_4$  encadrant une couche octaédrique; soit composé, dans le cas de la kaolinite, d'une couche de tétraèdres  $\text{SiO}_4$  et d'une couche octaédrique, ce qui définit le feuillet 1/1. La totalité des cavités tétraédriques est remplie par des cations métalliques. Les cavités octaédriques peuvent être occupées partiellement (2/3) par des cations métalliques trivalents, d'où le nom de phyllosilicate dioctaédrique; ou bien totalement (3/3) par des cations divalents dans le cas des phyllosilicates trioctaédriques. Dans les argiles 2/1, la présence de substitutions isomorphiques dans la couche octaédrique est à l'origine d'une charge négative: le feuillet n'est donc plus neutre, mais chargé négativement.

### **212 - Organisation : système eau-argile**

Si le feuillet est l'unité de base des argiles, on est en réalité très rarement en présence de feuillets isolés : en fait, les argiles sont des particules formées par l'agencement de plusieurs feuillets, édifices de base de l'organisation de tout système eau/argile, à partir desquels on peut mettre en évidence l'organisation du matériau argileux.

Dans le cas de la kaolinite, ces particules sont généralement monocristallines et l'organisation générale est alors un amas de particules. Dans le cas des smectites, la micro-organisation se présente sous la forme d'un réseau continu par association face à face avec chevauchement latéral des particules initiales, ce qui empêche de les distinguer facilement.

### **213 - Conséquences sur les types de porosité et sur l'eau associée.**

La présence d'une charge électrique permanente de surface de feuillet va influencer les propriétés et l'organisation de l'eau à courte distance (eau adsorbée) et à plus grande distance: c'est la théorie de la double couche qui prévoit une influence de la surface s'exerçant sur une centaine d'Angström. D'autre part, les pores interparticulaires pouvant dépasser  $1\mu\text{m}$ , l'eau est alors retenue par des forces de tension interfaciale.

### **Conclusion**

Ces données relatives à la phase solide dans les matériaux argileux en relation avec les conditions du milieu (état énergétique de l'eau) montrent qu'il est essentiel de prendre en compte non seulement les types d'argiles des sols mais aussi les principaux types de contraintes qui s'exercent sur les sols pour étudier le comportement hydrique et l'organisation des matériaux.

Nous étudierons une kaolinite (charge nulle), et nous tenterons de changer d'échelle en étudiant un horizon B de sol à comportement de smectite (déficit de charge compensé par des cations échangeables).

## **22 - MATERIAUX ETUDIES: CARACTERISTIQUES**

### **221 - La Kaolinite de Saint-Austell**

Il s'agit d'un matériau purifié extrait du milieu naturel étudié précédemment par différents auteurs ( TESSIER, 1984; AZZAOU, 1988).

Ses principales caractéristiques sont les suivantes:

- Argile 1/1, dioctaédrique, de formule:  $\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$ ;
- Contient une petite quantité de muscovite. Le matériau brut, sous forme de poudre, se présente au MEB comme de très petits agrégats de taille  $< 10\mu\text{m}$  ;
- Charge de la maille = 0 ; CEC = 1 meq/100g = 3 meq/cm<sup>3</sup> ;

- Surface externe =  $12 \text{ m}^2/\text{g} = 32 \text{ cm}^2/10^4 \text{ cm}^3$
- Taille des cristallites : épaisseur =  $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ ,  
extension ab =  $1 \text{ }\mu\text{m}$  ;
- Forme de plaquettes pseudo-hexagonales;
- Masse volumique =  $2,63 \text{ g/cm}^3$  ;  
d'où un volume massique solide  $\text{VM}_s = 0,380 \text{ cm}^3/\text{g}$ .

### **222 - L'horizon B de Versailles**

C'est un horizon Bt d'un sol lessivé limoneux, développé sur les limons des plateaux du Bassin Parisien, à Versailles-La Minière, étudié par TESSIER (1975).

La diffraction aux rayons X montre que le mélange est constitué de 25% de kaolinite très désordonnée, de 25% d'une argile micacée (illite), de 35-40% de phyllites 2/1 expansibles (les tests montrent qu'il s'agit en réalité d'une smectite (2/3) associée à une vermiculite (1/3)), de 10% d'oxydes et d'hydroxydes de fer et d'une petite quantité de quartz. Les études microscopiques font apparaître des particules hexagonales de kaolinite et des agglomérats de particules primaires de  $0,3$  à  $2 \text{ }\mu\text{m}$  de diamètre, associées bord à bord et superposées face à face. D'après TESSIER (1975), il ne semble pas y avoir de différences morphologiques entre illite et argiles gonflantes de l'échantillon. Les oxydes de fer apparaissent sous forme de granules plus ou moins sphériques de  $0,1 \text{ }\mu\text{m}$ , ou en recouvrement des faces 001 des particules argileuses.

La CEC globale de l'argile est de l'ordre de  $53 \text{ meq}/100\text{g}$ . En fait, le matériau se comporte plus comme des smectites des sols que des illites (TESSIER et al., 1991). La mesure de la surface externe par adsorption d'azote donne  $118 \text{ m}^2/\text{g}$ , l'ensemble constitué par les argiles gonflantes/argiles micacées possédant des particules primaires très minces, comparables à celles de l'illite, estimées avoir une épaisseur voisine de  $100 \text{ Angström}$ . La surface totale est environ  $367 \text{ m}^2/\text{g}$  et l'interne  $250 \text{ m}^2/\text{g}$ .

La densité réelle des argiles a été mesurée par TESSIER (1975) et est de  $2,81$ . D'où le volume massique solide des argiles du BV est  $\text{VM}_s = 0,377 \text{ cm}^3/\text{g}$ . Mais nous utilisons du matériau sol sans séparation de constituants ni granulométrique, ni minéralogique. Appliquant la même approche que TESSIER (1975), nous avons déterminé pour le matériau global un volume massique de solide  $\text{VM}_s = 0,396 \text{ cm}^3/\text{g}$ .

## **23 - FORME DES MATERIAUX ETUDIES**

La forme des matériaux utilisés dans ces trois cas sera le massif d'agrégats, homogène à l'échelle de l'arrangement des particules élémentaires, discontinu macroscopiquement.

Pour pouvoir interpréter les résultats du comportement hydrique d'un massif d'agrégats vis-à-vis des contraintes hydriques ou mécaniques, il est certain que l'état de départ doit être bien défini. Ceci concerne notamment le niveau de dessiccation initial, la taille des agrégats et leur distribution granulométrique qui jouent un rôle sur la porosité inter-agrégats (FIES, 1978).

### **231 - Définition des agrégats et conséquence de leur assemblage sur la porosité**

Pour que le spectre poral inter-agrégats soit aussi homogène que possible, la taille des agrégats doit être bien calibrée.

Un agrégat peut être défini comme étant le résultat de l'assemblage de particules de petite taille. Dans le sol, les particules peuvent rester en contact par différentes forces de cohésion qui tendent à maintenir une certaine stabilité de l'édifice. Dans le cas d'un agrégat, les forces qui tendent à détruire cet édifice peuvent être dues à des actions purement mécaniques, mais aussi à un changement de l'état de l'eau entraînant une diminution des forces de cohésion. Les agrégats disparaîtront donc si les forces de destruction deviennent supérieures aux forces de cohésion. Ainsi l'agrégat lui-même peut-il représenter une entité stable et homogène, non nécessairement rigide. En revanche, l'assemblage d'un massif d'agrégats constitue un milieu discontinu puisque les forces de cohésion inter-agrégats deviennent beaucoup plus faibles que les forces de cohésion intra-agrégat. Il en résulte donc, à première vue, qu'un massif d'agrégats présente deux grands types de porosité: un intra-agrégats et un inter-agrégats.

## **232 - Préparations**

### **2321 - La kaolinite**

Comme elle n'a qu'une faible charge de surface, les forces de cohésion inter-cristallites sont essentiellement assurées par la tension de l'eau. On a donc préparé, à partir de la poudre de gisement, une pâte argileuse homogène par agitation mécanique de la poudre dans l'eau permutée. La teneur en eau est alors suffisamment forte pour qu'on se trouve en désorption d'eau lors de l'application d'une contrainte hydrique très faible (1kPa). Cette pâte a été soit séchée à l'étuve à 105°C (équivalent de  $pF = 7$ , soit  $10^6$  kPa), soit séchée à l'air (équivalent de  $pF = 6$ , soit  $10^5$  kPa). Un broyage au mortier/pilon et un tamisage ont permis de séparer plusieurs tailles d'agrégats et d'obtenir des massifs d'agrégats calibrés. Nous avons choisi un massif d'agrégats calibrés 0,1-0,5mm, correspondant au massif le plus étudié par AZZAOUI (1988) et un massif d'agrégats de calibres mélangés 0,1 - 2mm, correspondant au type classique de l'échantillon de sol destiné aux analyses de laboratoire duquel on a retiré les fractions granulométriques les plus fines (< 0,1 mm).

### **2322 - Le B de Versailles**

Sans préparation préalable, les mottes pré-existantes ont été soit séchées à l'étuve, soit séchées à l'air, puis broyées au mortier/pilon et tamisées. Le massif d'agrégats choisis est celui à 0,1 - 2 mm, comme pour la kaolinite.

## **24 - FIXATION DE L'ETAT DE CONTRAINTE ET ETUDE DES ECHANTILLONS**

### **241 - Contraintes**

#### **2411 - Contrainte hydrique : potentiel matriciel**

Si l'on se réfère aux travaux de TESSIER (1984), on sait que dans toutes les argiles, une partie de l'eau est toujours retenue par des forces de type tension interfaciale.

Or, comme nous l'avons vu précédemment, dans une presse à membrane, la pression  $P$  de gaz appliquée peut être reliée au potentiel matriciel par la relation :

$$\Phi_m = \bar{V}_w^\sigma (P - P_0)$$

où  $\bar{V}_w^\sigma$  = volume molaire de l'eau, et  $P_0$  la pression de référence (en général 1 atm, soit 100 kPa).

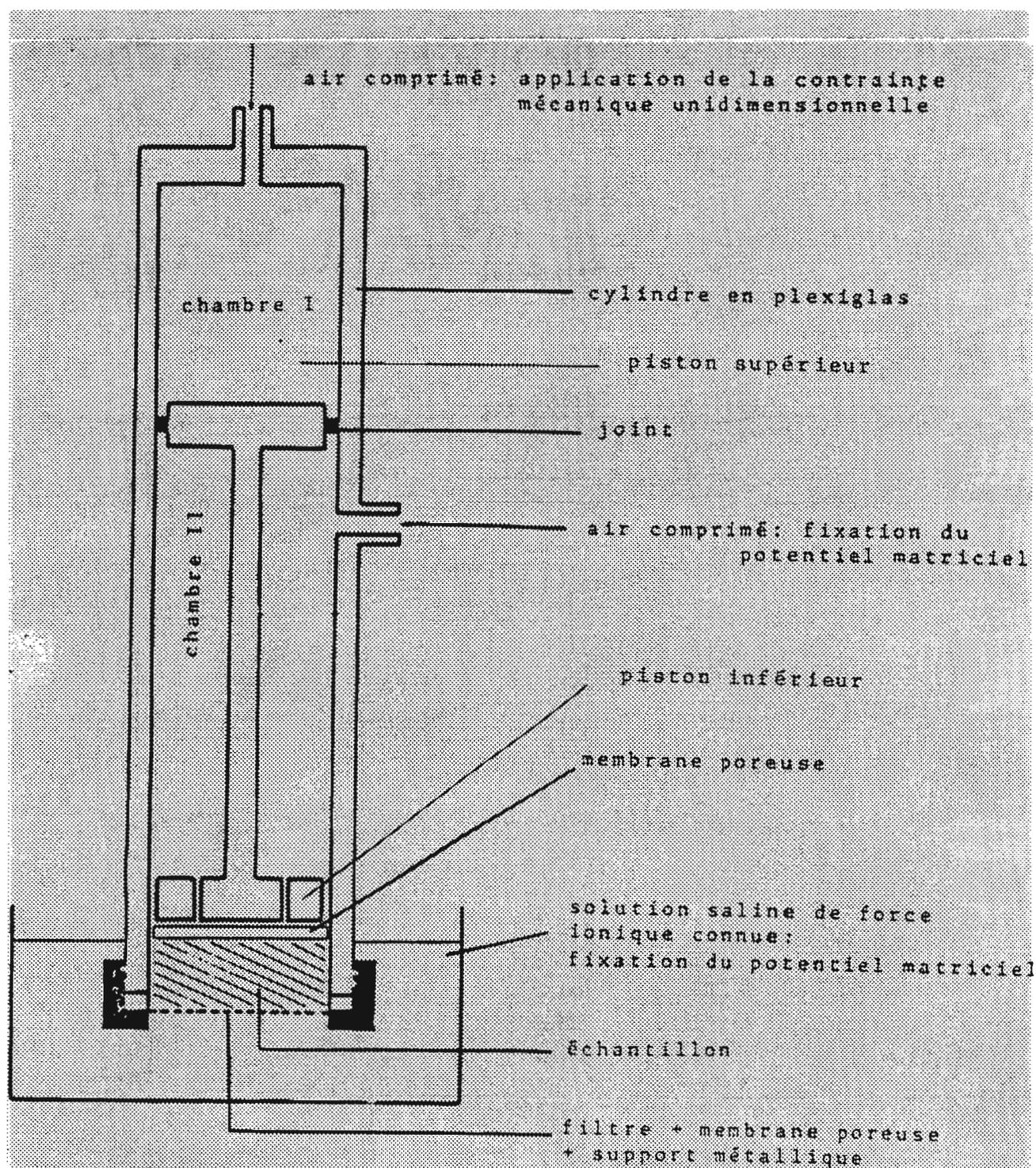
Dans le tableau 1, nous avons donné pour différentes valeurs de la pression appliquée, les équivalences entre divers modes de présentation des résultats.

#### **2412 - Contrainte mécanique**

Nous l'avons choisie statique de type oedométrique. Elle a l'avantage de mieux quantifier la contrainte appliquée à l'échantillon qu'une contrainte dynamique de type Proctor. L'échantillon étant placé dans une enveloppe rigide, on exerce à sa partie supérieure une pression à l'aide d'un piston : la pression exercée est donc monodimensionnelle. La hauteur de l'échantillon est grande par rapport à la dimension des agrégats afin que la répartition des charges soit homogène. Elle est proche du diamètre du tube (4 cm) afin que les mesures effectuées soient discernables, déterminant ainsi le poids et le volume de matériau, fonction de sa densité. AZZAOUI (1988) avait indiqué la nécessité d'une hauteur faible d'échantillon dans l'oedomètre pour éviter l'effet des parois latérales. Nous estimons qu'il reste malgré tout négligeable.

### **242 - Appareillage choisi** (fig. 2)

Nous avons choisi au départ l'appareillage conçu par AZZAOUI (1988) qui semblait apte à répondre au problème posé. En effet, il s'agit d'exercer une pression oedométrique axiale verticale sur un matériau dont la composante matricielle du potentiel de l'eau a pu être préalablement fixée.



**FIGURE 2 :** Schéma du dispositif de fixation de l'état de l'eau et/ou de la contrainte mécanique  
(AZZAOUI, 1988)

Le dispositif est constitué par un cylindre en plexiglass dont le diamètre interne est de 4 cm. A l'intérieur peut coulisser un double piston monté sur un axe.

\* le piston supérieur est jointif à la paroi du cylindre, et délimite ainsi deux chambres dans lesquelles il peut être introduit de l'air comprimé à des pressions indépendantes l'une de l'autre. Toute introduction de pression gazeuse au-dessus du piston se traduit donc par une pression mécanique, et au-dessous par une contrainte hydrique;

\* le piston inférieur n'est pas jointif. Il peut donc soit laisser passer une pression gazeuse, donc une contrainte hydrique, soit être utilisé en face de compression du matériau sous-jacent lors de l'application d'une pression gazeuse sur le piston supérieur.

\* la base du cylindre est fermée par un support métallique vissant, qui contient un filtre millipore. La taille des pores du filtre est compatible avec la pression d'air comprimé appliquée dans la chambre inférieure de telle sorte que le point de bulle ne soit pas atteint. L'échantillon est placé dans cette chambre inférieure, entre le filtre et le piston inférieur.

### **243 - Etablissement de la contrainte hydrique.**

On fait arriver par l'accès latéral une pression gazeuse déterminée. La pression s'exerce alors directement sur les films d'eau. Le temps nécessaire pour atteindre l'équilibre du potentiel matriciel a été estimée à 24 heures. Les pressions hydriques choisies ont été les suivantes: 10 kPa (0,1 bar ou  $pF = 2$ ), 30 kPa (0,3 bar ou  $pF = 2,5$ ), 100 kPa (1 bar ou  $pF = 3$ ) et 200 kPa, voire 300 ou 400 kPa quand cela a été possible.

### **244 - Application d'une contrainte mécanique**

L'application d'une contrainte mécanique sur l'échantillon amené à un certain potentiel matriciel est rendue possible du fait que les pistons supérieur et inférieur sont solidaires: toute pression sur le piston supérieur se traduit par une pression mécanique sur l'échantillon. Les pressions mécaniques choisies sont celles utilisées comme pressions hydriques, auxquelles il a été rajouté les pressions 600, 800, 1000, 1200, 1400 et 1600 kPa.

### **Conclusion**

Ce dispositif permet donc d'appliquer :

- des contraintes hydriques allant de 1 à 300-400 kPa (des difficultés d'étanchéité apparaissant à partir de 200 kPa),
- des contraintes mécaniques de 10 kPa (en dessous les forces de frottement du piston supérieur contre la paroi sont supérieures à la force de poussée) à 1600 kPa (au-delà, la paroi en plexiglass commence à subir des déformations, d'où des fuites latérales au niveau du joint, voire même l'expulsion du joint de son logement).

## **25 - MESURES EFFECTUEES ET PRESENTATION DES RESULTATS**

### **251 - Système de référence**

Pour décrire le comportement d'un matériau, c'est à dire l'évolution de sa teneur en eau et des volumes de ses compartiments constitutifs (solide, vides = eau + air), il est essentiel de rapporter les différents résultats dans un système aussi général que possible. De ce point de vue, comme la phase solide est la seule constante du système, c'est à elle seule qu'il faut se référer. TESSIER (1982) montre que la référence au volume de la phase solide, et non à sa masse, est plus appropriée. Dans notre cas, on pourra comparer ainsi des volumes massiques de matériaux de masses volumiques différentes. En outre, les données de volume de vides et d'eau deviennent additives/soustractives.

### **252 - Mesures**

Nous avons donc préparé des échantillons de masse connue à des teneurs en eau pondérales variées entre l'état sec (soit séchage étuve à 105°C, soit séchage à l'air) et l'état de saturation. Ces échantillons ont été soumis à des pressions mécaniques croissantes de 10 à 1600 kPa. A chaque étape de la manipulation (3 répétitions minimum), la teneur en eau de l'échantillon et sa hauteur dans le cylindre ont été mesurées (le diamètre connu du cylindre donne donc le volume). Les valeurs moyennes ont été calculées.

### 253 - Calculs

\* La teneur en eau pondérale  $w$  d'un échantillon à un état donné est :  $w = \frac{m_h - m_s}{m_s}$  (g/g)  
 où  $m_h$  est la masse de l'échantillon humide ;  
 $m_s$  est la masse de l'échantillon séché à l'étuve à 105°C pendant 24 heures.

\* Le volume massique total de l'échantillon  $VM_t$  est calculé de la manière suivante :

$VM_t = \frac{h \cdot \pi \cdot r^2}{m_s}$  (cm<sup>3</sup>/g) où  $h$  est la hauteur de l'échantillon dans le cylindre  
 $r$  est le rayon du cylindre ( $r = 2$  cm dans toutes nos expérimentations)

\* Une fois obtenu le volume massique global du matériau, il est possible de le décomposer en trois données qui concernent chacune des fractions de celui-ci: solide, vides et ses composantes eau et air.

- .  $VM_s$  est l'inverse de sa masse volumique ou de sa densité réelle.
- .  $VM_v$  est la différence:  $VM_t - VM_s$ .
- .  $VM_w$  est égal à la teneur en eau pondérale puisque sa masse volumique est égale à 1.
- .  $VM_a$  est la différence  $VM_t - (VM_s + VM_w)$ .

\* A partir de ces données, nous avons calculé différents indices caractéristiques :  
 indice d'eau  $e = VM_w / VM_s$ , et indice des vides  $\vartheta = VM_v / VM_s$

Les résultats obtenus ont été reportés sous la forme de courbes :

- $\vartheta$  et  $e$  en fonction des contraintes appliquées
- $VM_t = f(\text{contrainte appliquée})$
- $VM_t = f(VM_w)$ .
- $VM_v$ ,  $VM_w$  et  $VMA = f(\text{contraintes appliquées ou du pF})$ .

### 254 - Estimation de l'erreur sur les mesures

Reprenant les études de AZZAOUÏ (1988), qui confirmaient celles de MONNIER et al.(1973), nous considérerons que l'écart-type par rapport à la moyenne des mesures de volume et de teneur en eau est de l'ordre de 3%.

