

CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS

PARIS

Mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme
d'ingénieur C.N.A.M
en
CHIMIE INDUSTRIELLE

Par

Jean-Marie COSTANTINI

LE RETRACTOMETRE LASER

Mesure du retrait d'échantillons de sols

Soutenu le 24 février 1997

JURY :

PRESIDENT : Mr. Bernard LEFRANCOIS

MEMBRES : Mr. Gérard BELLIER
Mr. Erik BRAUDEAU
Mr. Alain DELACROIX
Mr. Georges LONCHAMBON
Mr. Claude PLUMELLE

*Un ti n'arricordi piùne
rosula di li deserti
E' sti celi smisurati
o culori di l'Orienti
Lu to visu è lu to sguardu
o spechju di la mo ghjente.*

Chant corse ancien.

A mes parents, à ma famille.

AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS

En début d'année 1988, en pleine saison des pluies, j'arrivais au Congo pour ma première affectation au laboratoire de chimie des sols du centre ORSTOM de Brazzaville. C'est dans le laboratoire voisin de physique des sols que je rencontrais Erik Braudeau, pédologue à l'ORSTOM, qui travaillait sur les phénomènes de retrait-gonflement des sols ferrallitiques de la vallée du Niari, et plus particulièrement sur leur analyse rétractométrique. La physique du sol était un univers que je découvrais, mais très rapidement, je portais à ces phénomènes physiques et à cette façon novatrice d'étudier la déformation du sol, en tenant compte de la répartition de l'eau et de l'air dans sa porosité bimodale, un intérêt tout particulier.

Quelques années plus tard, il me proposait de travailler sur l'étude d'un nouvel appareil intégré mesurant le retrait d'échantillons de sol à l'aide de sources laser. En janvier 1995, en collaboration avec le laboratoire de l'unité « Caractérisation hydrophysique des sols » du centre ORSTOM Ile de France à Bondy et le Projet « Jachère » en Afrique de l'ouest, je participais à la fabrication du rétractomètre laser à passeur d'échantillons. Les mise au point et validation techniques réalisées au centre ORSTOM de Dakar, ainsi qu'une étude de la mesure du retrait par l'analyse de sa courbe, aux centres ORSTOM de Bondy et Tunis, ont fait l'objet du présent mémoire.

Au terme de ce travail, il m'est particulièrement agréable d'associer ceux qui, de près ou de loin, de manière formelle ou non, ont contribué à sa réalisation. J'exprime la plus vive reconnaissance aux membres du jury qui ont accepté de juger ce travail et tiens à remercier :

Erik Braudeau, initiateur de ce projet, pour avoir encadré avec rigueur et constance ce travail pendant près de deux ans. Malgré la distance géographique qui nous séparait, notre collaboration a toujours été très étroite et fructueuse. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a donnée, m'accordant une grande liberté dans mes initiatives, tout en veillant au bon déroulement de mes travaux. Sa vision éclairée des problèmes méthodologiques que j'ai pu rencontrer, et ses corrections scrupuleuses lors de la rédaction de ce mémoire, m'ont été d'une aide considérable. Pour toutes ces journées de « terrain » en région sahélienne, à me faire partager sa passion, son expérience de la pédologie et ses convictions scientifiques, je tiens à lui témoigner ici ma profonde reconnaissance et mon amitié.

Mr Bernard Lefrancois, Professeur titulaire de la Chaire de Chimie Industrielle au Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris, d'avoir accepté le sujet un peu atypique de ce mémoire. Je lui sais gré de sa confiance et des ses conseils toujours avisés.

Mr Georges Lonchambon, ancien Professeur de Chimie Industrielle au Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris, pour son soutien permanent durant toutes mes études. Il a toujours eu le mot juste et le geste réconfortant lorsque le moral était au plus bas. Je le remercie pour ses corrections minutieuses et pertinentes.

Mr Alain Delacroix, sous-directeur du laboratoire de Chimie Industrielle au Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris. La qualité de ses enseignements, sa grande culture scientifique et son sens de l'humour légendaire m'ont fait apprécier ses cours de Thermodynamique, discipline souvent décriée parce que jugée quelques fois difficile. Grâce à lui, mes entrées au « Conservatoire » par le square St Martin devenaient plus enrichissantes et moins stressante dès lors que je croisais le buste de Marc Seguin.