## CONCLUSION

*L'objet de ce chapitre était de présenter les matériaux choisis et les méthodes utilisées au cours de ce travail.*

*Celui-ci, conçu au départ dans la continuité des études réalisées précédemment, entre autres par TESSIER (1975, 1984) et AZZAOUÏ (1988), est nouveau dans son principe puisqu'il va s'intéresser à des matériaux non saturés en eau et que leur comportement mécanique ne sera étudié qu'après avoir fixé leur état hydrique.*

*D'autre part, ce travail est une étape obligée dans la compréhension du comportement des sols sous différents types de contraintes hydriques ou mécaniques dans la mesure où les matériaux choisis, bien que restreints dans leur choix, sont soit des éléments constitutifs très répandus dans les sols, soit un échantillon de sol lui-même. La finalité de ce travail est et reste donc agronomique.*

*C'est l'ensemble des résultats obtenus qui va maintenant être présenté et discuté, tant sur le plan méthodologique (Chap. III) que sur celui d'une approche de la compréhension de ce qui peut se passer dans un sol à un certain état hydrique connu sur lequel agit une contrainte mécanique (Chapitres suivants).*

## **CHAPITRE III :**

# **PROBLEMES METHODOLOGIQUES, ANALYSE ET PROPOSITIONS**

*L'application stricte des procédures préconisées par AZZAQUI (1988), a soulevé dès le départ, sur le premier matériau étudié, un problème de technique d'établissement de la contrainte hydrique. Puis, à mesure de l'avancement de l'expérimentation, d'autres facteurs, matériels ou méthodologiques, se sont révélés inadaptés aux mesures recherchées ou au but poursuivi. Enfin, le traitement direct des données brutes obtenues a lui-même montré une inadéquation certaine avec une description et une compréhension cohérentes des comportements analysés.*

*C'est pourquoi ce chapitre sera consacré à l'étude des problèmes méthodologiques et proposera un certain nombre de solutions pour les résoudre.*

## **31 - ETABLISSEMENT DE LA CONTRAINTE HYDRIQUE INITIALE**

### **311 - Humectation par vaporisation**

Dans le cas du test PROCTOR, la contrainte hydrique sur le matériau est appliquée par vaporisation d'eau sur l'échantillon, eau dont la quantité est connue par simple pesée.

En fait, cette méthodologie s'est révélée non-adaptée dès la tentative sur la kaolinite 0,1-0,5mm : perte de cohésion dans la masse de l'échantillon, "rétraction" de la surface humectée après absorption de l'eau, "fonte" des agrégats et formation d'une "pellicule" qui se décolle très rapidement du matériau sous-jacent. Il y a donc un "ré-arrangement" du massif d'agrégats en surface d'échantillon, interdisant ainsi une homogénéisation correcte de l'humectation dans la masse. En fait, la surface se sature d'eau avant même que la partie sous jacente ne commence à s'humecter. Ce problème est surtout sensible aux faibles à très faibles teneurs en eau, mais amène à s'interroger sur le comportement réel du matériau à des teneurs plus élevées allant jusqu'à l'humectation maximale.

D'autre part, l'humectation se fait à l'extérieur de l'oedomètre. Il est donc nécessaire d'opérer un transfert de matériau, en perturbant l'arrangement établi et en risquant des pertes.

C'est pourquoi nous avons été amenés à proposer une méthodologie différente.

### **312 - Humectation directe dans le tube**

La base de l'oedomètre, contenant l'échantillon reposant sur le filtre millipore, est plongée dans un récipient contenant de l'eau permutée (de niveau inférieur à la hauteur de l'échantillon). Ainsi seules les forces de succion capillaire peuvent agir. Le filtre millipore doit être préalablement humecté afin d'assurer la continuité du film d'eau. Pour la même raison, il est important de veiller à ne pas emprisonner d'air entre la base du tube et le filtre. Ainsi l'échantillon s'humecte librement de toute pression gazeuse (à pression atmosphérique). Il est possible de suivre la progression du front d'humectation et de constater l'état d'équilibre par la transparence du plexiglass. Suivant les matériaux, cette phase varie entre 20 mn et une demi-journée.

Après obtention visuelle de l'équilibre, la procédure de fixation du potentiel de l'eau suit la méthodologie mise au point par TESSIER et BERRIER (1979) pour les dispositifs dits "tubes pF".

## **32 - MESURE DE LA TENEUR EN EAU DES ECHANTILLONS A CHAQUE**

### **ETAPE DE LA PROCEDURE**

La conception même de l'appareillage ne permet pas la mesure du contenu en eau au cours des expérimentations. En effet,

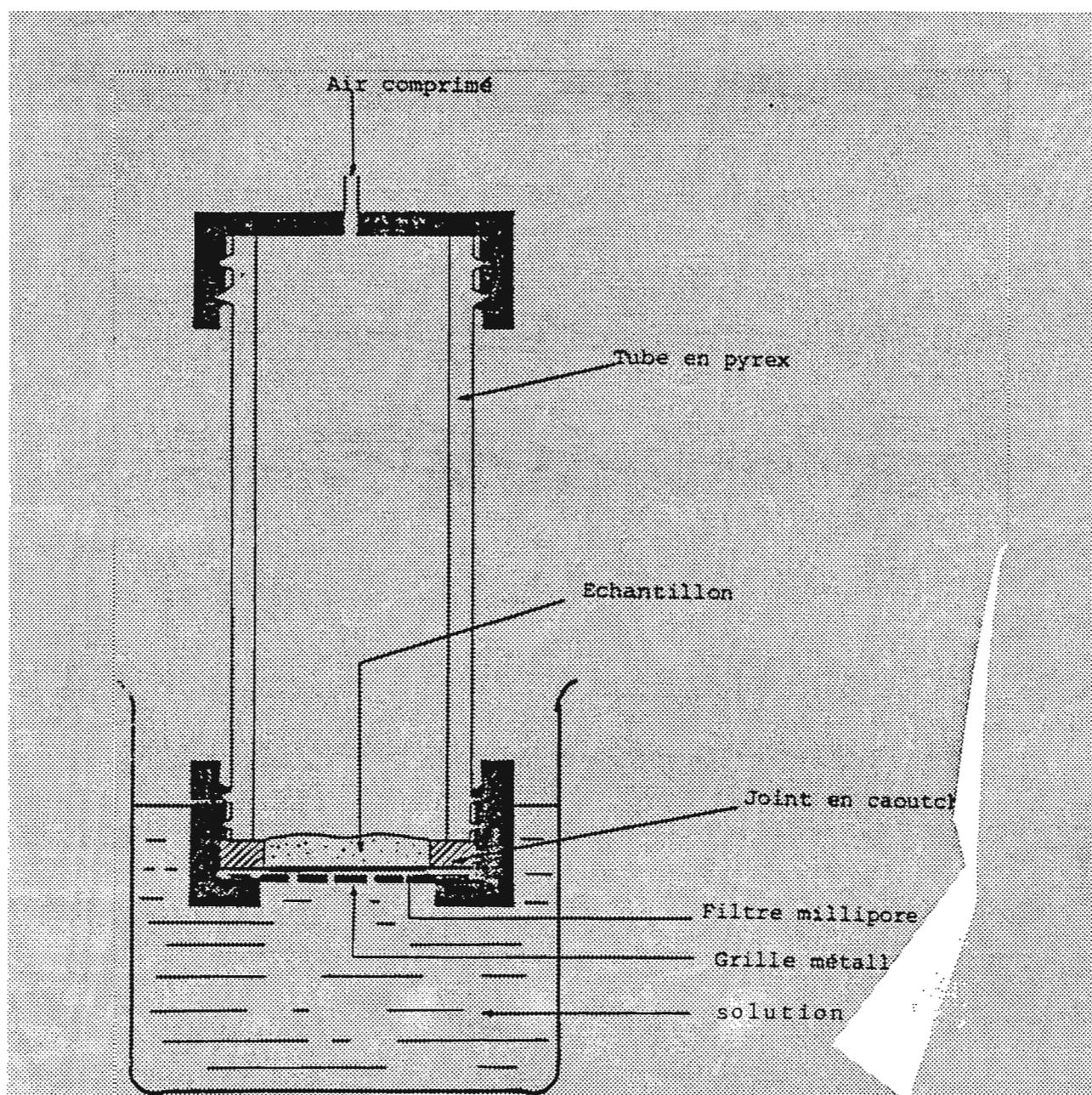
- \* le piston inférieur n'est pas jointif avec la paroi et la compression mécanique extrait de l'eau qui passe vers la chambre supérieure et y demeure jusqu'à la fin de l'expérimentation,
- \* le filtre millipore est un frein à l'expulsion ou au drainage de l'eau expulsée par la compression, ce qui accentue le problème précédent.

Nous proposons donc les modifications et aménagements suivants :

- . utilisation des "tubes pF" de TESSIER : double ouverture, une seule arrivée de pression, étanchéité du piston à sa base (figure 3) ;
- . doublement du filtre millipore par une grille métallique à trous fins (assurant à la fois le maintien de l'échantillon sous compression et le drainage de l'eau extraite) et suppression du filtre millipore avant la compression mécanique.

La principale difficulté réside dans l'obligation d'installer le piston après la réhumectation du matériau, avec un risque d'expulsion d'eau : il est donc nécessaire d'effectuer une mise en place très lente du piston, le tube étant tête-bêche, jusqu'au contact avec l'échantillon. Des solutions simples sont en cours d'étude.

Compte tenu du matériel disponible, les volumes de matériau nécessaires à l'expérimentation sont un peu plus élevés qu'avec l'oedomètre de AZZAOUÏ : environ 50-60 cm<sup>3</sup>. Les résultats obtenus avec cette adaptation sont cependant tout à fait comparables avec ceux issus de l'utilisation du dispositif initial.



**FIGURE 3** : Schéma du dispositif d'ultrafiltration utilisé pour les dessiccations et les réhumectations dans le domaine de contrainte  $< 4$  bars (d'après TESSIER et BERRIER, 1979)

### 33 - TRAITEMENT DES DONNEES

#### 331 - Homogénéité des résultats

Lors de l'humectation, il se produit une rétraction de l'échantillon de kaolinite, un gonflement de l'échantillon de l'horizon B de Versailles. Par ailleurs, les volumes correspondant à chaque état hydrique sont caractérisés par la valeur moyenne des mesures. Nous avons pu constater des variations non négligeables entre les courbes moyennes de chaque groupe d'expérience. Il est aussi apparu que le volume massique humide dépend fortement du volume massique sec initial.

Ainsi on aurait pu conclure à une évolution en dents de scie du volume massique total de KOE, alors qu'elle se rétracte quasi continûment jusqu'à une pression hydrique de  $0,3 \cdot 10^5$  Pa.

Exemple :

**TABLEAU 2 : HUMECTATION/DESHYDRATATION DES MATERIAUX**  
Valeurs maximales et minimales des moyennes des volumes massiques totaux de la Kaolinite de Saint-Austell 0,1-0,5mm, obtenues à l'humectation puis à diverses contraintes hydriques (en  $10^5\text{Pa}$ )

Expérimentation	Résultat	Volume massique K 0 E moyen obtenu		
		état sec	humide	sous pression
Série : PH 0	max	1,613	1,383	1,383
	MOY	1,582	1,352	1,352
	min	1,550	1,320	1,320
PH 0,1	max	1,655	1,173	1,047
	MOY	1,637	1,204	1,075
	min	1,623	1,225	1,068
PH 0,3	max	1,424	1,340	1,236
	MOY	1,389	1,326	1,180
	min	1,361	1,340	1,131
PH 1	max	1,655	1,424	1,068
	MOY	1,592	1,368	1,033
	min	1,529	1,340	1,026
PH 2	max	1,529	1,319	1,215
	MOY	1,515	1,138	1,040
	min	1,508	1,005	0,922

Par conséquent, nous avons envisagé une méthode de comparaison des données.

### **332 - Recherche d'une méthode de traitement des données**

Considérant que notre étude s'intéresse à un comportement de matériau sur lequel sont appliquées des séries progressives et continues de contraintes, d'abord hydriques, puis mécaniques, il nous a semblé préférable, pour obtenir une description homogène et elle-même progressive et continue, de rapporter chaque expérience à un point de référence commun sur le plan du volume massique. A cet effet, nous avons calculé la moyenne des volumes massiques secs, ainsi que celle de tous les volumes massiques humides (Tableau 3).

Nous pouvons constater que si, statistiquement, le retrait de la kaolinite, est patent lors de la réhumectation, il n'en va pas de même pour le gonflement du BV dont les valeurs séchage étuve/air, aussi bien que les valeurs sec/humide se recoupent largement, marquant ainsi une faible variation en volume, à la limite du quantifiable ainsi qu'une non différenciation des volumes massiques à l'humectation ; par contre, pour K, les recouvrements sont faibles à nuls entre K 0 et K 2 (état sec ou humide), et sont très forts entre K 2 E et K 2 A (état sec et humide).

Ces deux points, qui sont donc, concrètement, les seuls à être communs à toutes les manipulations, seront donc les états de référence de départ du matériau.

A partir de ces données communes à chaque type de matériau étudié, ont été retraduites homothétiquement les variations du volume massique pour chaque expérimentation. Il s'agit donc, en quelque sorte, d'un "lissage" des résultats expérimentaux.

En tout état de cause, les résultats de l'étude statistique nous permettent de confirmer ce choix des valeurs de lissage qui ont été adoptées pour quantifier les états initiaux de l'expérimentation.

**TABLEAU 3 : HUMECTATION DES MATERIAUX**  
 Volumes massiques secs et humides : résultats statistiques (moyenne, écart-type), maxima et minima expérimentaux

Matériau	Etat	S T A T I S T I Q U E S			R E S U L T A T S	
		n	moyenne	éc.-type	max	min
K 0 Etuve	sec	30	1,532	0,098	1,655	1,361
	humide	27	1,272	0,117	1,424	1,005
K 2 Etuve	sec	24	1,402	0,042	1,477	1,335
	humide	22	1,294	0,040	1,382	1,257
K 2 Air	sec	28	1,373	0,053	1,508	1,307
	humide	28	1,251	0,065	1,382	1,131
BV Etuve	sec	36	0,841	0,040	0,887	0,766
	humide	33	0,869	0,049	1,005	0,804
BV Air	sec	36	0,873	0,046	0,980	0,804
	humide	34	0,880	0,049	0,980	0,804

## CONCLUSION

*Nous avons donc été obligés, pour pouvoir assurer la bonne poursuite des expérimentations, de modifier sur un certain nombre de points, les protocoles expérimentaux définis au départ. Cela a toujours été fait dans le souci d'apporter des améliorations qui puissent se révéler applicables à n'importe quel type de matériau. Cependant, il reste évident que le temps imparti à la réalisation de cette étude est insuffisant pour mener ces études méthodologiques aussi à fond qu'il eût été souhaitable, tant sur le plan pratique que sur celui de l'"universalité" des améliorations proposées.*

*Cependant, les chapitres suivants analyseront les résultats obtenus tant avec les procédures initiales qu'avec celles qui ont pu être modifiées.*

## **CHAPITRE IV :**

# **COMPORTEMENT DES MATERIAUX LORS DE LA FIXATION DE L'ETAT HYDRIQUE INITIAL**

*Cette partie sera essentiellement consacrée à l'étude du volume massique des échantillons sous l'application de contraintes hydriques progressives depuis un état sec que l'on réhumecte jusqu'à la l'humectation naturelle maximale dans une première phase, puis que l'on va déshydrater par étapes dans une deuxième phase.*

*En fait, il s'agira d'analyser les comportements des matériaux lors de la fixation de l'état initial, préalable à l'application de contraintes mécaniques, en prenant en compte éventuellement l'impact éventuel des modes de préparation des échantillons ainsi que de la taille granulométrique des massifs d'agrégats utilisés.*

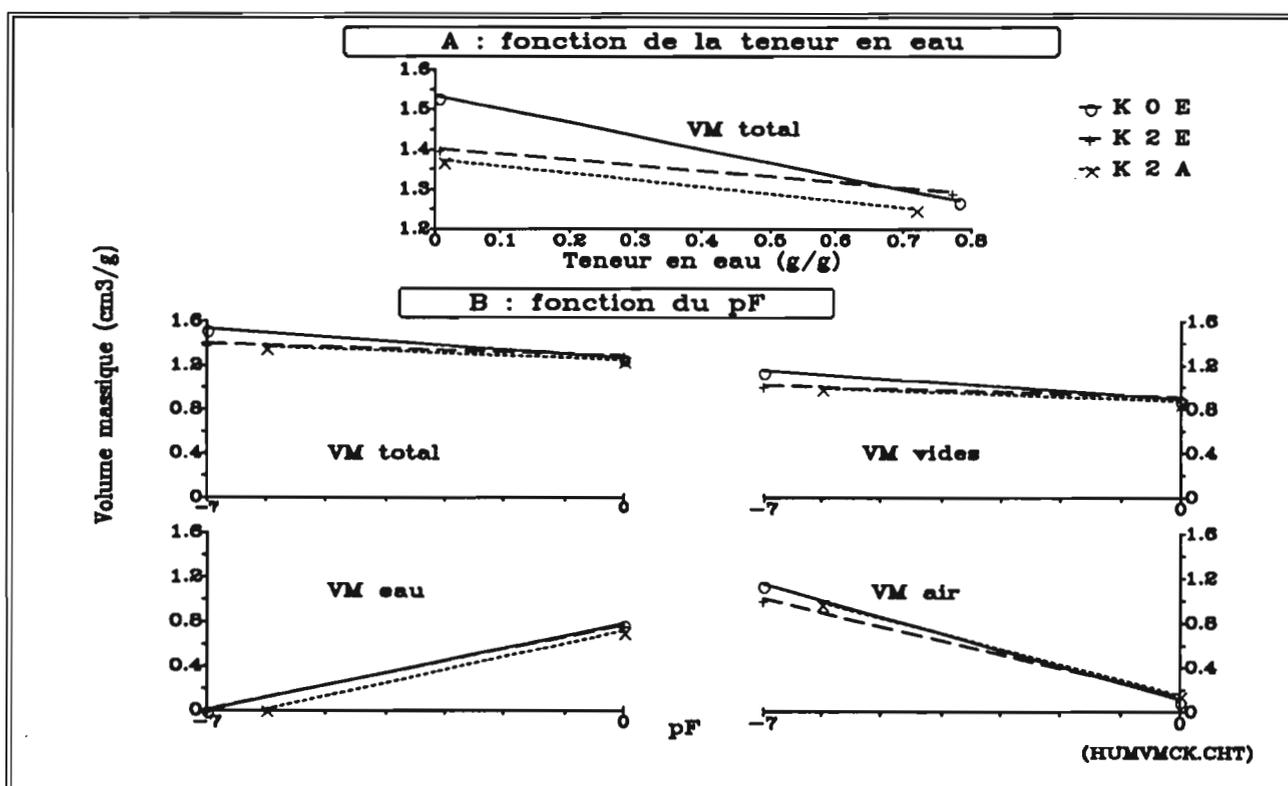
## 41 - ETUDE DE L'HUMECTATION DES ECHANTILLONS

A partir de l'état sec ( $pF = 6$  ou  $7$ ), les massifs d'agrégats se ré-humectent par capillarité jusqu'à une humidité maximale. Nous avons mesuré les teneurs en eau et les volumes massiques initiaux et finaux.

### 411 - Teneurs en eau et volumes caractéristiques

Les figures 4 et 5 représentent : (A) les variations de VMt en fonction des teneurs en eau initiales et finales, (B) les variations de VMt, VMv, VMw et VMa en fonction des  $pF$  initiaux et finaux (pour la commodité de la représentation, l'échelle des abscisses a été inversée), pour les trois types d'échantillon de Kaolinite et les deux types d'échantillon de B de Versailles.

#### 4111 - La kaolinite de Saint-Austell (figure 4)



**FIGURE 4 : HUMECTATION DES MATERIAUX**  
Evolution des volumes massiques totaux, des vides, d'eau et d'air de la kaolinite de Saint-Austell au cours de l'humectation, A: en fonction des teneurs en eau initiales, B: en fonction des  $pF$  initiaux

#### 41111 - Volume massique fonction des teneurs en eau

Nous pouvons constater, en premier lieu, la diminution de volume massique total entre l'état sec et l'état humecté : plus forte (de  $1,53$  à  $1,27$   $\text{cm}^3/\text{g}$ ) pour K 0 E (0,1 - 0,5 mm, séchée étuve) que pour K 2 A ( $< 2$  mm, séchée air): de  $1,37$  à  $1,25$   $\text{cm}^3/\text{g}$ , cette dernière présentant un volume massique sec initial inférieur. Ce retrait vertical peut être accompagné pour certains échantillons d'un retrait latéral, visible à l'oeil, mais non mesurable de par la procédure utilisée. Ensuite, les différences existantes à l'état initial sec entre les deux modes de séchage disparaissent à l'état humecté, les échantillons ayant tous un VMt comparable, dans les limites de précision des mesures. Toutefois, dans notre système de références, le volume massique de solide est invariant. C'est donc le volume de vides, occupé par l'eau et l'air, qui assure la rétraction. C'est

donc par l'analyse de leurs variations que l'on pourra comprendre l'évolution du matériau à l'humectation.

#### 41112 - Volumes des vides, d'eau et d'air fonction du pF

Les échantillons de kaolinite adsorbent en moyenne  $0,75 \text{ cm}^3$  d'eau par gramme de matériau. Cette eau remplit les vides, le volume d'air restant passant d'environ 1,1 à  $0,2 \text{ cm}^3/\text{g}$ , soit une diminution de  $0,9 \text{ cm}^3/\text{g}$ . Comme VMt diminue, la perte de volume complémentaire est de  $0,15 \text{ cm}^3/\text{g}$ . D'autre part, si K 0 adsorbe plus d'eau que K 2, les variations de VMw de K 2 restent parallèles, la courbe de K 2 E se maintenant au-dessus de celle de K 2 A. Enfin, on peut constater que l'évolution des VMA n'est pas symétrique de celle des VMw.

#### 41113 - Analyse de la bibliographie

L'étude de l'humectation de massifs d'agrégats différents par la taille entre pF = 6 (séchage air) et pF = 1,5 a été faite par AZZAOUÏ (1988) :

\* Pour des massifs d'agrégats < 0,5mm, les agrégats initiaux s'agglomèrent en agrégats plus grands, d'où formation de fissures d'environ 0,3 mm au sein du massif, le phénomène étant d'autant plus marqué que la taille des agrégats diminue;

\* Pour les agrégats plus grands, pas de changement apparent dans l'arrangement.