Mr Claude Plumelle, Professeur titulaire de la Chaire de Génie Géologique de la Construction, au Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris, de m'avoir guidé dans mes recherches bibliographiques sur la partie géotechnique de mon travail. Je lui suis particulièrement reconnaissant d'avoir pris le temps, malgré ses occupations, de lire mon mémoire et d'avoir accepté de le juger au sein de ce jury.

Mr Gérard Bellier, Responsable de l'unité « Caractérisation hydrophysique des sols » du Centre ORSTOM Ile de France, qui m'a accueilli dans son laboratoire dès mon retour du Sénégal pour la rédaction de ce mémoire. Sa grande expérience de la Pédologie et ses idées créatives ont beaucoup apporté à l'évolution du rétractomètre laser dont il est aussi l'un des « pères ». Je le remercie d'avoir toujours fait le maximum pour que les conditions de travail lors de mon séjour à l'ORSTOM soient les plus confortables possibles.

Je tiens à remercier à ce propos Mr Michel Rieu, Chef du Département Eaux Continentales et Mr J.F. Turenne, Directeur du centre ORSTOM Ile de France, pour avoir facilité mon séjour à Bondy et ma mission à l'ORTOM de Dakar.

Je tiens également à témoigner ma gratitude aux professeurs du Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris qui ont suivi mon parcours depuis ma première inscription en 1992, et plus particulièrement à Mme Danièle Bretelle-Demazières, maître de conférence à la Chaire de Chimie Industrielle. Ses compétences scientifiques et ses conseils m'ont toujours été réconfortants. Sa grande disponibilité et sa gentillesse ont souvent fait des travaux pratiques du samedi matin un vrai plaisir.

A Mme Catherine Porte, pour son travail de relecture. Merci à Mr Jacque Roques et Mr Pierre Giraudeau, Ingénieurs de Recherche, pour leurs conseils et soutien.

Ce rétractomètre a été fabriqué au Centre ORSTOM Ile de France à Bondy, grâce à la participation financière du « Projet Jachère » à Dakar dont les responsables, Mr Christian Floret, Directeur de Recherche au CNRS, Mr Roger Pontanier, Directeur de Recherche à l'ORSTOM et Mr Dominique Masse, Ingénieur à l'ORSTOM de Dakar, ont cru au projet et l'ont soutenu jusqu'au bout. Qu'ils en soient ici vivement remerciés. La partie mécanique de ce prototype a été réalisée par Mr Jacques Feltens, de l'Unité Technique du Centre ORSTOM Ile de France. J'ai eu la chance de pouvoir assister et participer à ses côtés, dans son atelier, à toute la fabrication de cet appareil pièce par pièce. Ses connaissances et compétences ont contribué sans aucun doute à l'évolution technologique de l'appareil. Je n'oublierai pas sa disponibilité et son aide, même à distance.

Je tiens à remercier Adj Elandaloussi, de l'Institut National de Métrologie du Conservatoire National des Arts et Métiers de Paris, pour son aide précieuse et ses conseils avisés concernant le montage de la partie « mesure » du rétractomètre.

L'installation, la mise au point et les essais pour la validation du rétractomètre laser au sein du laboratoire de chimie analytique de Dakar ont nécessité l'analyse de près de 200 échantillons. A ce propos, je tiens à exprimer ma reconnaissance à Mr P. Mathieu, représentant du Centre ORSTOM de Dakar, à Melle Dominique Agostini, administrateur, et à Mr Gilles Ciornei, responsable du laboratoire de chimie des sols, pour leur accueil et participation active à l'aménagement d'une salle d'analyse spécialement conçue pour la mise en place du rétractomètre et des manipulations liées à la méthode de mesure ; une mention particulière à tout le personnel du laboratoire : Maimouna Cissoko, Bokounta Aureliano, Blaise Mane, Bakary Sagna, Joseph-Elie Diatta, Marie-Pierre Tine, Assane Sarr et Kétamdy Sande.

Les prélèvements d'échantillons de sol ont été réalisés au Sénégal, du nord, le long des berges du Doué, affluent du fleuve Sénégal, jusqu'en Basse Casamance à la frontière guinéenne. Je tiens à rendre hommage aux personnes qui m'ont accompagné sur le terrain et aidé de façon désintéressée ; je pense particulièrement à Demba Faye pour sa disponibilité sans faille, à Abdoulaye Niang pour son amitié, à Oumou, à Raphaël Manlay et Sadaga Diop pour leur collaboration au traitement des courbes sigmoïdales brutes. Je n'oublierai jamais l'accueil chaleureux des habitants des villages de Saréyérohana, de Diambo-Méné et de Thyssée Kaymor. J'espère que ce modeste travail et les études à venir qui s'en inspireront dans ces régions seront à la hauteur de la confiance qu'ils m'ont accordé.

J'ai été particulièrement sensible à l'intérêt qu'a bien voulu porter Olivier Grünberger, pédologue à l'Orstom, à la relecture de ce mémoire. Bien qu'ayant une vision désintéressée sur ce travail, sa patience et sa disponibilité sans limite tout au long de la rédaction m'ont beaucoup touché. Son soutien moral m'a été précieux. Qu'il recoive ici le témoignage de mon estime.

Un grand merci également à mes collègues du laboratoire d'hydrophysique de Bondy avec qui j'ai partagé de longs moments de rédaction : à Jean Larvy Delarivière qui m'a initié aux techniques de la rétractométrie avec beaucoup de patience et d'indulgence dès mon arrivée à Bondy et à Patricia Garnier pour son travail de relecture.

Je ne peux enfin oublier toutes celles et tous ceux qui parfois, par simple générosité, ont donné de leur temps et de leur personne pour faire en sorte que ce travail puisse se faire dans les meilleures conditions possibles : Véra Poulet pour ses relecture et correction, Carole Costantini pour son soutien permanent, Mme Aing pour ses tirages photos, Mme Zerbib de l'Unité communication et relation publique pour les illustrations du mémoire, Mr Pierre-Georges Coty du SRE. Je pense également à mes amis, Frédéric Provost et Gabriel Polo, mon « ange gardien », Farid Naïr pour son coup de coeur très précieux durant l'ultime phase de rédaction, Alain Marquier pour son aide technique, Sophie pour tous les moments où je n'ai pas été là, Michèle pour avoir été là. « Thought for Rosalie Castillo (...) ».

SOMMAIRE

SYMBOLES ET UNITES	11
INTRODUCTION GENERALE	15
 PREMIERE PARTIE : LA MESURE DU RETRAIT	
I./ MESURE DE LA COURBE DE RETRAIT	21
II./ FONCTIONNEMENT STRUCTURAL D'UN ECHANTILLON DE SOL A PARTIR DE SA COURBE DE RETRAIT	42
III./ MODELISATION DE LA COURBE DE RETRAIT	53
IV./ LES MESURES DE RETRAIT EN GEOTECHNIQUE	67
V./ CONCLUSION	78
 DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES	
I./ LE RETRACTOMETRE LASER	81
II./ METHODE DE L'ANALYSE RETRACTOMETRIQUE	105
III./ CONCLUSION	132
 TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSIONS	
I./ ETUDE DES COURBES DE RETRAIT EXPERIMENTALE	135
II./ INFLUENCE DES CONDITIONS OPERATOIRES SUR LES POINTS CARACTERISTIQUES DE LA COURBE DE RETRAIT	143
III./ CONCLUSION	165
 QUATRIEME PARTIE : LES APPLICATIONS	
I./ DEFINITION D'UN MODELE FONCTIONNEL DE LA STRUCTURE DU SOL	169
II./ DETERMINATION DES PROPRIETES HYDROSTRUCTURALES DU SOL EN AGRICULTURE	172
III./ APPLICATIONS GEOTECHNIQUES	179
IV./ AUTRES APPLICATIONS.....	181
CONCLUSION GENERALE	183
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	189
ANNEXES	201
TABLE DES MATIERES	231

SYMBOLES ET UNITES

symbole	grandeur	unité utilisée	dimension
---------	----------	----------------	-----------