Ces observations ont permis à AZZAOUÏ de mettre en évidence les conditions d'intervention de l'eau : il faut que les pores résultant de l'arrangement des agrégats initiaux aient une petite taille pour que la prise en masse se manifeste. Il a pu conclure que les ménisques se formant à la limite des agrégats provoquent les rapprochements. Il a observé d'autre part que, à pF faible, les teneurs en eau obtenues lors de la réhumectation sont de plus en plus faibles quand la taille des agrégats augmente : l'hydratation macroscopique serait donc fonction de cette taille mais surtout de la taille des pores inter-agrégats. Il en ressort que l'on doit prendre en compte deux types de porosité dans un massif d'agrégats (intra-agrégats et inter-agrégats), ainsi que la valeur du potentiel hydrique qui permet le remplissage d'un certain type de porosité (loi de LAPLACE) : aux pF élevés, seuls les pores intra-agrégats sont remplis, quelle que soit la taille des pores inter-agrégats; par contre, aux faibles pF, des teneurs en eau plus élevées sont obtenues pour les massifs d'agrégats plus petits. Dans ce dernier cas, des volumes de pores inter-agrégats de plus en plus importants sont observés avec la baisse de la taille des agrégats; tandis qu'à l'opposé, pour les massifs d'agrégats plus grossiers, le volume inter-agrégats ne doit pas être entièrement occupé par de l'eau, les pores inter-agrégats dépassant largement les diamètres calculés.

D'un autre côté, TESSIER (1984), sur des patons de Kaolinite de Saint-Austell (Ca,  $\text{CaCl}_2$   $10^{-3} \text{ M}$ ) qu'il soumet à des cycles successifs de dessiccation/humectation, constate que celle-ci "révèle un comportement hydrique extrême : quel que soit le niveau de dessiccation, elle reprend la même quantité d'eau (à  $0,08 \text{ cm}^3$  d'eau par  $\text{cm}^3$  de solide près), mais ne retrouve pas des teneurs en eau analogues à celles de la première dessiccation".

#### 41114 - Discussion

Comparaison avec les résultats de AZZAOUÏ (1988) : nous disposons comme lui d'un massif d'agrégats de taille 0,1-0,5 mm (K 0) mais aussi d'un massif composé d'un mélange de tailles entre 0,1- 2 mm (K 2). Sur le massif K 0, les réorganisations ne se produisent pas, mais nous sommes à la limite de taille (0,5mm) séparant les deux comportements qu'il décrit. Sur K 2, l'observation correspond à celle faite par AZZAOUÏ pour les tailles d'agrégats supérieures à 0,5 mm. En effet, on ne voit pas de destruction, de "fonte" des agrégats; la diminution de volume ne correspond donc pas à une "prise en masse" du matériau. Par ailleurs, nous constatons effectivement à la fin de la réhumectation que la teneur en eau de K 0 est légèrement supérieure à celle de K 2. Ces teneurs se situent cependant dans la gamme obtenue pour 0,1-0,5 mm par AZZAOUÏ à pF = 1,5 : 73 % et de toutes façons loin des 57 % obtenus sur 1-2 mm. En outre, nous obtenons des teneurs en eau à pF = 0 similaires à celles de AZZAOUÏ à pF = 1,5, c'est à dire à une contrainte hydrique supérieure. Cela peut poser à ce niveau la question, qu'il avait d'ailleurs soulevée, de la validité de cette mesure.

Importance de la taille des agrégats : en première analyse, on peut penser que les agrégats de tailles les plus faibles d'un mélange de tailles conditionnent le comportement global du matériau quant à la

teneur en eau, alors que les agrégats les plus grossiers induisent son comportement quant à sa réorganisation. En fait, notre interprétation est que les agrégats de faible taille se répartissent entre ceux plus grossiers de telle sorte que l'ensemble occupe le plus faible volume apparent. On peut d'ailleurs noter que, à l'état sec, le VMt de K 0 (1,53 cm<sup>3</sup>/g) est supérieur à celui de K 2 (environ 1,4 cm<sup>3</sup>/g) : cela traduit bien une organisation et un arrangement de départ du matériau différents. D'autre part, à l'état humide, les volumes massiques sont quasiment équivalents: environ 1,26 cm<sup>3</sup>/g. Ces modifications de volume ne peuvent donc s'expliquer que par l'intervention des forces capillaires mises en jeu par l'eau lors de la réhumectation : en occupant la porosité, les forces capillaires provoquent le rapprochement des parois des pores, c'est à dire des agrégats eux-mêmes. De par la conception de l'expérimentation, cette évolution n'est sensible que selon l'axe vertical (mais les quelques observations qui ont pu être faites montrent qu'elle se produit ou peut se produire dans l'espace). Ce rapprochement provoque donc une baisse du volume disponible de vides.

Rôle des différentes forces de cohésion : il semble ici que les forces de cohésion internes aux agrégats soient supérieures aux forces capillaires périphériques. En conséquence, ces dernières ne provoquent que le rapprochement des agrégats et n'influent pas sur leur cohésion. Elles seront d'ailleurs d'autant plus fortes que les tailles des pores seront faibles, mais l'intensité de leur action semble atteindre une limite commune qui est celle que l'on retrouve pour tous les types d'échantillonnage de kaolinite que nous avons utilisés.

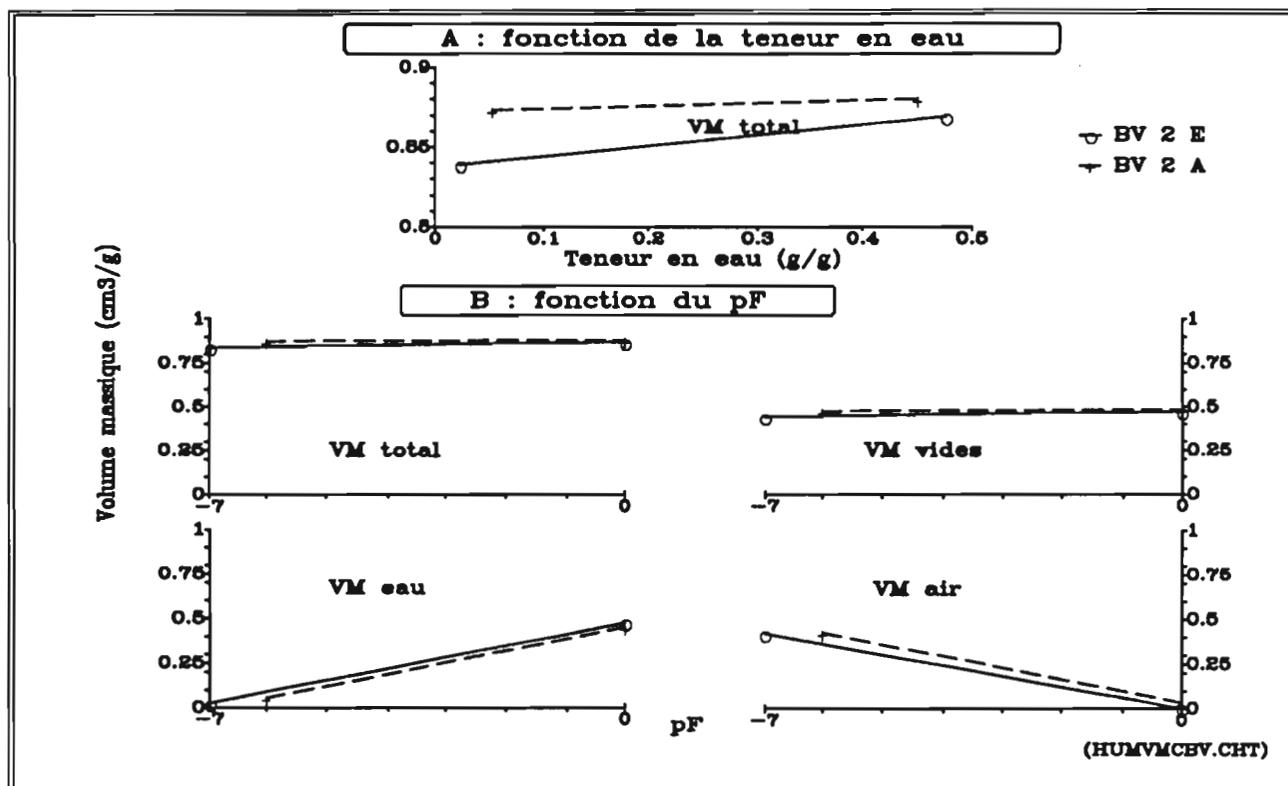
Comparaison avec les résultats de TESSIER (1984) : nous disposons pour K 2 de deux types de première dessiccation : pF = 7 (étuve) et pF = 6 (air). Nous avons constaté, à la fin de la réhumectation, que les deux courbes moyennes du volume massique d'eau sont restées pratiquement parallèles, mais que surtout, celle de K 2 E, matériau soumis à la dessiccation la plus forte (10<sup>4</sup> Pa), est restée supérieure à celle de K 2 A (10<sup>3</sup> Pa), d'une valeur à pF = 0 de l'ordre de 0,15 cm<sup>3</sup> d'eau par cm<sup>3</sup> de solide, ce qui est nettement supérieur à la fourchette donnée par TESSIER. Notre matériau d'étude a cependant été préparé différemment : broyage puis tamisage 0,1-0,5 mm après séchage de la pâte d'argile que TESSIER a de son côté confectionnée en paton de particules homogènes (< 2 μm), et utilisation dans un simple milieu eau au lieu d'une solution. Enfin, notre procédure implique une réhumectation et une dessiccation directes et lentes des matériaux au contraire des opérations graduelles réalisées par TESSIER. Dans notre cas, et sous réserve de vérifications complémentaires, le massif d'agrégats de Kaolinite semble présenter un comportement plus proche de celui décrit par TESSIER (1984) pour les smectites pour lesquelles "la dessiccation entraînerait une évolution irréversible du système".

#### 4112 - L'horizon B de Versailles (figure 5)

Sur un plan général, nous pouvons noter que les volumes massiques totaux de BV sont très inférieurs à ceux de K 2, mais surtout que, les volumes des vides, les volumes d'eau et les volumes d'air sont eux aussi inférieurs, alors que nous disposons ici de massifs d'agrégats identiques dans leur préparation. Sur un plan plus particulier, l'examen des courbes met en évidence un léger gonflement du matériau entre l'état sec et l'état humecté, de l'ordre de 0,02 cm<sup>3</sup>/g (de 0,855 à 0,875 cm<sup>3</sup>/g en moyenne pour les deux types de préparation), à la limite de la précision des mesures. On constate aussi que, comme pour la kaolinite, les VMt sont comparables à l'état humide, puisque les volumes massiques passent d'une différence de VMt de 0,035 cm<sup>3</sup>/g à l'état sec à une différence de 0,011 cm<sup>3</sup>/g à pF = 0. Par contre, sur le plan des teneurs en eau, les différences constatées entre les deux états secs sont quasiment maintenues à l'état humecté. Enfin, l'évolution du volume d'air est symétrique de celle du volume d'eau. Sur le plan morphologique, on ne constate pas ici non plus de réorganisation du matériau lui-même, ni agrégation, ni "fonte". On n'observe pas non plus de création de fissures. Il s'agit donc, dans le cas du BV, d'un gonflement du matériau lui-même, ce gonflement se produisant en augmentant, semble-t-il, le volume des agrégats eux-mêmes par adsorption d'eau entre les feuillets et les particules intra-agrégats.

Ici aussi, les forces de cohésion interne du matériau restent supérieures aux forces capillaires inter-agrégats puisqu'il n'y a pas réorganisation, le gonflement équilibrant et même surmontant le rapprochement provoqué par ces dernières; en effet, à composition granulométrique identique, le BV 2 devrait absorber autant d'eau que K 2 non gonflante, puisque le spectre poral inter-agrégats est semblable au départ, ce qui n'est pas le cas car les teneurs sont de l'ordre de 0,45 pour BV et de 0,75 pour K. Au total, la porosité inter-cristallites est plus forte pour K qui est constitué de 100%

d'argiles par ailleurs plus grossières. Si de l'eau a été adsorbée au sein des particules, le gonflement a fortement diminué la quantité de vides, et beaucoup moins d'eau a pu les remplir.



**FIGURE 5 : HUMECTATION DES MATERIAUX**  
Evolution des volumes massiques totaux, des vides, d'eau et d'air de l'horizon B de Versailles au cours de l'humectation, A: en fonction des teneurs en eau initiales, B: en fonction des pF initiaux

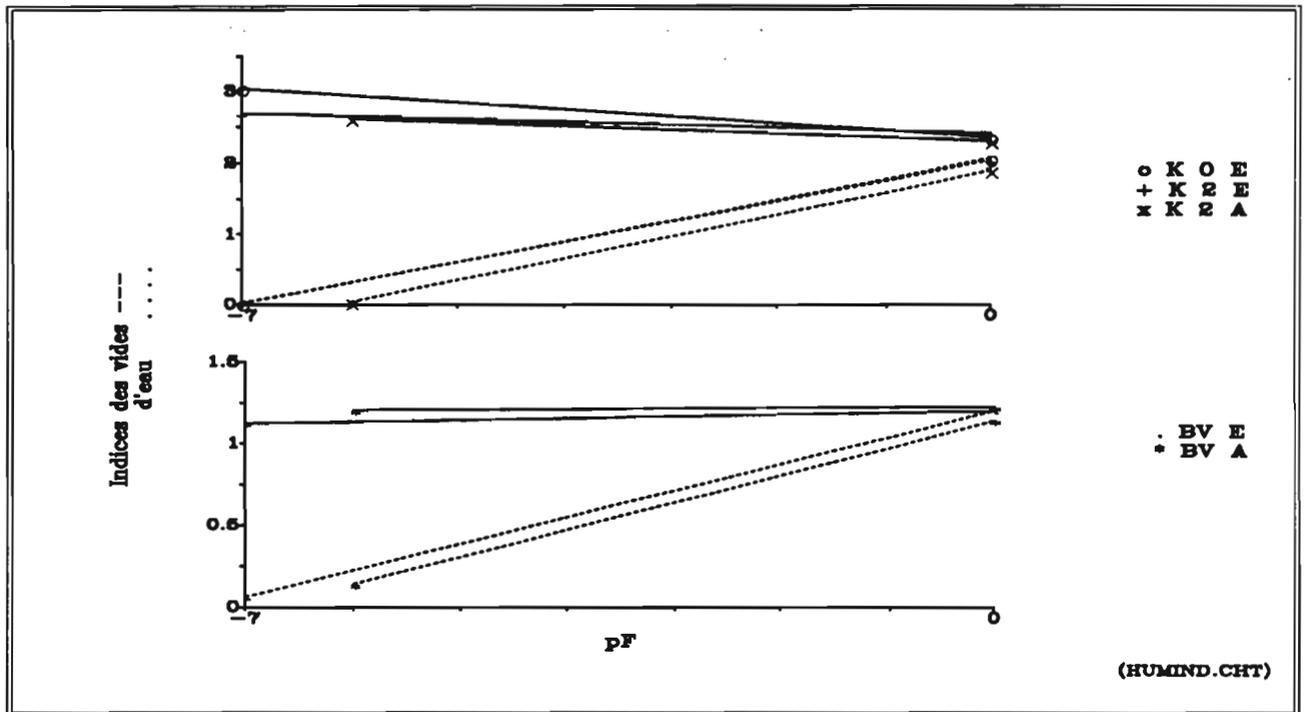
D'autre part, les courbes de volume massique d'eau restent parallèles, celle du matériau séché étuve restant supérieure à celle du matériau séché air, avec une différence de l'ordre de 0,07 cm<sup>3</sup> d'eau par cm<sup>3</sup> de solide à pF = 0. Nous retrouvons donc ici un comportement smectitique à la réhumectation (TESSIER et al., (1991) ont démontré que le matériau horizon B de Versailles se comporte plus comme des smectites de sols que comme des illites), avec la même observation que pour la Kaolinite en ce qui concerne l'ordre inverse des courbes entre états initiaux pF = 7 et pF = 6.

#### 412 - Indices caractéristiques (figure 6)

##### 4121 - La Kaolinite de St-Austell

Là aussi, la simple observation des graphiques montre la similitude, voire la superposabilité des courbes obtenues. Les seules observations particulières sont :

- \* une pente décroissante d'indice des vides légèrement plus forte pour K 0 que pour K 2, ce qui confirmerait le réarrangement inter-agrégats provoqué par l'humectation,
- \* des pentes d'indice d'eau semblables (identiques entre K 0 E et K 2 E) qui indiquent bien que la quantité d'eau adsorbée est indépendante de la taille des agrégats, mais le parallélisme entre les courbes K 2 E et K 2 A montre un lien avec le mode de préparation.
- \* la présence d'air à pF = 0 indique une saturation en eau incomplète du matériau. Cette observation est valable quel que soit le temps laissé au matériau pour se réhumecter : en effet, les teneurs en eau ou les volumes massique totaux mesurés dès l'humectation complète atteinte visuellement, ou bien 12 h, 24 h ou 48 h après cet état fournissent des résultats semblables, avec systématiquement un volume massique d'air d'environ 0,12 cm<sup>3</sup>/g., qui serait donc de l'air piégé, malgré la procédure d'hydratation lente par son principe.



**FIGURE 6 : HUMECTATION DES MATERIAUX**  
Evolution des indices des vides et d'eau de la kaolinite de St-Austell et du B de Versailles au cours de l'humectation, en fonction du pF initial

#### 4122 - L'horizon B de Versailles

L'observation des graphiques confirme les remarques faites pour la kaolinite:

- \* identité et parallélisme des courbes croissantes d'indice des vides ou d'indice d'eau,
- \* une présence d'air piégé moins marquée à nulle (BV E), que pour la kaolinite.

#### Conclusion

Même si les comportements à l'humectation jusqu'à  $pF = 0$  sont semblables quelles que soient les différences de préparation des matériaux, nous avons pu constater que la procédure utilisée respecte la structuration initiale en massif d'agrégats, c'est à dire que les forces de cohésion intra-agrégats sont supérieures aux forces capillaires. Cependant, nous constatons deux comportements volumiques différents à l'humectation: pour la kaolinite, argile "non gonflante", les forces capillaires provoquent le rapprochement des agrégats, donc une diminution du volume massique du matériau ; pour le B de Versailles, la présence des argiles gonflantes, constituant du matériau, provoque une augmentation du volume massique du matériau légèrement supérieure à la diminution qu'a pu induire le rapprochement des agrégats sous l'effet des forces capillaires.

Par contre, l'analyse montre que les comportements liés à la réhumectation sont proches, voire identiques, dans la mesure où ils ressemblent à ceux décrits pour les smectites par TESSIER (1984), à l'exception, pour tous les deux, de l'inversion des courbes par rapport à l'état initial: pour ce qui concerne un massif d'agrégats 0,1-2 mm, plus la kaolinite de St-Austell ou le B de Versailles auront subi une dessiccation importante ( $pF = 6$  ou  $pF = 7$ ), plus la quantité d'eau reprise sera forte, les évolutions restant parallèles. En outre, ces résultats montrent que le comportement des matériaux étudiés s'oppose à celui des smectites (sodiques) qui s'hydratent beaucoup plus que les autres argiles, qu'elles soient expansibles (vermiculite) ou non expansibles 2/1 ou 1/1 (illite, kaolinite). Nous retrouvons aussi une situation dans laquelle la kaolinite s'hydrate beaucoup plus (1,5 fois) qu'un matériau illitique-smectitique comme le B de Versailles. Il se pourrait donc que les constituants argileux autres que smectitiques du BV (25% kaolinite, 25% illite, 15% vermiculite) ainsi que la fraction non argileuse interviennent dans le comportement quantitatif par rapport à la teneur en eau du BV. Ce dernier garderait par contre un comportement qualitatif smectitique.



des points extrêmes. Elle est cependant en opposition avec les conclusions de TESSIER (1984) sur ses courbes de deuxième dessiccation, mais obtenues sur des matériaux préparés différemment.

Ceci étant signalé, nous pouvons dire que la deuxième dessiccation de nos matériaux se situe donc toujours dans le schéma global de comportement smectitique décrit par TESSIER pour la Montmorillonite du Wyoming Ca,  $\text{CaCl}_2$   $10^{-3}$  M.

#### 4213 - Approche d'une formalisation de ces courbes

Cette similitude des courbes, indépendante du matériau, de sa préparation et de sa forme, nous a amené à réaliser une étude statistique de type recherche de régression sur chaque série de mesures et sur le matériau seul (toutes différences confondues), dans le domaine d'expérimentation, soit entre 0 et  $3 \cdot 10^5$  Pa. Un tel ajustement d'équation permettra d'analyser les résultats et de décrire avec précision les phénomènes observés.

Les fonctions ajustées sont du type  $y = A_0 + A_1 \cdot \ln x$  avec  $A_0 =$  constante ;  $A_1 =$  coefficient à déterminer ;  $y = w$ , teneur en eau =  $\text{VM}_w$ , volume massique d'eau ; et  $x = \text{PH}$ , pression hydrique appliquée

Les données statistiques sont regroupées dans le tableau 4 :

**TABLEAU 4 : DESHYDRATATION DES MATERIAUX**  
Données statistiques (coefficients, coeff. de corrélation,  $r^2$ , erreurs-type) concernant les courbes de déshydratation des matériaux étudiés.  
Valeurs des teneurs en eau à  $pF = 3$

Matériau	n	r (-)	$r^2$	E. typ estim	Coeff $A_0$	Err. type	Coeff $A_1$ (-)	Err. type	w à $10^5 \text{ Pa}$
K 0 E	13	0,783	0,931	0,03	0,510	0,01	0,031	0,003	0,507
K 2 E	9	0,696	0,932	0,04	0,460	0,02	0,034	0,004	0,447
K 2 A	9	0,760	0,547	0,08	0,566	0,04	0,017	0,006	0,581
K	31	0,673	0,756	0,06	0,513	0,01	0,026	0,003	
BV 2 E	17	0,696	0,876	0,04	0,239	0,01	0,027	0,003	0,226
BV 2 A	11	0,778	0,858	0,04	0,259	0,01	0,023	0,003	0,238
BV	28	0,716	0,863	0,04	0,246	0,01	0,025	0,002	

Elles montrent que les régressions obtenues présentent des coefficients de corrélation supérieurs à 0,6 avec des  $r^2$  supérieurs à 0,85.

Dans notre cas, le volume massique d'eau d'un échantillon ou d'un matériau peut être obtenu par l'équation suivante :

$$\text{VM}_w = A_0 + A_1 \cdot \ln \text{PH}, \quad \text{avec}$$

-  $\text{VM}_w$  = volume massique d'eau, en  $\text{cm}^3/\text{g}$

-  $A_0 = \text{VM}_w(\text{PH}1)$  dans le matériau à une pression hydrique de  $10^5$  Pa (tableau 4).

-  $A_1 = -\alpha$ , coefficient de l'ordre de -0,025 pour l'ensemble de nos expérimentations sur K et sur BV.

La valeur de ce coefficient semble dépendre de la procédure utilisée et nécessite des études plus approfondies (cf. infra).

- PH = pression hydrique en  $10^5$  Pa ou en bars.

Cette équation finale est donc :

$$\text{VM}_w(\text{PH}) = \text{VM}_w(\text{PH}1) - \alpha \cdot \ln \text{PH}$$

#### 4214 - Recherche d'une relation potentiel de l'eau / teneur en eau

Nous avons cherché à relier cette équation avec une donnée habituelle du comportement hydrique des sols : le pF, qui est, d'après la définition de SCHOFIELD (1935), le log décimal de la succion  $h$  exprimée en cm, et qui traduit une différence d'énergie libre de l'eau.

Comme  $\ln PH = \log 10 * \log PH = 2,303 * \log PH$ , si on exprime PH en hauteur d'eau en cm,  $\log PH = pF$ , et que l'on utilise la notation  $pF$ ,  $VM_w(PH)$  correspond à  $VM_w(pF)$  et  $VM_w(PH1)$  à  $VM_w(pF=3)$ , on obtient donc, avec  $\beta = 2,303 * \alpha$ ,

$$VM_w(pF) = VM_w(pF=3) - \beta * pF$$

dans le domaine d'expérimentation, c'est à dire entre l'état d'humectation maximale ( $P = 0$ ) et l'état hydrique du matériau sous une pression de  $3-4*10^5$  Pa, ou entre  $pF = 0$  et  $pF = 3,5-3,6$ .

**Ainsi, à partir de leur seule valeur à  $pF = 3$ , on peut calculer les volumes massiques d'eau des matériaux étudiés au cours de leur déshydratation, et ce à n'importe quel  $pF$ .**

Cet ajustement montre aussi que l'on peut distinguer deux grandes régions dans le comportement hydrique des matériaux étudiés lors de la déshydratation :  $< 0,3$  bar et  $> 1$  bar, la zone  $0,3-1$  bar étant intermédiaire,

ce qui permet sans doute d'envisager deux mécanismes différents dans la déshydratation. Elles-mêmes correspondraient à deux types de porosité. Etant donné le mode de préparation des agrégats, l'hypothèse du remplissage des porosité inter- et intra-agrégats paraît vraisemblable.

#### 4215 - Essai de généralisation

Dans un souci de première approche de l'applicabilité de cette équation de comportement, nous nous sommes intéressés aux données existantes dans la littérature, et issues de matériaux et de procédures plus ou moins éloignées des nôtres. Reprenant les données fournies par TESSIER (1975, 1984) sur différents matériaux argileux (argiles pures ou argiles de sol), nous leur avons appliqué le même type de régression. Les résultats qui en sont issus permettent de suivre l'évolution du coefficient  $\alpha$ . Les coefficients de corrélation sont de l'ordre de 0,7 à 0,8 et les  $r^2$  supérieurs à 0,97, ce qui est significatif.

Kaol. de Provins (T.,1975)

$$VM_w = 0,774 - 0,283 * \ln PH \quad (VM_{w(PH1)} = 0,798)$$

Kaol. de Provins Na (T.,1984)

$$VM_w = 0,691 - 0,313 * \ln PH \quad (VM_{w(PH1)} = 0,750)$$

Argiles de BV (T.,1975)

$$VM_w = 0,808 - 0,168 * \ln PH \quad (VM_{w(PH1)} = 0,820)$$

Kaol. St-A Na,NaCl  $10^{-3}$  M (T.,1984)

$$VM_w = 0,578 - 0,214 * \ln PH \quad (VM_{w(PH1)} = 0,610)$$

Pour AZZAOU (1988), sur la Kaolinite de St-Austell, avec un coefficient de corrélation de 0,6 et des  $r^2$  de 0,88

$$VM_w = 0,734 - 0,152 * \ln PH \quad (VM_{w(PH1)} = 0,684)$$

Il en va de même pour le BV en mottes étudié à l'INRA-Versailles qui donne les résultats suivants :

$$VM_w = 0,202 - 0,015 * \ln PH \quad (VM_{w(PH1)} = 0,20)$$

**Ces résultats montrent que l'on peut définir le comportement des matériaux à l'aide de la mesure de  $VM_w(PH1)$  et du coefficient  $\alpha$ .**

La relation reste valable quels que soient le mode de préparation et la procédure d'application des contraintes. La valeur de  $\alpha$ , quant à elle, est relativement variable mais semble essentiellement dépendre de l'état de préparation initial du matériau et en particulier de l'existence d'une porosité inter-agrégats.

#### 422 - Etude de la variation des volumes massiques caractéristiques lors de la déshydratation

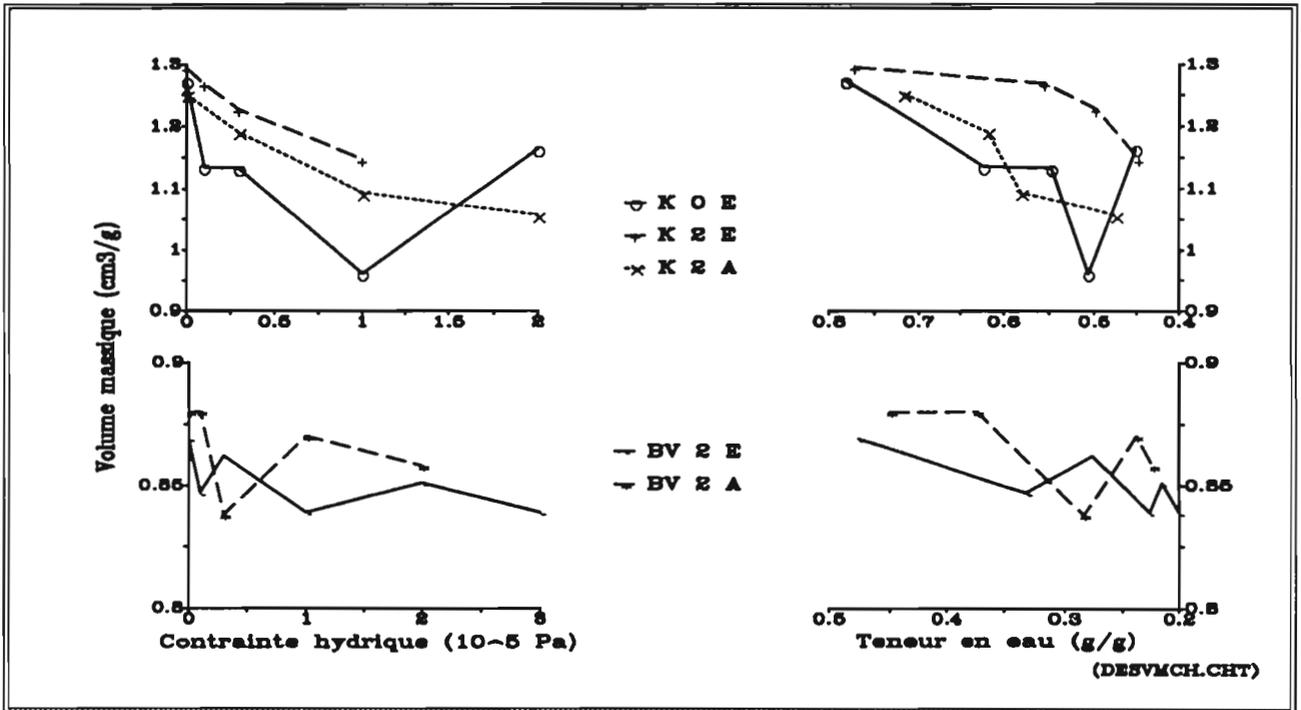
La figure 8 montre les variations du volume massique total en fonction de la contrainte hydrique appliquée et du contenu en eau, pour K et pour BV.

Dans l'ensemble, les volumes massiques décroissent quand la contrainte hydrique croît. **Mais, contrairement à l'évolution des teneurs en eau, qui suivent une loi "monotone", il n'en est pas de même pour l'évolution des volumes massiques, en l'absence de contraintes mécaniques.** A ce sujet, K 0 se différencie des autres matériaux : en effet, si son VMt décroît jusqu'à  $PH = 10^5$  Pa ( $pF = 3$  ou  $w_1 = 0,51$ ), il croît ensuite brutalement. Nous ferons donc une étude particulière de K 0.

#### 4221 - Cas de la Kaolinite de St-Austell 0,1 - 0,5 mm

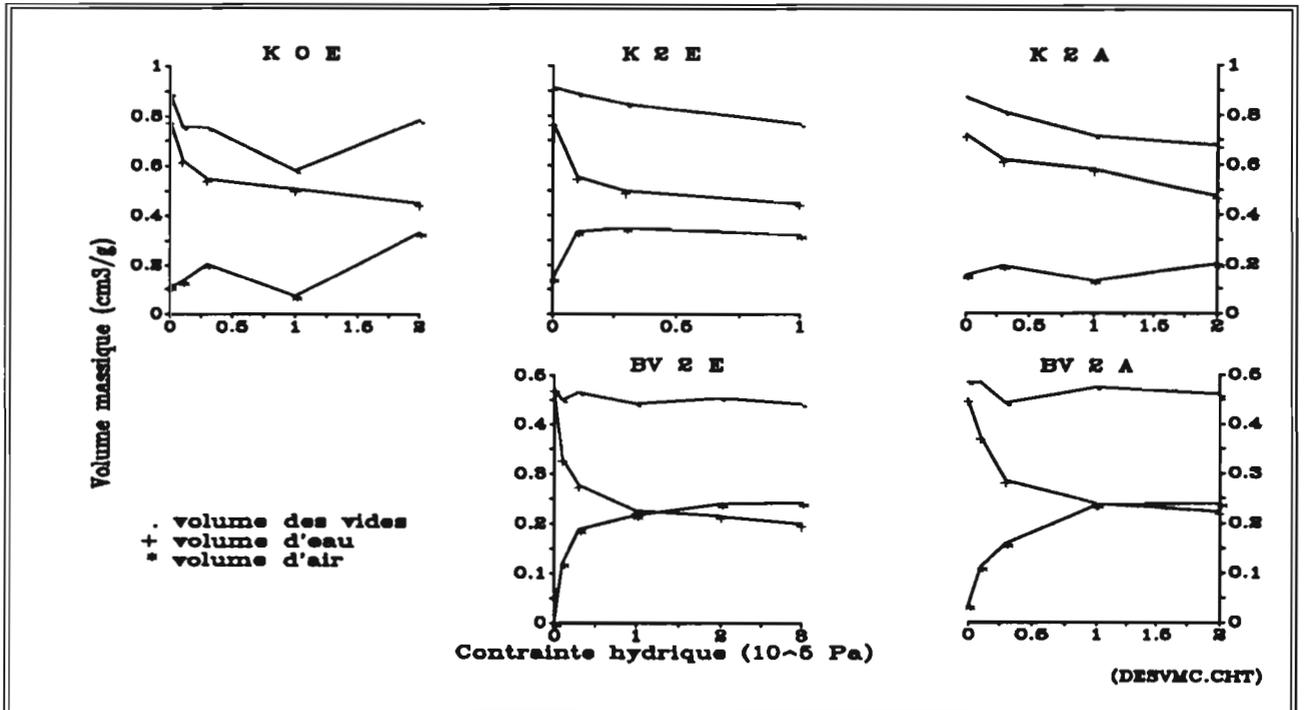
Le phénomène de retrait-gonflement apparaît dans toutes les expérimentations sur K 0. Comme le montre l'utilisation de la moyenne des résultats comme celle de leur lissage, cela indique un comportement particulier de K 0 à  $pF = 3$ .

A notre connaissance, il n'a été observé ni par AZZAOU (1988) en conditions expérimentales proches, ni par TESSIER (1984) en conditions différentes.



**FIGURE 8 : DESHYDRATATION DES MATERIAUX**  
 Evolution du volume massique total des échantillons en fonction des contraintes hydriques appliquées et des teneurs en eau, pour la kaolinite de St-Austell et le B de Versailles

Contrairement à la figure 8 qui montrait l'évolution des volumes massiques totaux, la figure 9, complémentaire de la précédente, montre les variations des volumes des vides, d'eau et d'air en fonction des contraintes hydriques appliquées.



**FIGURE 9 : DESHYDRATATION DES MATERIAUX**  
 Evolution des volumes massiques des vides, d'eau et d'air, en fonction des contraintes hydriques appliquées, pour la kaolinite de St-Austell et le B de Versailles

#### 42211 - Résultats

Il y a quatre phases dans l'évolution de K 0.

- \* Le volume massique total (fig.8) passe de 1,28 à 1,13 cm<sup>3</sup>/g entre pF = 0 et pF = 2 (0 à 30 kPa), soit une baisse de 0,15 cm<sup>3</sup>/g, pour une baisse du volume massique d'eau de 0,16 cm<sup>3</sup>/g et pour une augmentation du volume d'air de 0,01 cm<sup>3</sup>/g (fig.9).
- \* Entre pF = 2 et 2,5 (10-30 kPa), il se produit un palier au cours duquel le volume total ne varie pas : - 0,003 cm<sup>3</sup>/g (fig.8) tandis que la perte en eau est de 0,08 cm<sup>3</sup>/g et que l'augmentation du volume d'air est de 0,07 cm<sup>3</sup>/g (fig.9)
- \* Entre pF = 2,5 et pF = 3 (30 à 100 kPa), le volume d'eau baisse de plus en plus lentement (0,04 cm<sup>3</sup>/g) dans un matériau qui perd aussi 0,13 cm<sup>3</sup>/g de volume d'air (fig.9). Le volume total baisse en conséquence de 0,17 cm<sup>3</sup>/g (fig.8).
- \* Entre pF = 3 et pF = 3,3 environ (100 à 200 kPa), la baisse du volume d'eau est de 0,06 cm<sup>3</sup>/g mais le volume d'air augmente de 0,26 cm<sup>3</sup>/g (fig.9) pendant que le volume total augmente de 0,2 cm<sup>3</sup>/g (fig.8).

#### 42212 - Analyse de la bibliographie

TESSIER (1984) constate que, dans le cadre de son étude sur des patons de kaolinite, les particules sont pratiquement toutes au contact dès P = 1 bar et en conclut que la limite de retrait de la kaolinite de St-Austell apparaît à cette contrainte relativement faible.

D'autre part, TESSIER (1975), sur la kaolinite de Provins, observe que, lors de la déshydratation, il se produit deux phases : au cours de la première, la baisse du volume apparent correspond à la baisse de la teneur en eau, ce qui entraînerait un changement des caractéristiques du système poreux par resserrement dû au rapprochement des unités morphologiques dans un milieu restant saturé (jusqu'à 38 % d'eau correspondant à un pF = 4,2); puis, après une phase transitoire qui va jusqu'à 20 % d'eau (pF = 4,8), les unités morphologiques arrivent au contact, ce qui implique une limite de retrait correspondant à une porosité de 38 %

#### 42213 - Mise en évidence d'un phénomène de relaxation

En l'absence d'observations au microscope optique (les tentatives d'imprégnation s'étant soldées par des échecs, même sous pression de 10 bars), seules des hypothèses peuvent être émises à partir de l'observation des différentes courbes obtenues.

\* Entre pF = 2,5 et pF = 3, tout se passe donc comme si, l'eau présente se situant dans des pores de plus faible diamètre (loi de Laplace), donc les forces capillaires augmentant leur action, les particules de matériau se rapprochaient entre elles, diminuant par la même occasion la dimension de la porosité, et donc renforçant encore l'effet des forces capillaires.

\* Entre pF = 3 et pF = 3,3 environ, le matériau continue à perdre de l'eau, mais son volume augmente. En fait, c'est le volume des vides qui croît. Il y aurait donc une espèce de rupture de la cohésion inter-agrégats probablement due à l'eau contenue dans les pores et qui est extraite par la pression hydrique : n'assurant plus son rôle de lien dans la globalité du matériau, et celui-ci ayant atteint sa limite de retrait, il se produit une espèce de "relaxation" d'ensemble. L'eau restante assure toutefois, par l'action des forces capillaires au niveau de la porosité la plus étroite (la loi de Laplace donne un diamètre de pores d'environ 10 µm), la cohésion d'ensemble du matériau. Celui-ci ne se désagrège d'ailleurs pas lorsqu'il est sorti du tube d'expérimentation.

On retrouve donc schématiquement, tout au moins dans les premières phases, les phénomènes décrits par TESSIER (1975, 1984). Mais l'épisode de "relaxation" n'a pas été observé, peut être simplement du fait du type de préparation du matériau (par ailleurs différent) en paton homogène et non pas en massif d'agrégats calibrés.

#### 4222 - Cas des autres matériaux

##### 42221 - Résultats

L'examen des figures 8 et 9 montre plus particulièrement :

- \* une évolution symétrique du volume d'air qui tend à s'égaliser avec le volume d'eau, voire lui devenir supérieur dans certains cas.

- \* aucun des matériaux ne semble atteindre de "limite de retrait" dans le domaine d'expérimentation;
- \* pour K 2, le volume d'air atteint un point haut à  $pF = 2,5$ , puis décroît jusqu'à  $pF = 1$  : ce comportement est identique à celui de K 0 dans les mêmes limites, bien que moins marqué ;
  - + en ce qui concerne K 2 A, le volume total et le volume d'eau décroissent continûment et parallèlement avec une augmentation du volume d'air, ce qui le différencie de K 0;
  - + pour K 2 E, dans un domaine d'expérimentation restreint, on constate une décroissance continue et parallèle de tous les volumes entre  $pF = 2,5$  et  $pF = 3$  ;
- \* pour BV, les volumes globaux varient irrégulièrement mais peu entre 0 et 200 ou 300 kPa. Une faible variation à la baisse entraîne la parfaite symétrie des courbes de volume d'eau et d'air qui sont continûment et respectivement décroissants ou croissants. On peut toutefois noter que ces deux courbes se rejoignent, dans les deux cas, autour de  $pF = 1$ .

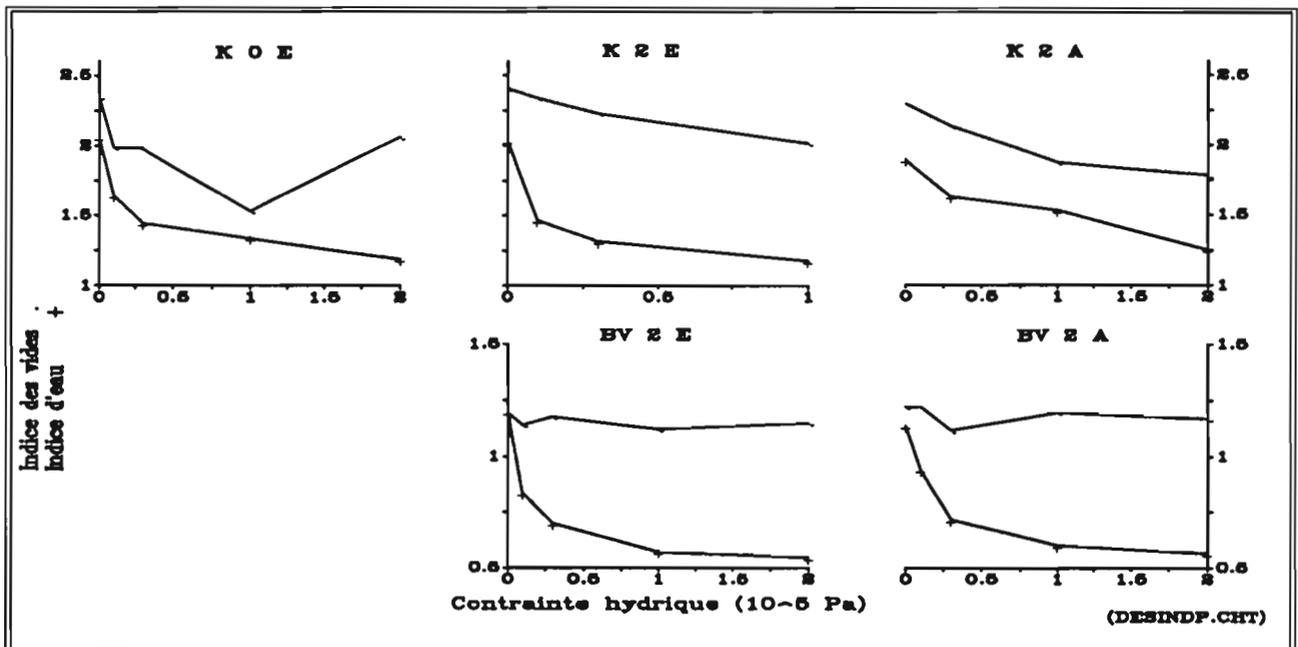
#### 42222 - Interprétation

Contrairement à K 0 E, la décroissance du volume est continue. Nous nous situons dans la phase de retrait du matériau. Rappelons que les échantillons sont des massifs d'agrégats calibrés 0,1-2 mm. Toutes les tailles granulométriques sont présentes, et mélangées. Ce mélange peut jouer un rôle dans l'organisation en comblant les vides entre les agrégats plus grossiers par les agrégats plus fins, et ce à toutes les échelles présentes. Une organisation porale différente et probablement plus homogène, mieux répartie et plus continue, apparaît alors. Cet effet peut être renforcé dans le cas de BV par le gonflement des particules. Ceci permet d'expliquer pourquoi l'extraction de l'eau sous l'action des contraintes hydriques se fait de manière continue. Aucune rupture brutale dans l'occupation de la porosité par l'eau ne se produit et la porosité la plus fine permet l'action en continu des forces capillaires dans le rapprochement et le maintien du resserrement des agrégats.