1./ Concernant la caractérisation du milieu :

a_w	: activité de l'eau		[-]
A	: poussée d'Archimède	(cm^3)	$[\text{L}^3]$
e	: indice de vide		[-]
G	: enthalpie libre molaire	(J.mol^{-1})	$[\text{M.L}^2.\text{T}^{-2}.\text{mol}^{-1}]$
g	: accélération de la pesanteur	(= 9.81 m.s^{-2})	$[\text{L.T}^{-2}]$
H	: hauteur de colonne d'eau (\equiv succion)	(cm)	[L]
K	: constante du volume spécifique de l'air remplissant les pores (selon Mc Garry et Malafant, 1987)		[-]
K _{lm}	: pente de la phase de retrait « des limons » de la courbe de retrait (= K _{HG} , selon Braudeau et al., 1996).		[-]
K _{st}	: pente de la phase de retrait structural de la courbe de retrait (= K _{FE} , selon Braudeau, 1988a).		[-]
K _{no}	: pente de la phase de retrait « normal » de la courbe de retrait (= K _{CB} , selon Braudeau, 1988a).		[-]
K _{re}	: pente de la phase de retrait résiduel de la courbe de retrait (= K _{BA} , selon Braudeau, 1988a).		[-]
M	: masse	(g)	[M]
M _s	: masse de la fraction solide	(g)	[M]
M ₁₀₅	: masse de la fraction solide séchée à 105°C	(g)	[M]
M _w	: masse molaire de l'eau	(kg.mol^{-1})	$[\text{M.mol}^{-1}]$
M _t	: masse de la tare	(g)	[M]
P	: pression	(Pa)	$[\text{M.L}^{-1}.\text{T}^{-2}]$
P _o	: pression de référence	($1.013.10^5 \text{ Pa}$)	$[\text{M.L}^{-1}.\text{T}^{-2}]$
P _g	: pression de gonflement	(Pa)	$[\text{M.L}^{-1}.\text{T}^{-2}]$
R	: constante des gaz parfaits	(= $8.31 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$)	$[\text{M.L}^2.\text{T}^{-2}.\text{K}^{-1}.\text{mol}^{-1}]$
T	: température	(°C)	[K]
V	: volume massique (= v)	($\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$)	$[\text{L}^3.\text{M}^{-1}]$
V _w	: volume de la phase liquide	(cm^3)	$[\text{L}^3]$
V _{sat}	: volume massique à saturation (= v _{sat})	($\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$)	$[\text{L}^3.\text{M}^{-1}]$
V _o	: volume massique en fin de retrait	($\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$)	$[\text{L}^3.\text{M}^{-1}]$
V _s	: volume massique de solide (= v _s)	($\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$)	$[\text{L}^3.\text{M}^{-1}]$
V _{p_{ma}}	: volume poral macroscopique	($\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$)	$[\text{L}^3.\text{M}^{-1}]$
V _{p_{mi}}	: volume poral microscopique	($\text{cm}^3.\text{g}^{-1}$)	$[\text{L}^3.\text{M}^{-1}]$
9	: indice des vides		[-]