Le problème reste cependant de savoir à quel niveau de contrainte hydrique on peut atteindre la limite de retrait, c'est à dire pour quelle taille de pores du fait de leur vidange, l'eau ne peut plus jouer son rôle de maintien de cohésion globale entre les agrégats, et donc à partir de quand un matériau en déshydratation peut se "relaxer", comme évoqué précédemment.

#### 423 - Evolution des indices caractéristiques

L'examen des courbes d'indice des vides et d'indice d'eau (figure 10) obtenues, quand elles sont rapportées à la pression hydrique appliquée, confirme les observations faites plus haut .



**FIGURE 10 : DESHYDRATATION DES MATERIAUX**  
Variation des indices des vides et d'eau de la kaolinite de St-Austell et du B de Versailles soumis à des contraintes hydriques

Il permet toutefois de souligner plus fortement une tendance à la prise en masse du matériau à 100 kPa pour K 0, mais aussi légèrement discernable pour K 2 A, après et avant des zones d'augmentation de volume d'air (comprises entre les deux courbes).

Pour les autres échantillons, nous nous situons encore , aux points maximaux de contrainte hydrique obtenus, dans une zone d'augmentation de ce volume d'air, ou, à la limite, dans une zone où celui-ci n'évolue pas quand les deux courbes sont parallèles.

## CONCLUSION

*En l'absence de contraintes mécaniques, des massifs d'agrégats peuvent avoir des comportements très différents, en fonction de leur nature et de leur tri granulométrique. La rétention de l'eau n'est pas affectée par la taille des agrégats. En revanche, le volume est fortement lié au type de préparation des échantillons. Le domaine de contrainte voisin de 1 bar correspond au volume massique minimum. Les forces capillaires à elles seules, à la périphérie des agrégats, en l'absence de contraintes mécaniques, apparaissent jouer un rôle décisif dans la réorganisation des massifs d'agrégats.*

*Il s'agit donc maintenant d'en étudier les conséquences éventuelles sur les comportements des matériaux soumis à des compressions oedométriques. Ce sera l'objet du chapitre suivant.*

## CHAPITRE V :

# COMPORTEMENT DES MATERIAUX SOUS COMPRESSION OEDOMETRIQUE

*Les premiers chapitres de ce travail ont permis de fixer le cadre du comportement physique des matériaux et de définir le protocole expérimental de leur étude. Leur comportement, en relation avec l'établissement de leur "état initial" et de leur "histoire hydrique" a été examiné.*

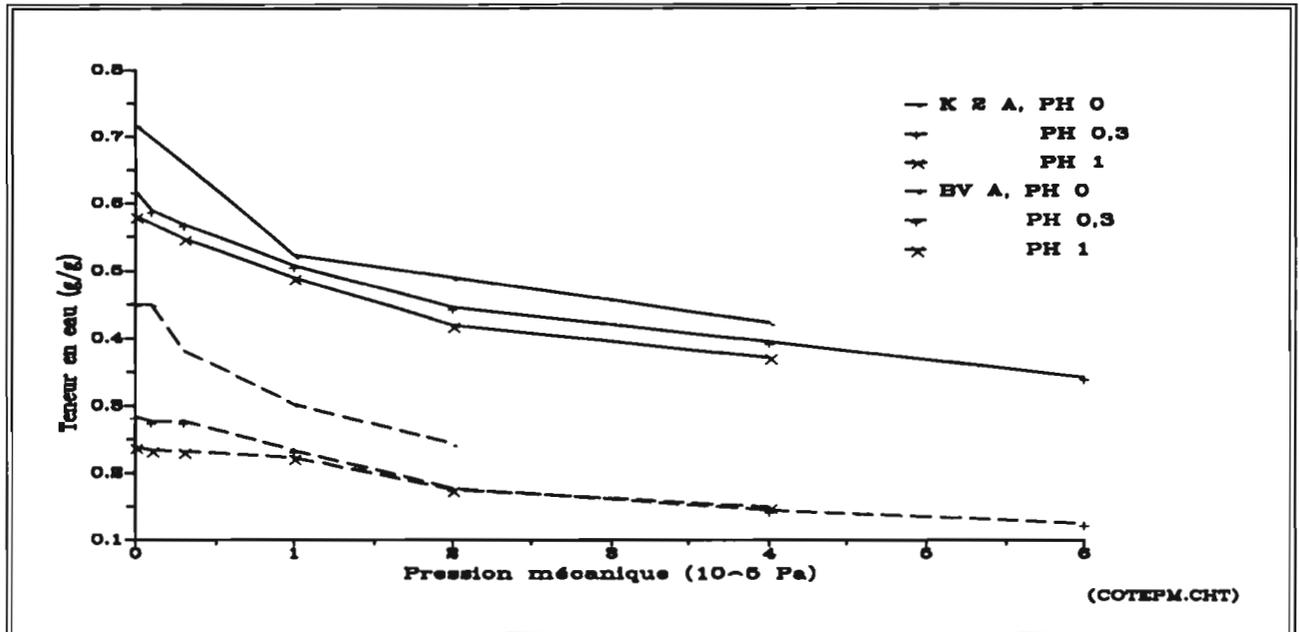
*Dans ce chapitre, seront envisagés les résultats obtenus sur chacun des matériaux soumis, à partir de cet état initial, à une contrainte mécanique de type oedométrique.*

*Il s'agira de suivre, de la même façon que dans le chapitre précédent, les évolutions de la teneur en eau, du volume massique total et de ses sous-volumes.*

## 51 - COMPORTEMENT HYDRIQUE DES MATERIAUX SOUMIS A UNE CONTRAINTE DE TYPE OEDOMETRIQUE

### 511 - Evolution des teneurs en eau en fonction des pressions mécaniques appliquées

Deux types de matériaux, K 2 A et BV A, ont été préparés à trois pressions hydriques initiales (PH 0, PH 0,3 et PH 1) et soumis à des compressions oedométriques progressives. Leurs teneurs en eau ont été mesurées à chaque étape de la compression. La figure 11 montre l'évolution de ces teneurs en eau.



**FIGURE 11 : COMPRESSION OEDOMETRIQUE**

Evolution des teneurs en eau de la kaolinite de St-Austell et du B de Versailles, 2 mm, séchés air, à différents états hydriques initiaux, soumis à des contraintes mécaniques

Le comportement apparaît globalement de nature identique entre les deux matériaux testés, mais il est fonction de la teneur en eau initiale, c'est à dire en fait de l'état énergétique de l'eau dans le matériau. Ce comportement devient commun à partir d'une pression mécanique de  $10^5$  Pa, pour BV A comme pour K 2 A.

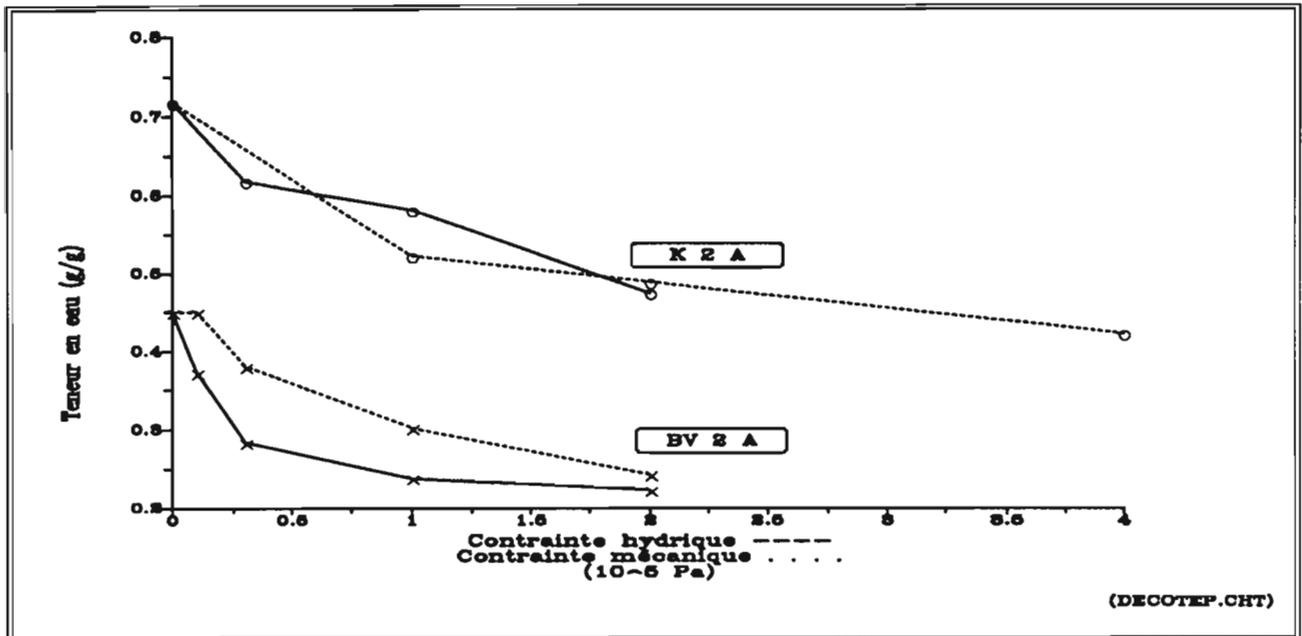
### 512 - Rôle du type de contrainte sur le comportement hydrique des matériaux

A la suite des travaux de AZZAOUÏ (1988), il nous a semblé intéressant de comparer les effets d'une contrainte hydrique et d'une contrainte mécanique sur la teneur en eau des deux matériaux testés, dont l'un est commun, tout au moins sur le plan de sa nature : la kaolinite de St-Austell. A cet effet, la figure 12 montre les évolutions comparées de ces teneurs en eau en fonction du type de pression appliquée pour K 2 A et BV A à l'état initial PH 0.

#### **5121 - Résultats**

Pour K 2 A, l'examen des courbes montre des teneurs en eau globalement identiques entre pression hydrique et pression mécanique. Les écarts relatifs entre les deux courbes, variables dans un sens ou dans un autre, sont peu élevés et ne sont pas significatifs.

Pour BV A, les teneurs en eau obtenues après application d'une contrainte oedométrique sont plus élevées que celles mesurées par application d'une contrainte hydrique, tout au moins jusqu'à une pression de  $2.10^5$  Pa, point pour lequel les deux teneurs deviennent très proches.



**FIGURE 12 : DESHYDRATATION ET COMPRESSION OEDOMETRIQUE**  
 Evolutions comparées des teneurs en eau de la kaolinite de St-Austell et du B de Versailles, 2 mm, séchés air, à l'état initial PH 0, en fonction du type de contrainte appliquées : hydrique ou mécanique

### 5122 - Discussion

Les résultats pour K 2 A concordent avec ceux de AZZAOUÏ (1988) pour le même matériau, à savoir que les pressions mécaniques et hydriques conduisent à des teneurs en eau identiques. Le comportement de BV A se rapproche du deuxième type décrit par AZZAOUÏ pour la Montmorillonite du Wyoming Ca,  $\text{CaCl}_2 10^{-3}\text{M}$ , c'est à dire avec  $w_{\text{PM}} > w_{\text{PH}}$ .

Rappelons tout d'abord que l'eau chassée par l'application des deux types de contraintes ne peut s'évacuer que par la base de l'appareillage, et par l'intermédiaire d'un filtre de très grande perméabilité (millipore pour la pression hydrique, grille très fine pour la pression mécanique). Rappelons aussi que les teneurs en eau ont été mesurées après 24 heures d'équilibre pour les pressions hydriques, après 5 minutes de pression mécanique.

La différence essentielle entre les deux contraintes se situe d'abord au niveau du mode de déformation imposé à l'échantillon :

- retrait multi-directionnel avec la pression de succion, le retrait vertical pouvant être seul mesuré ;
- retrait monodimensionnel vertical pour la pression mécanique appliquée dans un tube rigide, ainsi qu'au niveau des constituants sur lesquels la contrainte s'applique :
- eau pour la pression hydrique,
- matériau pour la pression mécanique.

Dans notre cas, la dessiccation a entraîné principalement un retrait vertical, même si, pour K, de faibles retrait latéraux ont pu être observés visuellement, ce qui n'a pas été le cas pour BV qui, rappelons-le, avait subi, lors de l'humectation, un gonflement (à l'inverse de la kaolinite). Tout se passe donc comme si, globalement, les deux types de contraintes avaient provoqué le même effet monodimensionnel.

Pour K, l'effet commun provoque des comportements hydriques équivalents. Pour BV, ce comportement dépend du type de contrainte appliquée : ainsi, le fait de trouver systématiquement plus d'eau sous contraintes mécaniques montre que, probablement, le type de déformation joue un rôle sur le comportement et qu'il permet aux forces capillaires de s'exercer ; la pression mécanique vaincrait les forces de cohésion à courte distance, en particulier existantes dans la phase smectitique de BV. Par contre, le comportement de K serait indépendant du type de contrainte et "se comporterait comme un matériau plus idéalement déformable et se rapprocherait en quelque sorte des liquides pour lesquels les forces de frottement sont quasi nulles" (AZZAOUÏ, 1988).

## 5123 - Conclusions

La compression oedométrique laisse nulle la pression interstitielle de l'eau à l'équilibre, et donc la contrainte totale est égale à la pression mécanique (contrainte effective). La contrainte hydrique (contrainte totale) est, elle, nulle à la périphérie de l'échantillon, et donc la contrainte effective est égale à la pression interstitielle. A intensité de contrainte donnée, la contrainte effective est la même quelle que soit la nature de cette contrainte.

**On devrait donc avoir un comportement identique, indépendant du type de la contrainte, par application de la théorie de TERZAGHI (cf. chapitre I), qui dit que la déformation d'un échantillon est due à la contrainte effective si le matériau est saturé d'eau, ce qui serait pratiquement notre cas puisque les essais ont été réalisés sur les matériaux à PH 0.**

Or ce n'est pas le cas ici, et, comme AZZAOUÏ (1988), nous dirons qu'il faut aussi tenir compte du mode de déformation et du type de la contrainte appliquée, mais qu'en tout état de cause, **la théorie de TERZAGHI est directement applicable à des matériaux comme la Kaolinite de St-Austell, pour lesquels les forces de frottement internes peuvent être considérées comme négligeables.**

D'autre part, dans la contrainte hydrique, le potentiel de l'eau dans l'échantillon est lié à l'intensité de la pression et à la composante matricielle de l'activité de l'eau  $a_w$  (cf. chapitre I). Dans la contrainte oedométrique, l'eau de l'échantillon est en équilibre avec la pression atmosphérique lors de l'installation de l'équilibre (action sur le solide seul et eau à la face inférieure de l'échantillon en contact avec cette pression atmosphérique). La composante matricielle de l'activité de l'eau est très voisine de 1 et indépendante de l'intensité de la pression appliquée.

L'état de l'eau dans les échantillons n'est donc pas le même quand il s'agit d'une contrainte hydrique ou mécanique. Par contre, le comportement hydrique de l'échantillon peut être semblable dans les deux cas, ce qui est montré pour la kaolinite. Les résultats du BV montrent par contre que ce comportement est aussi fonction de la nature du matériau

Enfin, il est possible qu'intervienne aussi la localisation de l'eau dans les matériaux :

- \* pour K, dans des sites identiques, quel que soit le type de contrainte,
- \* pour BV, dans des sites différents selon la contrainte.

## 52 - COMPORTEMENT VOLUMIQUE DES MATERIAUX SOUMIS A UNE CONTRAINTES DE TYPE OEDOMETRIQUE

### 521 - Evolution des volumes massiques totaux en fonction de la pression appliquée

#### 5211 - Courbes moyennes et courbes lissées

Les figures 13 et 14 présentent les courbes obtenues en utilisant les moyennes (A) des mesures du volume massique apparent de l'échantillon ainsi que celles réalisées à partir des opérations de lissage (B) de ces mêmes résultats (cf supra, paragraphe 33),

- \* en fonction de la pression mécanique appliquée sur les échantillons par l'intermédiaire du piston,
- \* pour chaque état hydrique initial,
- \* pour les trois types d'échantillons de Kaolinite de St-Austell (K 0 E, K 2 E et A), et les deux types d'échantillons de l'horizon B de Versailles (BV E et BV A).

Ces pressions mécaniques ont été appliquées progressivement et continûment, chacune pendant un temps donné de 5 minutes. Après chaque compression, la hauteur de l'échantillon a été notée. La valeur du volume massique a été calculée selon la formule donnée au paragraphe 25.

En ce qui concerne les courbes de moyennes,

- \* en premier lieu, toutes les courbes présentent le même aspect, quels que soient le matériau, la taille de ses agrégats, ou le type de séchage préalable,
- \* la Kaolinite 0,1-0,5 mm séchée étuve présente un étalement des courbes en terme de volume massique plus important que tous les autres échantillons,
- \* pour K 0 E et K 2 E, la courbe tracée à partir de l'état hydrique initial PH 0 (état saturé) est bien différenciée des autres courbes, ce qui n'est pas le cas des échantillons K 2 A et BV E ou A.

\* enfin, les courbes PH 0,3 ou PH 1 donnent les plus faibles volumes massiques. Cette remarque est valable pour tous les échantillons, y compris ceux qui ne présentent pas, au contraire de K 0, de minimum dans la courbe d'évolution volumique à la déshydratation.

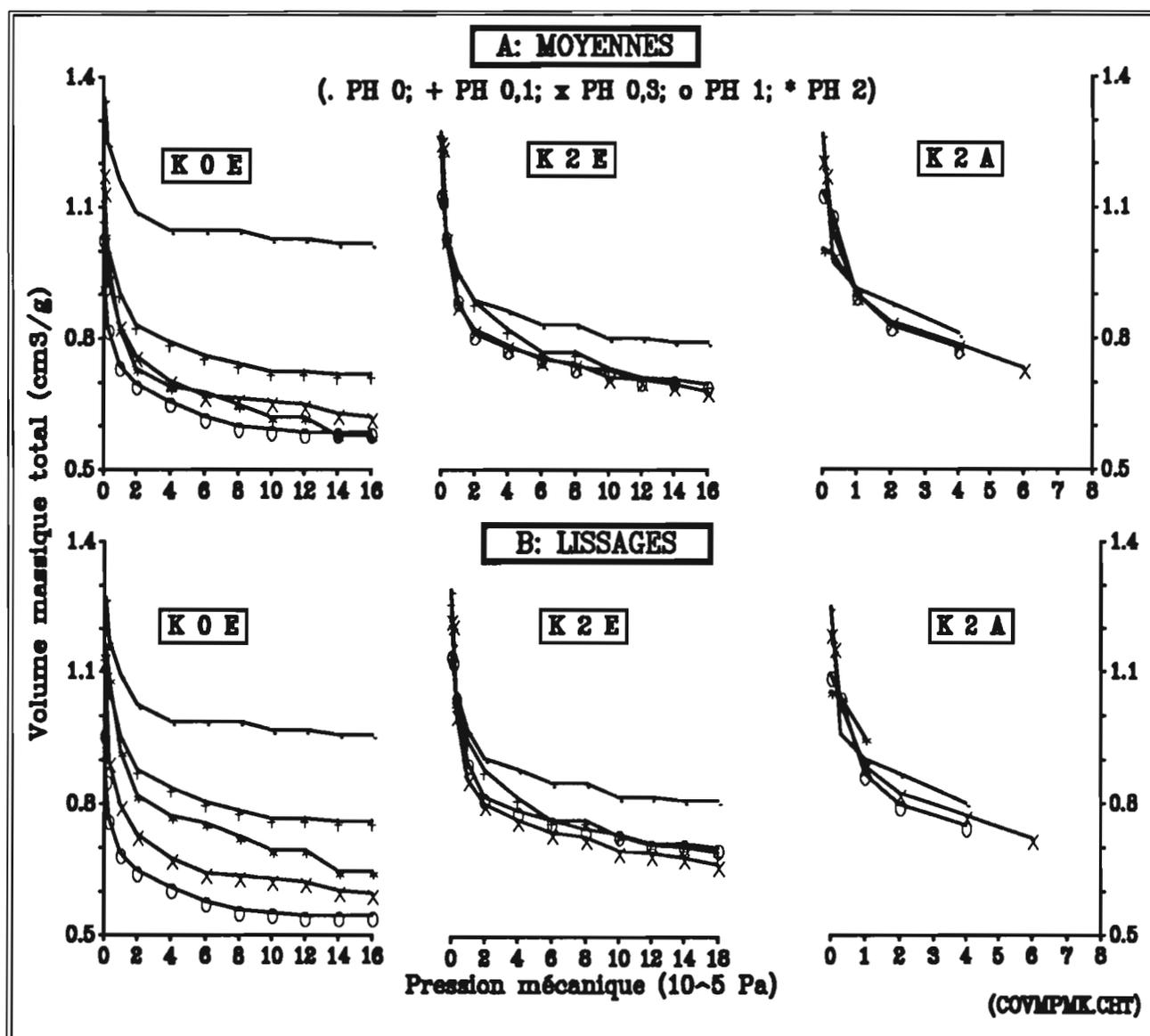
En ce qui concerne les courbes de lissage,

\* l'effet de la procédure de lissage dans l'étalement selon l'ordonnée et dans l'ordonnancement des courbes obtenues,

\* le maintien de la position particulière de la courbe PH 0 pour K 0 E et K 2 E,

\* le maintien de l'étalement des courbes K 0 E.

\* le maintien, voire l'accentuation, de la position minimale des courbes de compression correspondant aux situations initiales PH 0,3 et PH 1.

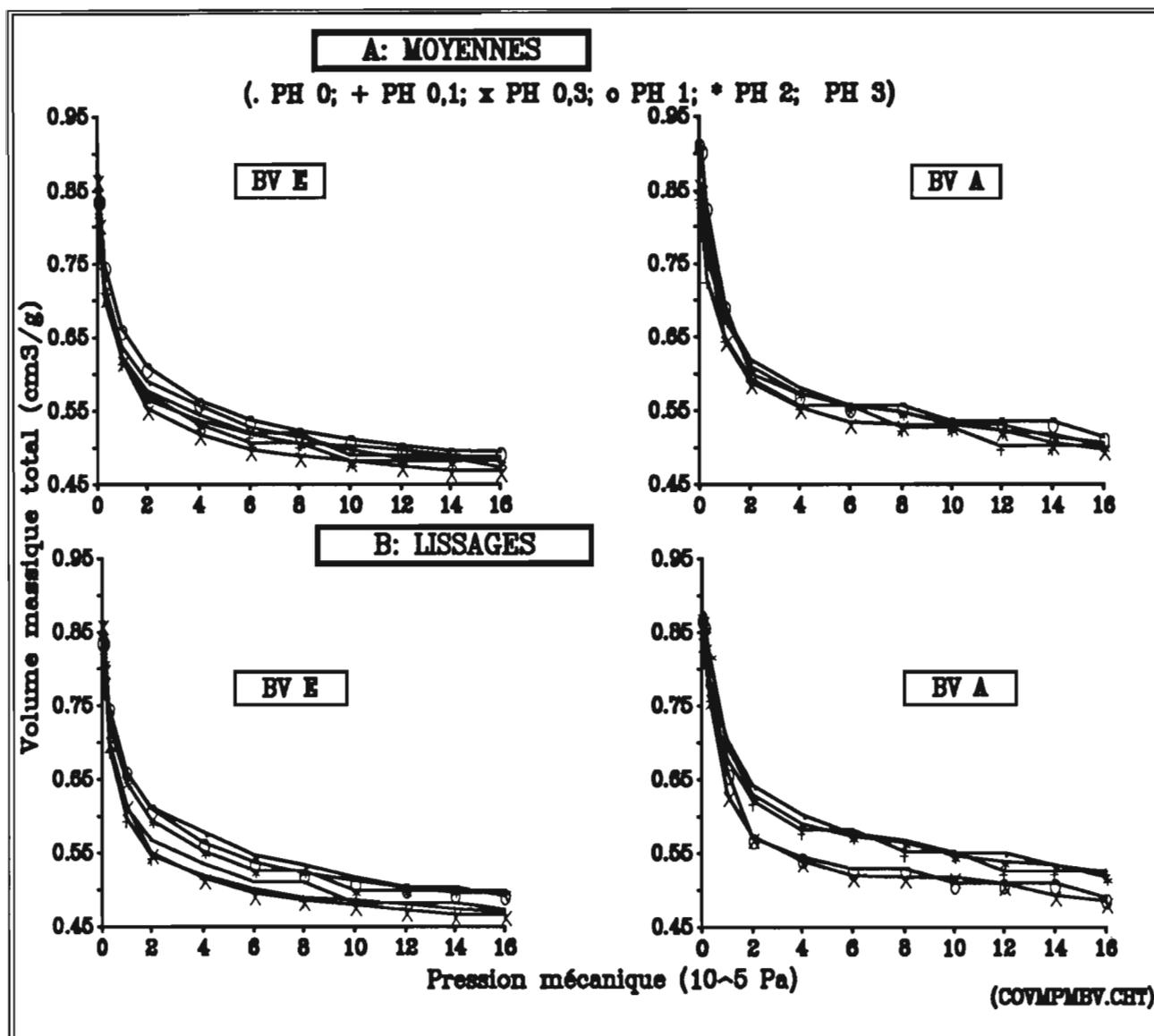


**FIGURE 13 : COMPRESSION OEDOMETRIQUE**

Evolution des volumes massiques totaux des échantillons de Kaolinite de St-Austell, à différents états hydriques initiaux, en fonction des contraintes mécaniques appliquées

A : Moyennes ; B : Lissages

En conclusion, les échantillons étudiés présentent un maximum de compressibilité pour des états hydriques initiaux correspondant à une pression hydrique de 0,3-1 bar ( $p^F = 2,5-3$ ). A de plus fortes ou de plus faibles contraintes, les volumes massiques après compaction sont supérieurs.



**FIGURE 14 : COMPRESSION OEDOMETRIQUE**

Evolution des volumes massiques totaux des échantillons du B de Versailles, à différents états hydriques initiaux, en fonction des contraintes mécaniques appliquées :

A : Moyennes ; B : Lissages

### 5212 - Approche statistique des courbes obtenues

La similitude des courbes quel que soit l'échantillon, soulignée ci-dessus, nous a amené à nous interroger sur le fait de savoir si une équation mathématique simple ne pouvait pas, à elle seule, traduire le phénomène observé.

Une étude statistique de type recherche de régression sur chaque série de mesures, par échantillon, a été réalisée dans le domaine d'étude.

Ces courbes sont du type :  $VMt = A_5 * PM^{A_6}$   
 avec  $VMt$  = volume massique total à une pression mécanique  $PM$   
 $PM$  = pression mécanique appliquée en  $10^5$  Pa ou en bars.  
 $A_5$  et  $A_6$  sont des coefficients dont la valeur est fournie par l'étude statistique.

Les données statistiques, appuyées sur les valeurs lissées, sont regroupées dans le tableau 5.

**TABLEAU 5 : COMPRESSION OEDOMETRIQUE**

Données statistiques (n, coeff. de corrélation r, r<sup>2</sup>, coeff. de l'équation, erreurs type) de l'équation de régression traduisant la variation des volumes massiques de chaque échantillon ou du matériau en fonction de la pression mécanique appliquée. Valeur du VMt à une compression de 1 bar.

Matér	PH	n	r (-)	r <sup>2</sup>	E. typ estim	Coeff A <sub>5</sub>	Err. type	Coeff A <sub>6</sub> (-)	Err. type	VMt à 10 <sup>5</sup> Pa
K 0 E	0	12	0,779	0,968	0,02	1,097	0,007	0,055	0,003	1,094
	0,1	12	0,835	0,993	0,01	0,943	0,005	0,084	0,002	0,955
	0,3	12	0,778	0,987	0,02	0,805	0,009	0,113	0,004	0,797
	1	12	0,787	0,995	0,01	0,689	0,004	0,092	0,002	0,688
	2	12	0,854	0,987	0,02	0,912	0,009	0,117	0,004	0,921
K 2 E	0	12	0,772	0,990	0,01	0,978	0,005	0,072	0,002	0,973
	0,1	12	0,828	0,992	0,02	0,940	0,006	0,107	0,003	0,949
	0,3	12	0,781	0,982	0,03	0,899	0,01	0,110	0,005	0,861
	1	12	0,815	0,990	0,02	0,909	0,006	0,096	0,003	0,900
K 2 A	0	12	0,790	0,942	0,04	0,906	0,02	0,090	0,01	0,902
	0,3	12	0,864	0,998	0,01	0,892	0,004	0,113	0,003	0,887
	1	12	0,892	0,987	0,02	0,884	0,01	0,129	0,01	0,869
	2	12	0,983	0,999	-	0,952	0,02	0,076	0,02	0,952
K		156	0,679	0,587	0,13	0,902	0,01	0,095	0,007	-
BV 2 E	0	12	0,836	0,999	0,007	0,661	0,002	0,105	0,001	0,660
	0,1	12	0,750	0,977	0,03	0,615	0,01	0,106	0,005	0,598
	0,3	12	0,785	0,991	0,02	0,613	0,007	0,109	0,003	0,616
	1	12	0,827	0,999	0,006	0,657	0,002	0,106	0,001	0,662
	2	12	0,809	0,993	0,01	0,642	0,006	0,100	0,003	0,647
	3	12	0,788	0,989	0,02	0,623	0,007	0,104	0,004	0,613
BV 2 A	0	12	0,830	0,998	0,008	0,696	0,003	0,099	0,002	0,703
	0,1	12	0,807	0,992	0,02	0,680	0,006	0,098	0,003	0,678
	0,3	12	0,773	0,978	0,03	0,644	0,01	0,105	0,005	0,629
	1	12	0,766	0,972	0,03	0,660	0,01	0,112	0,006	0,660
	2	12	0,823	0,988	0,02	0,693	0,008	0,103	0,004	0,695
BV		132	0,777	0,922	0,05	0,653	0,005	0,105	0,003	-

\* Les coefficients de corrélation sont tous supérieurs à 0,75 et les r<sup>2</sup> sont tous supérieurs à 0,96 (à l'exception du calcul sur l'ensemble des données concernant K, montrant une certaine dispersion).

\* Les valeurs de A<sub>5</sub> sont très proches des valeurs expérimentales du VMt à compression 1 bar. Cette observation est confirmée statistiquement, en utilisant toutes les données expérimentales :

- ainsi, pour K 0, avec n = 26, la relation est linéaire entre A<sub>5</sub> et VM<sub>1</sub> avec un coefficient de corrélation de 0,991,

- pour BV A, avec n=18, la relation linéaire a un coefficient de corrélation de 0,954,

- pour tous les autre échantillons, les corrélations sont aussi significatives;

- si on regroupe l'ensemble des données, tous types d'échantillons confondus, le coefficient de corrélation entre A<sub>5</sub> et VM<sub>1</sub> passe à 0,995

\* Le coefficient A<sub>6</sub> est très proche de la valeur (-0,1). Cette valeur est confirmée statistiquement en utilisant toutes les données expérimentales obtenues :

- pour K 0, avec n = 26, A<sub>6</sub> moyen = -0,097 avec un écart-type et une variance de 0,024,

- pour BV A, avec n=18, A<sub>6</sub> moyen = -0,101 avec un écart-type et une variance de 0,02

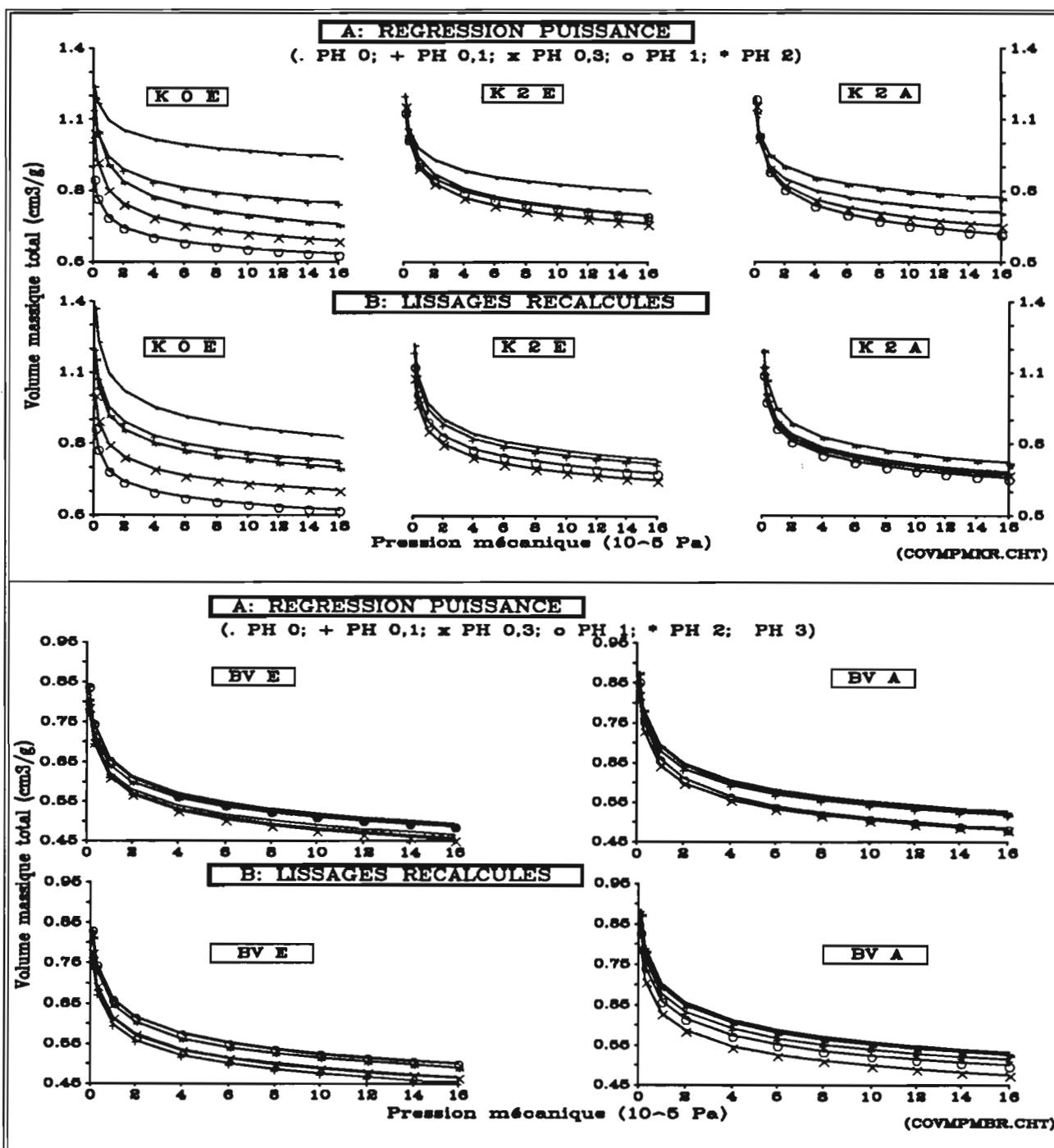
- pour l'ensemble des données confondues, A<sub>6</sub> moyen = -0,1, écart type et variance de 0,02.

Cela correspond donc, dans notre cas, à l'équation suivante :

$$VMt_{PM} = VMt_{PM1} + PM^{-0.1}$$

dans laquelle  $VMt_{PM1}$  est le volume massique apparent de l'échantillon à la pression mécanique de  $10^5$  Pa (1 bar)

Dans les figures 15 et 16 sont présentées les courbes de régression statistique présentée ci-dessus (A) et celles issues de l'équation trouvée (B) pour K (fig.15) et pour BV (fig.16).



**FIGURES 15 et 16 : COMPRESSION OEDOMETRIQUE**

Evolution des volumes massiques totaux des échantillons de kaolinite de St-Austell (fig.15) et du B de Versailles (fig.16), à différents états hydriques initiaux, en fonction des contraintes mécaniques appliquées. A : régression calculée ; B : lissages recalculés par l'équation déterminée

### 5213 - Application de l'équation à d'autres matériaux

Les seules données disponibles correspondent à des expérimentations faites à la Station de Science du Sol de l'INRA de Versailles sur un latosol du Brésil, avec une procédure un peu différente de la nôtre. Les résultats suivent de manière très significative l'équation que nous venons de présenter, avec des coefficients de corrélation compris entre -0,75 et -0,94 et des  $r^2$  et  $r^2$  corrigés tous supérieurs à 0,92.

Il est toutefois hors de question de dire, avec cette seule "vérification" extérieure que l'équation est d'utilisation générale. Nous pouvons cependant souligner que nous avons vérifié qu'elle s'appliquait à un minéral argileux "neutre", la Kaolinite de St-Austell, à un échantillon de latosol largement mais pas seulement kaolinitique, mais aussi à un échantillon de sol à comportement smectitique, c'est à dire à argile gonflante et active sur le plan des charges.

### 5214 - Transformation de l'équation

Nous avons cherché, comme pour l'étude de la déshydratation, à relier cette équation avec des données classiques de la physique des sols. Si l'on applique une transformation log décimal de cette équation, on obtient :  $\log VM_{t_{pM}} = \log VM_{pM1} - 0,1 * \log PM$

Cette pression mécanique, exprimée en  $10^5$  Pa, peut aussi s'exprimer en hauteur en cm d'une colonne d'eau placée au dessus de l'échantillon, et qui le comprimerait par l'intermédiaire d'un piston. Dans ce cas, on retrouve une notion équivalente à celle de SCHOFIELD (1935) pour le pF. Si nous posons  $pM = \log PM$  (par analogie avec pF : on introduit ainsi la notion d'**équivalent-pF** pour les pressions mécaniques), et  $VM_{t_{pM}} = VM_{t_{pM}}$ , ainsi que  $VM_{pM3} = VM_{pM1}$ , on obtient alors l'équation suivante :

$$\log VM_{t_{pM}} = \log VM_{pM3} - 0,1 pM$$

Rappelons d'autre part que nous avons établi dans le chapitre IV une équation reliant pF et teneur en eau à ce pF lors de la déshydratation :  $VM_w(pF) = VM_w(pF=3) - \beta * pF$ . On constate que ces deux équations ont la même forme, aux facteurs près et que ce sont des droites  $VM_w(pF) = f(pF)$  et  $\log VM_{t_{pM}} = f(pM)$ .

### 5215 - Conclusions

Nous venons de voir qu'il est possible de décrire l'évolution du volume massique apparent de matériaux divers par leur nature et par leur forme, au moyen d'une équation très simple, ne faisant intervenir qu'une seule mesure oedométrique. **A partir des résultats précédents, il apparaît que, de la seule mesure du volume occupé par un de nos matériaux testés dans un oedomètre, à une pression unique qui est celle de  $10^5$  Pa, on peut retrouver la courbe complète de l'évolution du volume massique.**

Cette "loi de comportement" semble, en outre, totalement indépendante d'un certain nombre des caractéristiques des échantillons, auxquelles nous nous sommes attachés jusqu'à présent :

- \* **la taille des agrégats constituant le massif**, en particulier entre massif trié fin (K 0 à 0,1-0,5mm) et massif de mélange de tailles (K 2 à 0,1-2mm),
- \* **la nature de la première dessiccation**, à l'étuve (pF = 7) ou à l'air (pF = 6),
- \* **mais surtout de la teneur en eau initiale** de ces échantillons, c'est à dire de l'état énergétique de cette eau dans et autour des agrégats avant toute compression oedométrique,
- \* **et enfin, de la nature même du matériau testé**: argile pure ou sol, matériau simple ou de constituants hétérogènes, matériau gonflant ou non, matériau neutre ou actif.

**Il est donc possible de prendre un matériau, de lui appliquer une seule compression, d'en mesurer son volume massique apparent, et d'obtenir la courbe complète de son comportement dans les conditions de la procédure utilisée ici.**

Ces premières conclusions, issues des seules observations pratiquées dans le cadre de ce mémoire, et qui ne peuvent donc être considérées comme un "modèle", mais plutôt comme une première approche de celui-ci, doivent être confirmées dans des recherches plus approfondies.

## 522 - Evolution des volumes massiques de vides, d'eau et d'air

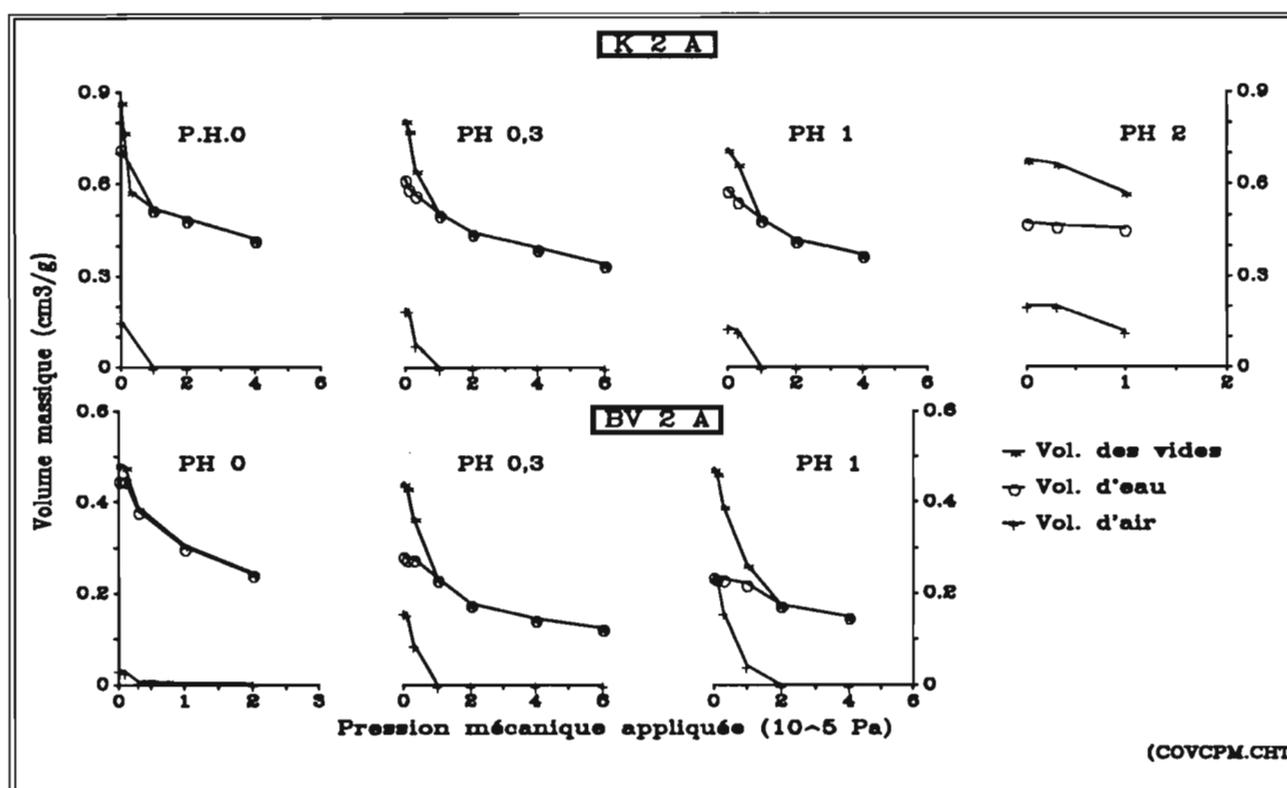
Les courbes présentées figure 17 traduisent les évolutions des volumes des vides, d'eau et d'air des matériaux en fonction de la pression mécanique appliquée, à diverses pressions hydriques initiales, pour la kaolinite et le B de Versailles séchés à l'air.