symbole	grandeur	unité utilisée	dimension
w_{ma}	teneur en eau macroscopique	$(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$[\text{L}^3 \cdot \text{M}^{-1}]$
w_{mi}	teneur en eau microscopique	$(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$[\text{L}^3 \cdot \text{M}^{-1}]$
w_{gma}	teneur en air macroscopique	$(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$[\text{L}^3 \cdot \text{M}^{-1}]$
w_{gmi}	teneur en air microscopique	$(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$[\text{L}^3 \cdot \text{M}^{-1}]$
w_B	teneur en eau au point d'entrée d'air	$(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$[\text{L}^3 \cdot \text{M}^{-1}]$
w_p	limite de plasticité		[-]
w_L	limite de liquidité		[-]
w_r	limite de retrait		[-]
w	teneur en eau	$(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$[\text{L}^3 \cdot \text{M}^{-1}]$
w_{sat}	teneur en eau à saturation	$(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$[\text{L}^3 \cdot \text{M}^{-1}]$
w_{re}	teneur en eau résiduelle	$(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$[\text{L}^3 \cdot \text{M}^{-1}]$
w_1, w_2, w_3	teneurs en eau		
	aux points M1, M2, M3	$(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$[\text{L}^3 \cdot \text{M}^{-1}]$
x	fraction de l'eau s'évaporant de l'échantillon	$(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$	$[\text{L}^3 \cdot \text{M}^{-1}]$
θ	teneur en eau massique (= θ_g , selon Mc Garry et Malafant, 1987)	$(\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	$[\text{M} \cdot \text{M}^{-1}]$
θ_{AE}	teneur en eau massique au point d'entrée d'air. dans la phase argileuse (= θ_B)	$(\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	$[\text{M} \cdot \text{M}^{-1}]$
θ_n	teneur en eau massique normalisée	$(\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$	$[\text{M} \cdot \text{M}^{-1}]$
σ	contrainte de compression	(Pa)	$[\text{M} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{T}^{-2}]$
μ_w	potentiel chimique de l'eau	$(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	$[\text{M} \cdot \text{L}^2 \cdot \text{T}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}]$
μ_w^0	potentiel chimique standard de l'eau	$(\text{J} \cdot \text{mol}^{-1})$	$[\text{M} \cdot \text{L}^2 \cdot \text{T}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}]$
ρ_{app}	masse volumique apparente	$(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$[\text{M} \cdot \text{L}^{-3}]$
$\rho_{réel}$	masse volumique réelle = ρ_s : masse volumique de la phase solide.	$(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$[\text{M} \cdot \text{L}^{-3}]$
ρ_w	masse volumique de la phase liquide = ρ_{eau} : masse volumique de l'eau (considérée comme constante = $10^3 \text{ kg} \cdot \text{dm}^{-3}$)	$(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$[\text{M} \cdot \text{L}^{-3}]$
Ψ_M	potentiel (ou succion) matriciel	(Pa)	$[\text{M} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{T}^{-2}]$
ΔZ	épaisseur de la couche de sol	(mm)	[L]

2./ Concernant la mesure du retractomètre laser :

a_1 et a_2	facteurs de correction de la linéarité des barrières laser.		
	B1 et B2	$(\text{mm} \cdot \text{v}^{-1})$	$[\text{L} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{T}^{-1} \cdot \text{L}^{-2}]$
d	distance de l'image à l'axe optique	(mm)	[L]
D	diamètre de l'échantillon	(mm)	[L]
D_{sat}	diamètre à saturation	(mm)	[L]
D_o	diamètre en fin de retrait	(mm)	[L]
f	distance focale de l'objectif	(mm)	[L]
F_{fisher}	fonction discriminante de Fisher (donnée dans la table en annexe 8)		[-]

symbole	grandeur	unité utilisée	dimension
F_{cale}	fonction discriminante de Fisher (calculé)		[-]
H	hauteur de l'échantillon	(mm)	[L]
H_{sat}	hauteur à saturation	(mm)	[L]
H_0	hauteur en fin de retrait	(mm)	[L]
m	moyenne arithmétique		[-]
n	taille d'un échantillon		[-]
P	probabilité		[-]
r_{Hartley}	fonction discriminante de Hartley (donnée dans la table en annexe 8)		[-]
r_{cale}	fonction discriminante de Hartley (calculé)		[-]
s^2	estimation de variance d'une variable (pour un échantillon)		[-]
V_w	pente de la droite de saturation	($\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$)	[$\text{L}^3 \cdot \text{M}^{-1}$]
σ	estimation de variance d'une variable (pour une population)		[-]
σ_r	écart type de répétabilité		[-]
v	degré de liberté associé à chaque échantillon		[-]
θ_f	angle de déviation du faisceau laser		[rad]

3./ Abréviations :

- pF : pression qu'il faut exercer sur l'eau du sol pour l'évacuer de l'échantillon.
(voir p.38).
- AG : sol argileux de Podor (Sénégal).
- Cis : coefficient d'isotropie.
- COLE : coefficient d'extensibilité linéaire.
- FA : sol ferrallitique de Basse-Casamance (Sénégal).
- FU : sol ferrugineux de Thyssé Kaymor (Sénégal).
- EG : eau gravitaire.
- ER : eau résiduelle.
- LM : sol sablo-limoneux de Podor (Sénégal).
- M1, M2, M3 : point d'intersection des tangentes de la courbe de retrait, calculés suivant le modèle en droites.
- MD : modèle en droites, selon Braudeau et al., 1996.
- MRS : modèle de retrait structural, selon Braudeau, 1988a et b).
- MVapp ... : masse volumique apparente.
- RFU : réserve facilement utilisable.
- RU_{argile} .. : réserve en eau utile dans la phase argileuse.
- RU : réserve en eau utile.
- SCE : somme des carrés des écarts.
- α : facteur de déformation verticale.
- β : facteur de déformation horizontale.