### 5221 - La kaolinite de St-Austell

Jusqu'à l'échantillon correspondant à l'état énergétique de l'eau à une pression hydrique de  $10^5$  Pa, les courbes présentées pour K 2 A sont très semblables et caractérisées par :

- des courbes de VMv et VMw confondues pour les PH initiales de 0, 0,3 et  $1 \cdot 10^5$  Pa ;
- des courbes de VMA s'annulant pour la valeur de pression mécanique appliquée de  $10^5$  Pa (1 bar).

Nous retrouvons donc pour la Kaolinite la description qu'avait faite AZZAOUI (1988) de l'évolution de l'indice des vides d'agrégats secs au cours du tassement. Nous avons pratiqué ces mêmes mesures sur les différents échantillons à l'état sec, donc sans réhumectation, et les résultats obtenus sont quasiment identiques à tout ce que nous venons de décrire, y compris l'application à ces échantillons de l'équation de comportement sous compression. Ces échantillons à un état hydrique initial particulier ne rentrant pas tout à fait dans le cadre de cette étude, nous n'avons pas fait figurer leurs résultats expérimentaux, mais il nous a semblé important de souligner leur similitude avec ce que nous avons décrit jusqu'à présent.



**FIGURE 17 : COMPRESSION OEDOMETRIQUE**

Evolution des volumes des vides, d'eau et d'air de la Kaolinite de St-Austell, 2 mm, séchés air, à différentes contraintes hydriques initiales, en fonction des contraintes mécaniques appliquées

Dans son examen de l'importance de l'état de départ pour ses expérimentations, AZZAOUI (1988) indique que le tassement introduit un réarrangement des agrégats dont l'empilement devient de plus en plus serré, peut engendrer une déformation des agrégats initiaux mais pas leur rupture, et qu'à une pression de 10 bars, les massifs d'agrégats 0,5-1 mm ont une porosité interagrégats de taille de pores voisine de  $40 \mu\text{m}$ , ceux-ci devenant plus petits quand le massif est composé d'agrégats plus petits.

## 5222 - L'horizon B de Versailles

Malgré la gamme expérimentale plus réduite, nous pouvons constater ici un comportement plus évolutif, dépendant à première vue de l'état hydrique initial. En effet, dans le cas du BV A, les volumes de vides initiaux sont quasiment constants, tandis que les volumes d'eau et d'air varient de manière symétrique, ce qui est logique (cf chapitre précédent).

Le résultat en est que l'état de saturation hydrique n'est retrouvé après compression mécanique qu'après des pressions de plus en plus élevées avec l'augmentation de la valeur de la pression hydrique appliquée initialement. Cependant, ces courbes de variation de volume d'air semblent rester pratiquement parallèles entre elles, tout au moins dans les limites de notre expérimentation.

### Conclusion

Nous sommes donc à nouveau face au rôle que peuvent jouer les forces agissant sur la rétention de l'eau, et en particulier celles directement liées aux particules argileuses. En effet, si sur le plan de la porosité inter-agrégats, nous avons deux matériaux dont la forme sur le plan du tri granulométrique est identique, ces matériaux sont de nature différente, par leur teneur en argile, par la nature de la ou des argiles qui le composent. Les seuils de comportement peuvent donc être différents.

## 523 - Courbes de déshydratation et courbes de compression des matériaux

Nous avons essayé de relier sur un même graphique (figure 18) le comportement volumique des matériaux en déshydratation à celui au cours de la compression oedométrique. Les courbes sont en fait une représentation de la contrainte totale définie par TERZAGHI (cf. chap. I) :

$$\sigma = \sigma' + u$$

On observe d'abord la tendance générale au regroupement des courbes, quelles que soient leurs origines, sur un petit nombre, en général 2 au maximum, de "lignes de force". Cette tendance, très nette pour K 2 A et BV E, est encore très sensible pour K 2 E et BV A. Ce qui, d'autre part, est tout à fait notable, c'est qu'il semble que ces deux groupes ne soient pas les mêmes pour chaque échantillon : seule la courbe correspondant à PH 0,3 se retrouve systématiquement dans le groupe "inférieur". C'est presque le cas aussi pour la courbe PH 1, sauf pour BV E où elle se retrouve dans le groupe supérieur. À l'inverse, on retrouve quasi systématiquement (sauf pour K 2 A) la courbe PH 0 dans le groupe "supérieur", dans lequel elle est même seule pour K 2 E. Pour K 0, si les courbes sont très étalées dans la dimension volumique pour les pressions faibles à moyennes, on retrouve à partir de 10 bars les tendances précédemment décrites.

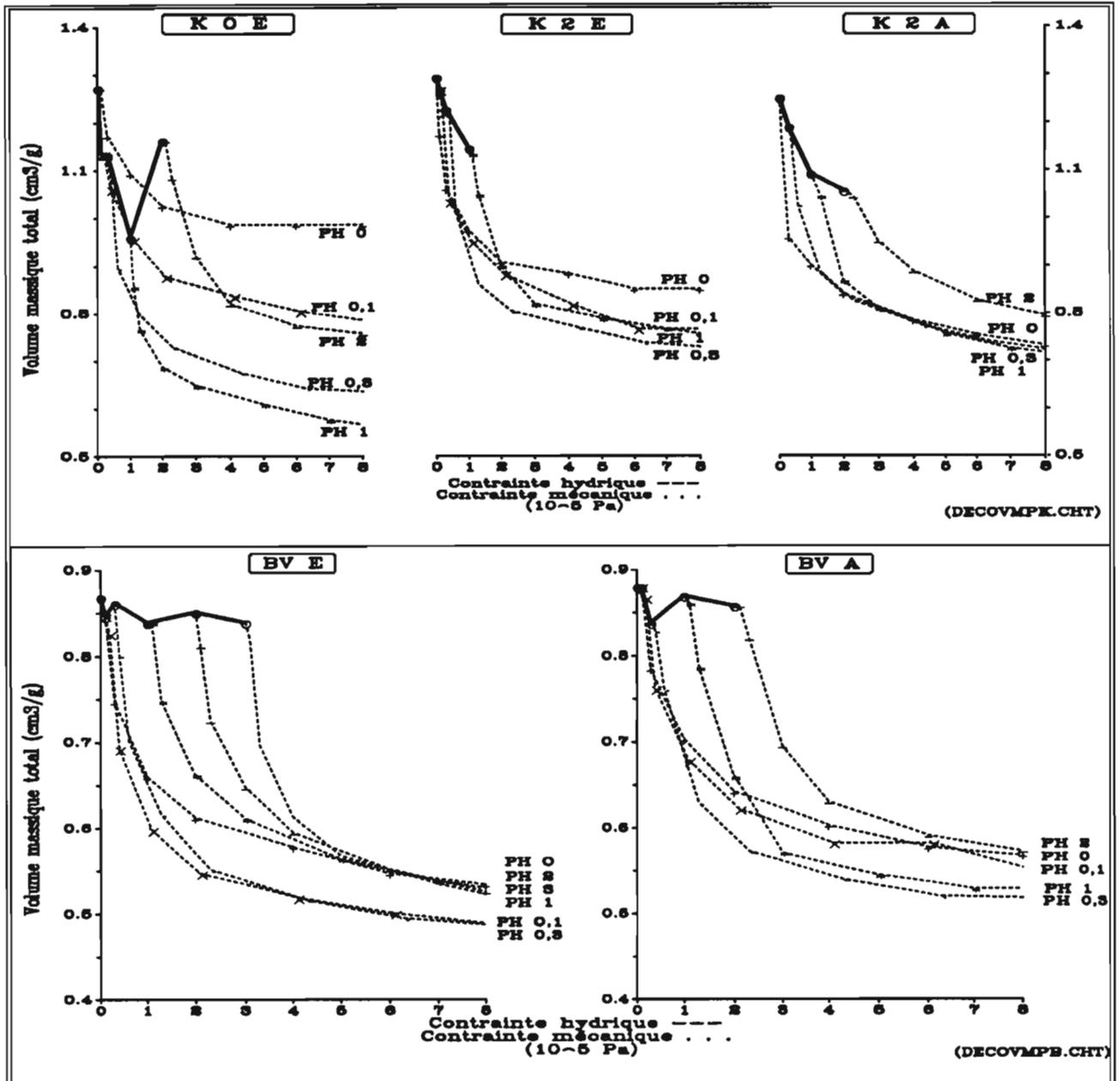
On pourrait donc dire que sous compression oedométrique, les matériaux présentent un comportement de compression potentiellement maximale pour deux états hydriques initiaux qui correspondent à des échantillons soumis à  $p^F = 2,5$  et  $p^F = 3$  en tubes de TESSIER, sans pour autant dire qu'ils sont les seuls, ce qui confirme, sous une autre approche, ce qui avait été trouvé précédemment.

Ceci confirme que le comportement d'un matériau à la compression ne dépend pas de la contrainte initiale mais d'abord de son état hydrique initial et ensuite de ses caractéristiques intrinsèques (minéralogie, granulométrie, organisation sub macro- à macroscopique,...)

## 524 - Etude du comportement en fonction de l'état hydrique initial

La figure 19 montre l'évolution des volumes massiques totaux des échantillons en fonction de la teneur initiale en eau, à diverses pressions mécaniques appliquées. Elles montrent que les matériaux testés possèdent une compressibilité particulière.

Cependant, pour K et BV, les valeurs de teneur en eau sont très différentes : 0,5 et 0,2 g/g. La teneur en eau ne peut donc être considérée comme une variable importante du comportement. En revanche, ces deux teneurs en eau correspondent à des potentiels matriciels très similaires : 0,3-1 bar. En conséquence, c'est l'état de l'eau qui doit être considéré comme la variable essentielle du comportement. La contrainte mécanique ne fait qu'amplifier le phénomène, certainement en modifiant l'organisation du matériau, mais elle n'en gouverne pas les propriétés.



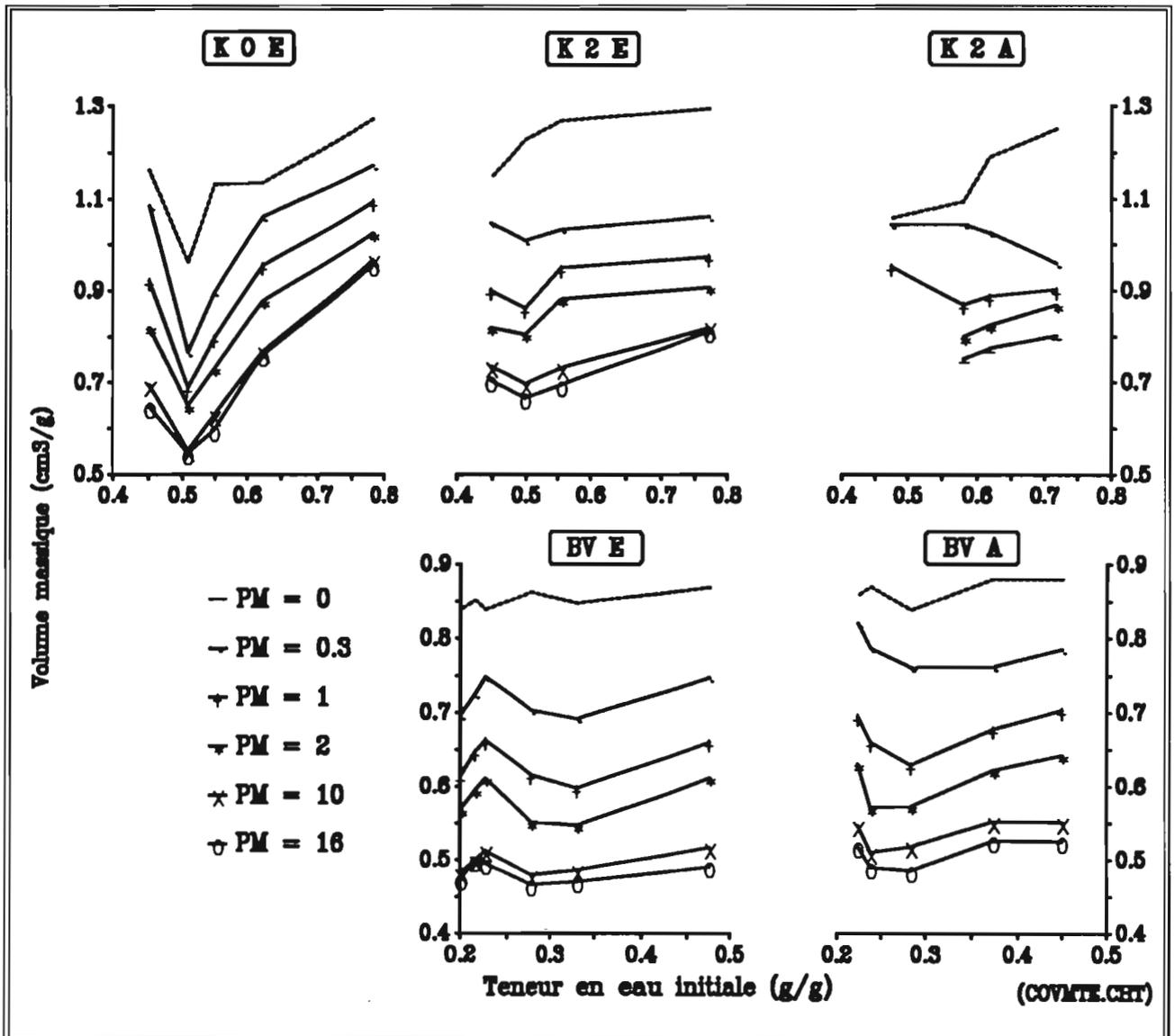
**FIGURE 18 : CONTRAINTE HYDRIQUE ET COMPRESSION OEDOMETRIQUE DES MATERIAUX**

Evolution des volumes massiques totaux de la kaolinite de St-Austell et du B de Versailles en fonction de la contrainte totale (hydraulique et mécanique) appliquée

## CONCLUSION

*En fait, dans la première partie de notre étude sur le comportement volumique d'échantillons soumis à une pression mécanique, nous avons décrit, analysé et montré une "loi" de comportement générale, en tant que loi dynamique de comportement des matériaux.*

*Dans la suite de ce chapitre, nous avons suivi une démarche progressive qui a abouti à une description et une analyse d'une succession d'états singuliers que nous avons essayé de relier entre eux pour approcher une compréhension plus globale de ce qui se passe.*



**FIGURE 19 : COMPRESSION OEDOMETRIQUE**  
 Evolution des volumes massiques totaux de la Kaolinite de St-Austell et du B de Versailles, à diverses pressions mécaniques appliquées, en fonction de la teneur en eau initiale sous contrainte hydrique

*En quelque sorte nous sommes passés du mouvement au ponctuel, du global au particulier, ce qui nous a permis de relier entre elles les diverses données dont nous disposions et que nous avons accumulées au cours de ce travail.*

*Cela nous a aussi permis de montrer, grâce à une sorte d'amplification des phénomènes par l'application d'une contrainte mécanique, qu'il semble y avoir un comportement commun de tous les échantillons étudiés lors de leur déshydratation, caractérisé, pour les faibles valeurs de pF que nous avons utilisées, par la succession d'une phase de rétraction et d'une phase de relaxation.*

## CONCLUSION GENERALE

*L'objectif de ce mémoire a été d'étudier le comportement sous contrainte hydrique puis mécanique de deux matériaux argileux, la kaolinite de Saint-Austell et l'horizon smectitique B du sol de Versailles.*

*A cet effet, les échantillons bruts ont été séchés soit à l'étuve, soit à l'air, puis broyés et tamisés pour obtenir des massifs d'agrégats de taille 0,1-0,5 mm d'une part, < 2mm d'autre part. Les massifs ont été réhumectés par capillarité jusqu'à hydratation maximale, puis déshydratés à différents potentiels de l'eau entre -0,1 et -3 bars. Ces matériaux ont constitué les états initiaux, à partir desquels des compressions mécaniques de type oedométrique, donc monodimensionnelles, couvrant une gamme allant de 0,1 à 16 bars ont été appliquées. Toutes les étapes de l'expérimentation, après quelques modifications de méthodologie et d'appareillage, ont été réalisées dans des dispositifs de filtration (TESSIER, 1979). Nous avons systématiquement mesuré les changements de volume ainsi que les variations du contenu en eau.*

### **Comportements hydriques**

*- Lors de la déshydratation, les résultats montrent que, pour l'ensemble des matériaux étudiés, mais aussi pour des pâtes argileuses comme pour des mottes, il est possible d'établir une relation générale du type*

$$VM_w(PH) = VM_w(PH1) - \alpha * \ln PH$$

*entre le volume massique d'eau ( $VM_w$ ) à une pression hydrique ( $PH$ ), comprenant deux variables caractéristiques du système qui sont*

*\* d'une part le volume massique d'eau à  $pF = 3$  (pression de 1 bar), qui dépend de la nature du matériau et du mode de préparation,*

*\* d'autre part un coefficient  $\alpha$ , relativement variable, semblant dépendre de l'existence d'une porosité inter-agrégats.*

*La conséquence directe en est que nous sommes amenés à distinguer et à pouvoir estimer deux grands types de porosité,*

*\* l'un lié à l'organisation externe des agrégats, entre eux et dépendant de l'état de préparation initial du matériau, donc une caractéristique macroscopique du système : la porosité inter-agrégats,*

*\* l'autre lié à l'organisation interne des agrégats et dépendant des caractéristiques de la matrice argileuse, donc à l'échelle microscopique du système : la porosité intra-agrégats.*

*Par ailleurs, les résultats de l'étude statistique montrent que la relation peut viser à une portée tout à fait générale. A cet effet, l'attention devra porter sur la signification du paramètre  $\alpha$ .*

- Lors de la compression oedométrique, les contenus en eau des échantillons montrent des évolutions comparables à celles des teneurs en eau obtenues lors de la déshydratation pour des valeurs identiques de pression.

### **Comportement rhéologique à la compression oedométrique**

En appliquant des pressions mécaniques de type oedométrique sur des échantillons et en étudiant les changements du volume apparent, nous montrons que ces variations de volume obéissent aussi, sur des massifs d'agrégats, à une loi générale, du type

$$VMt_{PM} = VMt_{PM1} * PM^{(-0,1)},$$

entre le volume massique total ( $VMt$ ) et la pression mécanique ( $PM$ ), dans laquelle

\* le coefficient  $VMt_{PM1}$ , volume massique total à une pression mécanique de 1 bar, est tout à fait dépendant de l'échantillon (type d'argile, taille des agrégats, intensité de la première dessiccation, teneur en eau initiale)

\* alors que le coefficient  $(-0,1)$  est tout à fait indépendant des caractéristiques du matériau et de la nature de sa préparation .

### **Déterminisme du changement de volume massique**

Nous venons de le voir, c'est uniquement par l'intermédiaire du volume massique total à 1 bar ( $VMt_{PM1}$ ) que les variations du volume massique apparent sont régies.

En fait,  $VMt_{PM1}$  dépend essentiellement du niveau de dessiccation initial : il est d'autant plus grand qu'il est occupé par des agrégats dont l'organisation inter-agrégats est plus lâche.

D'autre part, le volume massique total inclut la porosité inter-agrégats et la porosité intra-agrégats dans ses deux composantes principales (solide et vides ou pores, ces derniers étant remplis d'eau et/ou d'air). Plus la porosité inter-agrégats est grande, plus le volume massique  $VM$  est grand.

Le temps imparti à la réalisation de ce travail ne nous a pas permis d'analyser dans le détail cette valeur de  $VM$ . Il est certain que, dans le futur, l'attention devra essentiellement porter sur cette valeur de  $VM$ , dont l'analyse des composantes devrait nous permettre de mieux comprendre et d'affiner notre approche d'une modélisation du comportement des matériaux de sols.

### **Rôle de l'eau, localisation des forces d'hydratation**

Ce travail a été réalisé sur des matériaux préparés sous forme d'agrégats, dans lesquels on peut considérer que ces derniers sont à l'origine des deux types de porosité que nous avons déduits des résultats précédents : porosité inter- et intra-agrégats.

Dans le cadre des expérimentations, nous n'avons pas pu décrire la micro-structure des agrégats des matériaux, compte tenu du fait que nous n'avons pas réussi à inclure les échantillons. Ce fait nous amène à penser que leur espace poral n'est plus en continuité aussi parfaite qu'elle ne l'est normalement dans un échantillon non contraint mécaniquement.

Cependant, il est apparu tout au long de ce mémoire, qu'il existe un domaine tout à fait particulier d'énergie de rétention de l'eau dans lequel le matériau est plus particulièrement sensible aux contraintes : c'est le domaine allant de  $pF = 2,5$  à  $pF = 3$  (0,3 à 1 bar).

*On sait qu'il correspond, du point de vue de la loi de LAPLACE, à des pores de 5 à 1  $\mu\text{m}$ , et donc, en fait, d'après ce que l'on sait par rapport à l'organisation des agrégats (TESSIER, 1975, 1984 ; AZZAOUÏ, 1988, ...),*

*\* au remplissage complet de la porosité intra-agrégats d'une part,*

*\* et d'autre part au début du remplissage de la porosité inter-agrégats.*

*Il s'avère que les ménisques dans ces pores, à la périphérie des agrégats, jouent un rôle décisif dans la réorganisation et dans le rapprochement des agrégats.*

*Nous en concluons que, dans le comportement de ces matériaux argileux, les forces d'hydratation, en particulier les forces capillaires, gouvernent à la fois les variations des volumes et les caractéristiques de la rétention de l'eau.*

### **Rôle des contraintes mécaniques**

*Nos résultats montrent en définitive que le processus de réorganisation des sols est peu affecté par la compression mécanique dans les domaines des très fortes comme dans celui des très faibles teneurs en eau, mais que, par contre, il l'est dans le domaine particulier des potentiels de l'eau correspondant à  $pF = 2,5$  à 3.*

*Il apparaît donc que l'effet des contraintes mécaniques est relativement limité, et qu'il ne joue en fait qu'un rôle d'amplification de l'action des contraintes hydriques sur l'assemblage.*

*Le seul effet de cette action des contraintes mécaniques semble consister à contribuer au rapprochement des agrégats de telle façon que les forces capillaires vont pouvoir intervenir dans la compaction du système, sans en changer fondamentalement les propriétés.*

*Ceci nous amène aussi à considérer que c'est dans le domaine des succions 0,3-1 bar que les contraintes mécaniques, quelles que soient leur intensité, vont avoir un effet maximal et contribuer à la dégradation de l'organisation.*

### **Perspectives pour les sols**

*L'aptitude à la compaction du sol ne se ferait donc pas à un potentiel proche de celui correspondant à la capacité au champ, ou, à l'inverse, à une humidité qui serait déjà relativement faible. Cette perspective de résultat semble importante, mais implique une confirmation.*

*Enfin, il est certain que l'élément important qui ressort de cette étude est le rôle essentiel que joue l'état énergétique de l'eau, son potentiel, dans le sol, et non pas les simples valeurs de teneur ou de contenu en eau du sol. On sait qu'il conditionne l'état de saturation en eau et la diffusion des gaz, qu'il intervient sur la structuration du sol. Nous montrons que le potentiel de l'eau gouverne aussi l'essentiel des propriétés rhéologiques.*

## BIBLIOGRAPHIE

- A.I.S.S. (Association Internationale de Science du Sol) (1976) - Soil physics terminology. Bull. AISS (48) 16-22
- AZZAOUI M. (1988) - Comportement et organisation de matériaux argileux soumis à des contraintes hydriques et mécaniques. Rôle des différents types de forces d'hydratation. Thèse Univ. P. et M. Curie-Paris VI, 240 p.
- BISHOP A.W. (1959) - The principle of effective stress. Teknisk Ukeblad, 39, 859-863
- BISHOP A.W. and BLIGHT G.E. (1963) - Some aspects of effective stress in saturated and partly saturated soils. Geotechnique, Sept.
- BOURRIE G. et PEDRO G. (1979) - La notion de pF, sa signification physico-chimique et ses implications pédogénétiques. I : signification physico-chimique. Relations entre le pF et l'activité de l'eau. Science du Sol (4), 313-322
- BOURRIE G., TESSIER D. et PEDRO G. (1984) - Considération sur les phénomènes d'altérations dans les systèmes à eau liée ( $a_w < 1$ ). Int. Sci. Géol. Mém., 71, 25-33
- BRUAND A. (1985) - Contribution à l'étude de la dynamique de l'organisation de matériaux gonflants. Application à un matériau argileux d'un sol argilo-limoneux de l'Auxerrois. Thèse Dr. Spécialité Univ. Paris VII, 225 p.
- CAMARA L. (1982) - Comportement hydrique et propriétés de gonflement macroscopique de mélanges d'argiles. Thèse 3<sup>ème</sup> cycle, Univ. Paris VI, 155 p.
- FAURE A. (1978) - Comportement des sols au compactage : rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. Thèse Univ. Scientifique et Médicale de Grenoble, 137 p.
- FIES J.-C. (1978) - Porosité du sol : étude de son origine texturale. Thèse Univ. Louis Pasteur, Strasbourg, 139 p.
- GRIMALDI M. (1981) - Contribution à l'étude des tassements des sols : évolution de la structure d'un matériau limoneux soumis à des contraintes mécaniques et hydriques. Thèse ENSA Rennes, 220 p.
- GUERIF J. (1982) - Compactage d'un massif d'agrégats : effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. Agronomie, 2, (3), 287-294
- HILLEL D. (1971) - Soil and water. Physical principles and processes. Academic Press. New-York, 288 p.
- MONNIER G., STENGEL P. et FIES 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
- PARCEVEAUX P. (1980) - Etude microscopique et macroscopique du gonflement des sols argileux. Thèse Univ. Paris VI, 265 p.
- SCHOFIELD P.K. (1935) - The pF of water in soil. Trans. 3<sup>rd</sup> Int. Cong. Soil Science, (2), 37-48
- TESSIER D. (1975) - Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles. Thèse Ing. CNAM, Paris, 230 p.

TESSIER D. (1978) - Etude de l'organisation des argiles calciques. Evolution au cours de la dessiccation. *Ann. Agron.*, 29, (4), 319-355

TESSIER D. (1982) - Méthode d'approche de l'organisation des argiles et des matériaux argileux. Séminaire du Département de Science du Sol "Comportement physique et mécanique des sols", 43-55

TESSIER D. (1984) - Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la ré-humectation. Thèse Dr. ès-Sciences, Univ. Paris VII, 361 p., INRA Versailles Ed.

TESSIER D. et BERRIER J. (1979) - Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude du sol. Observation de sols humides soumis à différents pF. *Science du Sol*, (1), 67-82

TESSIER D., LAJUDIE A. et PETIT J.-C. (1991) - Relation between the macroscopic behaviour of clays and their micro-structural properties. *Applied Geochemistry* (sous presse)

TERZAGHI K. (1927) - Soil classification for fondation purposes. *Trans. 1st Int. Cong. Soil Science*, (4), 127-157

# PLAN DU MEMOIRE

PREAMBULE.....	2
SOMMAIRE.....	3
CONVENTIONS.....	4
INTRODUCTION.....	5
<b>I - GENERALITES : RAPPELS SUR L'ETAT ENERGETIQUE DE L'EAU DANS LE SOL ET SUR LES CONTRAINTES DEVELOPPEES</b>	
Introduction.....	7
11 - Etat énergétique de l'eau dans le sol	
111 - Définition générale.....	8
112 - Composantes du potentiel total de l'eau.....	8
1121 - Potentiel gravitaire	
1122 - Potentiel matriciel au sens large	
1123 - Potentiel osmotique - Cas d'une solution libre	
12 - Répartition des contraintes au sein d'un matériau	
121 - Rappels sur la théorie de TERZAGHI.....	9
1211 - Cas d'un sol saturé	
1212 - Cas d'un sol comportant trois phases : solide-eau-air	
122 - Applications.....	9
1221 - Valeurs de la contrainte effective dans les principaux cas	
1222 - Changements de l'état de contrainte et conséquences	
13 - Caractérisation de l'état de l'eau	
131 - Aspect général.....	10
132 - Rôle de l'histoire hydrique.....	11
14 - Contraintes développées dans les sols et domaine d'étude	
141 - Valeurs des composantes du potentiel de l'eau.....	11
142 - Valeurs des contraintes mécaniques.....	12
Conclusion.....	12
<b>II - MATERIAUX, METHODES ET APPAREILLAGES UTILISES</b>	
Introduction.....	13
21 - Les matériaux argileux : généralités	
211 - Définition minéralogique.....	14
212 - Organisation : système eau-argile.....	14
213 - Conséquences sur les types de porosité et sur l'eau associée.....	14
Conclusion.....	14
22 - Matériaux étudiés : généralités	
221 - La Kaolinite de Saint-Austell.....	14
222 - L'horizon B de Versailles.....	15
23 - Forme des matériaux étudiés	
231 - Définition des agrégats et conséquence de leur assemblage sur la porosité.....	15
232 - Préparations.....	16
2321 - La kaolinite	
2322 - Le B de Versailles	
24 - Fixation de l'état de contrainte et étude des échantillons	
241 - Contraintes.....	16
2411 - Contrainte hydrique : potentiel matriciel	
2412 - Contrainte mécanique	
242 - Appareillage choisi.....	16
243 - Etablissement de la contrainte hydrique.....	18
244 - Application d'une contrainte mécanique.....	18
Conclusion.....	18



## V - COMPORTEMENT DES MATERIAUX SOUS COMPRESSION OEDOMETRIQUE

Introduction.....	38
51 - Comportement hydrique des matériaux soumis à une contrainte de type oedométrique	
511 - Evolution des teneurs en eau en fonction des pressions mécaniques appliquées.....	39
512 - Rôle du type de contrainte sur le comportement hydrique des matériaux.....	39
5121 - Résultats	
5122 - Discussion	
5123 - Conclusions	
52 - Comportement volumique des matériaux soumis à une contrainte de type oedométrique	
521 - Etude du comportement en fonction de la pression appliquée.....	41
5211 - Courbes moyennes et courbes lissées	
5212 - Approche statistique des courbes obtenues	
5213 - Application de l'équation à d'autres matériaux	
5214 - Transformation de l'équation	
5215 - Conclusions	
522 - Etude du comportement en fonction de l'état hydrique initial.....	47
5221 - La kaolinite de Saint-Austell	
5222 - L'horizon B de Versailles	
Conclusion	
523 - Courbes de déshydratation et courbes de compression des matériaux.....	48
524 - Etude du comportement en fonction de l'état hydrique initial.....	48
Conclusion.....	49
CONCLUSION GENERALE.....	51
BIBLIOGRAPHIE.....	54
PLAN DU MEMOIRE.....	56
LISTE DES TABLEAUX.....	59
LISTE DES FIGURES.....	60
RESUMES FRANCAIS et ANGLAIS.....	4ème de couverture

## LISTE DES TABLEAUX

### CHAPITRE I :

<b><u>TABLEAU 1</u></b> : Niveaux énergétiques et modes d'expression des différents états de l'eau dans le sol, relation avec la pression externe appliquée et taille maximale des pores correspondante.....	11
--	----

### CHAPITRE II :

<b><u>TABLEAU 2</u></b> : HUMECTATION / DESHYDRATATION DES MATERIAUX Valeurs maximales et minimales des moyennes des volumes massiques totaux de la Kaolinite de Saint-Austell 0,1-0,5 mm, obtenues à l'humectation puis à diverses contraintes hydriques (en $10^5$ Pa).....	23
<b><u>TABLEAU 3</u></b> : HUMECTATION DES MATERIAUX Volums massiques secs et humides : résultats statistiques (moyenne, écart-type), maximas et minimas expérimentaux.....	24

### CHAPITRE IV :

<b><u>TABLEAU 4</u></b> : DESHYDRATATION DES MATERIAUX Données statistiques (coefficients, coefficient de corrélation, $r^2$ , erreurs type) concernant les courbes de déshydratation des matériaux étudiés. Valeurs des teneurs en eau à $pF = 3$ .....	32
---	----

### CHAPITRE V :

<b><u>TABLEAU 5</u></b> : COMPRESSION OEDOMETRIQUE DES MATERIAUX Données statistiques (n, coefficients, coefficient de corrélation, $r^2$ , erreurs type) de l'équation de régression traduisant la variation des volumes massiques de chaque échantillon ou du matériau en fonction de la pression mécanique appliquée. Valeurs du volume massique total à une compression de 1 bar.....	44
--	----

## LISTE DES FIGURES

### CHAPITRE I :

<b>FIGURE 1</b> : Pression d'air ( $u_a$ ) et d'eau ( $u_w$ ) dans un milieu non saturé : la pression totale est $\sigma = P/A$ avec P contrainte mécanique exercée sur la surface A.....	10
---	----

### CHAPITRE II :

<b>FIGURE 2</b> : Schéma du dispositif de fixation de l'état de l'eau et/ou de la contrainte mécanique (AZZAOU, 1988).....	17
---	----

### CHAPITRE III :

<b>FIGURE 3</b> : Schéma du dispositif d'ultra-filtration utilisé pour les dessiccations et les réhumectations dans le domaine de contrainte < 4 bars (d'après TESSIER et BERRIER, 1979).....	22
---	----

### CHAPITRE IV :

<b>FIGURE 4</b> : HUMECTATION DES MATERIAUX Evolution des volumes massiques totaux, des vides, d'eau et d'air de la Kaolinite de Saint-Austell au cours de l'humectation, A: en fonction des teneurs en eau initiales, B : en fonction des pF initiaux .....	26
<b>FIGURE 5</b> : HUMECTATION DES MATERIAUX Evolution des volumes massiques totaux, des vides, d'eau et d'air de l'horizon B de Versailles au cours de l'humectation, A: en fonction des teneurs en eau initiales, B : en fonction des pF initiaux .....	29
<b>FIGURE 6</b> : HUMECTATION DES MATERIAUX Evolution des indices de vides et d'eau de la kaolinite de Saint-Austell et de l'horizon B de Versailles au cours de l'humectation en fonction du pF initial.....	30
<b>FIGURE 7</b> : DESHYDRATATION DES MATERIAUX Evolution des teneurs en eau des échantillons en fonction des contraintes hydriques appliquées .....	31
<b>FIGURE 8</b> : DESHYDRATATION DES MATERIAUX Evolution du volume massique total des échantillons en fonction des contraintes hydriques appliquées et des teneurs en eau pour la kaolinite de Saint-Austell et l'horizon B de Versailles.....	34
<b>FIGURE 9</b> : DESHYDRATATION DES MATERIAUX Evolution des volumes massiques des vides, d'eau et d'air en fonction des contraintes hydriques appliquées, pour la kaolinite de Saint-Austell et l'horizon B de Versailles.....	34
<b>FIGURE 10</b> : DESHYDRATATION DES MATERIAUX Variation des indices des vides et d'eau de la Kaolinite de Saint-Austell et de l'horizon B de Versailles soumis à des contraintes hydriques.....	36

## CHAPITRE V :

<b>FIGURE 11 : COMPRESSION OEDOMETRIQUE DES MATERIAUX</b> Evolution des teneurs en eau de la kaolinite de Saint-Austell et de l'horizon B de Versailles, 2 mm, séchés air, à différents états hydriques initiaux, soumis à des contraintes mécaniques.....	39
<b>FIGURE 12 : DESHYDRATATION / COMPRESSION OEDOMETRIQUE DES MATERIAUX</b> Evolutions comparées des teneurs en eau de la kaolinite de Saint-Austell et de l'horizon B de Versailles, 2 mm, séchés air, à l'état initial PH 0, en fonction du type de contrainte appliquée: hydrique ou mécanique.....	40
<b>FIGURE 13 : COMPRESSION OEDOMETRIQUE DES MATERIAUX</b> Evolution des volumes massiques totaux des échantillons de kaolinite de Saint-Austell à différents états hydriques initiaux, en fonction des contraintes mécaniques appliquées A : Moyennes B : Lissages.....	42
<b>FIGURE 14 : COMPRESSION OEDOMETRIQUE DES MATERIAUX</b> Evolution des volumes massiques totaux des échantillons de l'horizon B de Versailles à différents états hydriques initiaux, en fonction des contraintes mécaniques appliquées A : Moyennes B : Lissages.....	43
<b>FIGURE 15 : COMPRESSION OEDOMETRIQUE DES MATERIAUX</b> Evolution des volumes massiques totaux des échantillons de kaolinite de Saint-Austell à différents états hydriques initiaux, en fonction des contraintes mécaniques appliquées A : Régression calculée B : Lissages recalculés avec l'équation déterminée.....	45
<b>FIGURE 16 : COMPRESSION OEDOMETRIQUE DES MATERIAUX</b> Evolution des volumes massiques totaux des échantillons de l'horizon B de Versailles à différents états hydriques initiaux, en fonction des contraintes mécaniques appliquées A : Régression calculée B : Lissages recalculés avec l'équation déterminée.....	45
<b>FIGURE 17 : COMPRESSION OEDOMETRIQUE DES MATERIAUX</b> Evolution des volumes des vides, d'eau et d'air de la kaolinite de Saint-Austell et de l'horizon B de Versailles, 2 mm, séchés air, à différentes contraintes hydriques initiales, en fonction des contraintes mécaniques appliquées.....	47
<b>FIGURE 18 : CONTRAINTE HYDRIQUE ET COMPRESSION OEDOMETRIQUE DES MATERIAUX</b> Evolution des volumes massiques totaux de la kaolinite de Saint-Austell et de l'horizon B de Versailles en fonction de la contrainte totale (hydrique et mécanique) appliquée.....	49
<b>FIGURE 19 : COMPRESSION OEDOMETRIQUE DES MATERIAUX</b> Evolution des volumes massiques totaux de la kaolinite de Saint-Austell et de l'horizon B de Versailles à diverses pressions mécaniques appliquées, en fonction de la teneur en eau initiale sous contrainte hydrique.....	50

## RESUMES

**FRANCAIS :** La Kaolinite de Saint-Austell (K) et un échantillon smectitique (BV) issu de l'horizon B du sol de Versailles (France) ont été préparés à différentes pressions hydriques (PH) puis mécaniques (PM). Les échantillons ont été soit séchés à l'étuve, soit séchés à l'air, puis tamisés pour obtenir des agrégats de taille 0,1-0,5 mm ou inférieure à 2 mm. Les massifs d'agrégats obtenus ont été d'abord ré-humectés dans un tube pF de TESSIER (1979), puis déshydratés à nouveau à des potentiels matriciels donnés. Ils ont ensuite été soumis à des compressions oedométriques (monodimensionnelles) dans le même appareil.

Lors de l'humectation, les mesures de volume indiquent un retrait de la kaolinite tandis que le B de Versailles gonfle. L'examen des agrégats montre qu'ils conservent leur forme et que les forces capillaires conduisent à leur rapprochement.

Pour les courbes de déshydratation, une relation  $VM_w(PH) = VM_w(PH1) - \alpha * \ln PH$  entre le volume massique d'eau ( $VM_w$  en  $cm^3/g$ ) et la pression hydrique (PH en  $10^5$  Pa) a pu être établie,  $VM_w(PH1)$  étant le volume massique d'eau à pF = 3; il apparaît que  $\alpha$  dépend des caractéristiques de la porosité inter-agrégats. Les expérimentations suggèrent qu'il existe deux phases de comportement hydrique, se produisant de part et d'autre de la zone 0,3-1 bar, qui correspondraient respectivement aux porosités inter- et intra-agrégats.

Sous compression oedométrique, les courbes de volume massique d'eau montrent des variations semblables, également comparables aux courbes de dessiccation obtenues précédemment. Une interprétation possible est que, même si les volumes massiques d'eau sont similaires, les mécanismes d'extraction de l'eau sont différents et qu'en conséquence, l'état énergétique dépend du type de contrainte. A partir des courbes de compression, une équation,  $VMt_{PM} = VMt_{PM1} * PM^{(-0,1)}$ , décrivant les variations du volume massique total ( $VMt$  en  $cm^3/g$ ), a pu aussi être établie. Le volume massique total à une pression mécanique (PM en  $10^5$  Pa) donnée :  $VMt_{PM}$ , dépend du volume massique à 1 bar ( $VMt_{PM1}$ ) et d'une constante qui, dans ce travail, est indépendante de la nature du matériau et du type de sa préparation (taille des agrégats, première dessiccation, type d'argile, teneur en eau initiale). Cette étude montre un seuil de comportement à 0,3-1 bar de pression hydrique, qui correspond à un maximum de compressibilité. Les compressions mécaniques ne font qu'amplifier le phénomène.

On en conclut que, dans le comportement de ces matériaux argileux, les forces d'hydratation, en particulier les forces capillaires, gouvernent à la fois les variations de volume et les caractéristiques de la rétention de l'eau.

Les conséquences sur le comportement des sols sont envisagées.

**ENGLISH :** Saint-Austell kaolinite and a smectitic soil sample collected from a B horizon in Versailles (France) area have been prepared at various suction pressures and mechanical stresses. The samples were oven-dried or air-dried, then saved to obtain 0,1-0,5 mm and < 2 mm aggregates. Aggregate beds were first wetted in a filtration apparatus (TESSIER, 1979) and dried again at a given matrix potential. The samples were then submitted to oedometric (monodimensional) compressions.

During wetting, K aggregate beds shrink while BV beds swell. Nevertheless, the aggregates keep their shape and capillary forces make them closer.

For the drying curves, the relationship  $VM_w(PH) = VM_w(PH1) - \alpha * \ln PH$  between water massic volume ( $VM_w$  in  $cm^3/g$ ) and suction pressure (PH in  $10^5$  Pa) was found.  $VM_w(PH1)$  is the water massic volume at pF = 3. It appears that  $\alpha$  depends on the inter-aggregate porosity characteristics. The experiments suggest that two hydric behaviour stages may exist, i.e. < 0,3 and > 1 bar, corresponding to inter- and intra-aggregate porosity, respectively.

Under oedometric compression, water massic volume curves exhibit similar variations, which are also comparable to drying curves obtained by suction pressures. It is interpreted that, even the water massic volumes are similar, the mechanism to extract water is different, and thus, the energy of water depends on stress type. From compression curves, the equation  $VMt_{PM} = VMt_{PM1} * PM^{(-0,1)}$ , describing the volume changes, was found. The massic volume ( $VMt$  in  $cm^3/g$ ) at a given compression (PM in  $10^5$  Pa) :  $VMt_{PM}$ , depends on  $VMt$  at 1 bar ( $VMt_{PM1}$ ) and on a constant (-0,1) which is, in this work, independant of the nature of the material and its preparation conditions (aggregate size, first drying, clay type, initial water content). This study shows a behaviour threshold at 0,3-1 bar suction pressure, corresponding to maximum compressibility. Mechanical compressions only amplify the phenomenon. It is concluded that, in the behaviour of these clay materials, hydration forces, and especially capillary forces, govern both volume change and water retention characteristics.

Some conclusions for soil behaviour are given.