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Sous l'action des éléments du climat, le sol et ses composants sont soumis au cours des saisons à un certain nombre de contraintes physiques et chimiques qui sont à l'origine de l'évolution structurale et du fonctionnement du sol et de leurs matériaux. En effet, les mouvements de l'eau dans les sols tiennent une place importante dans le système *gonflement-retrait*.

En agronomie, ces phénomènes peuvent provoquer des fissures qui nuisent au système racinaire des plantes cultivées. Leur principal effet, lié aux variations hydriques suivant des cycles de dessiccation-réhumectation, est la dégradation de la structure du sol et des cultures.

Mais ces phénomènes dépassent l'intérêt purement agronomique. Par exemple, dans le domaine de la géotechnique, et plus particulièrement dans les travaux d'ingénierie du bâtiment, les effets de ces phénomènes ont une importance considérable vu les dommages et désordres qu'ils engendrent sur les constructions, et réparations très coûteuses qu'ils nécessitent.

En physique du sol et plus particulièrement en hydrophysique, de plus en plus les déformations du sol sont prises en compte dans la modélisation de la structure qui était jusqu'à lors basée sur une approche essentiellement qualitative (Perrier 1994).

La première partie de ce mémoire retrace succinctement en quelques points importants, l'histoire de la mesure du retrait des sols prélevés (1), des premiers concepts théoriques et expérimentaux (Watts, 1908) jusqu'aux études plus récentes soutenues par des techniques de mesures analytiques modernes. Celles-ci contribuent pour une grande part à l'évolution de l'analyse du retrait qui peut être ainsi quantifiée et exploitée par l'intermédiaire de celle de la courbe de retrait. Pour cela, un modèle fonctionnel a été établi permettant de tracer la courbe de retrait simulée et d'en donner une interprétation du comportement structural du sol (Braudeau 1988a et b). Pour ce faire, il fallait trouver un moyen automatique de tracer la courbe de retrait en continu.

La deuxième partie présente un nouvel appareil de mesure du retrait volumique (en continu) d'un échantillon de sol en fonction de sa teneur en eau : **le rétractomètre laser**, un protocole d'analyse de son utilisation, et une méthode de traitement de la courbe de retrait tenant compte de son anisotropie, sur des échantillons de sol aussi bien reconstitué que naturel non remanié.

La troisième partie est consacrée à la « validation » de la méthode rétractométrique. Pour cela, on étudie les effets de l'influence des conditions opératoires (taille, texture, structure, densité apparente (2), enrobage...) sur le retrait d'échantillons analysés, pour quatre types de sol différents, du moins gonflant (exemple: sablo-limoneux) au plus argileux (exemple: vertisol), ce qui représente l'analyse de près de 250 courbes de retrait.

La quatrième partie propose quelques applications possibles du rétractomètre laser dans divers domaines, et anticipe sur des recherches plus avancées quant à son utilisation dans un proche avenir.

(1) : Cette étude portera uniquement sur la mesure du retrait d'échantillons de sol prélevé, qu'il soit reconstitué ou naturel intact.

(2) : Le terme « densité apparente » (valeur sans unité), couramment utilisé par abus de langage en science du sol, correspond en fait plus justement à sa masse volumique apparente (en g/cm^3).

PREMIERE PARTIE

LA MESURE DU RETRAIT

I./ MESURE DE LA COURBE DE RETRAIT

I.1/ Premières notions de structure du sol d'après son retrait (1908-1923)

Les premiers travaux réalisés sur l'estimation du retrait des sols furent menés en 1908 par Watts ("Superintendent of Agriculture in the colony") qui en fut l'instigateur (ses recherches ont été publiées par G.G.Auchinleck, 1912).

Il associait certaines propriétés agronomiques du sol à la répartition granulométrique de ses particules et plus particulièrement à la proportion de particules fines appelées **colloïdes argileux** (1), aux phénomènes de retrait, de craquellement, et à la capacité de rétention d'eau.

L'auteur considérait le sol saturé à sa limite de plasticité (2) comme un ensemble de particules plus ou moins fines suivant sa texture, enveloppées par un film d'eau.

En mesurant la perte en eau d'un échantillon de sol remanié (3) au cours de son retrait (donné en mm), Auchinleck (1912) émettait l'idée selon laquelle :

« Le retrait est fonction de l'épaisseur du film d'eau enveloppant les particules solides du sol ».

Comme la teneur en eau du sol est directement liée à la granulométrie, il était alors possible, en mesurant de façon linéaire le retrait de l'échantillon (4), d'estimer approximativement la taille de ses particules solides :

- Retrait important \Rightarrow particules argileuses fines.
- Retrait faible \Rightarrow particules sableuses plus grosses.

On pouvait alors établir un standard du retrait caractéristique du sol : c'est le **coefficient de retrait** qui permettait de calculer le degré d'humidité ou de plasticité du sol et ainsi d'obtenir des indications sur l'aération du sol afin de pouvoir répondre aux problèmes d'irrigation et de culture des sols argileux.

$$\text{Coef. de retrait} = (\% \text{ d'argile}) / (\% \text{ de retrait})$$

(1) : Les colloïdes argileux sont des ciments floculés composés d'éléments fins (argiles, carbonates, ciments organiques...) formant des ponts autour des particules plus grossières et les reliant entre elles ; il se forme alors des agrégats (Duchaufour, 1991).

(2) : Limite de plasticité : état d'hydratation limite dans lequel l'échantillon peut être malaxé et moulé sans toutefois qu'il n'adhère aux parois du moule (Watts, 1908).

(3) : Sol remanié (à structure remaniée) : sol dont on a modifié la structure en changeant sa forme et son organisation naturelle.

(4) : En calculant la différence entre la longueur d'un échantillon saturé à sa limite de plasticité L (en mm) et sa longueur en fin de retrait L_0 (en mm). Retrait (%) = $(L/L_0)100$.

Cette technique d'estimation de la taille des particules solides du sol et de sa teneur en argile colloïdale s'avérait être alors un outil précieux dans l'industrie agronomique, dans la mesure où l'on appréciait la qualité d'un sol par sa capacité de retrait. De plus, si on étalonnait cette mesure physique à celle de l'analyse granulométrique faite parallèlement en laboratoire, on pouvait alors la considérer comme une méthode d'évaluation du taux d'argile dans le sol.

Pour tenter de mieux comprendre le mécanisme du retrait, Auchinleck (1912) injecte dans l'échantillon amené à sa limite de plasticité un hydrogel qui enveloppe les particules d'argile, formant ainsi un squelette gélinifié. Au séchage, le squelette ramifié se contracte jusqu'à se casser en séparant les grosses particules des petites.

C'était sans doute une des premières fois que l'on associait le comportement de la *structure particulaire* du sol (1) à son retrait, celle-ci étant quantifiée en deux niveaux d'organisation.

En s'appuyant sur les hypothèses énoncées précédemment, Tempany (1917) veut vérifier la validité et l'exactitude du *coefficient de retrait*.

En traçant les courbes représentant respectivement l'évolution du coefficient de retrait, en relation avec le volume d'eau nécessaire pour amener l'échantillon à sa limite de plasticité, et ce même coefficient en relation avec la perte en eau lors de sa dessiccation (voir *fig. 1-I-2*), il faisait évoluer le concept du retrait linéaire, en calculant ainsi l'une des premières courbes de retrait.

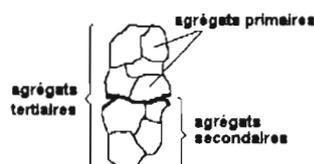
*« La contraction de la structure lors du retrait se produit en plusieurs étapes successives appelées **phases de retrait** suivant un modèle volumique, en passant par quatre étapes différentes ».*

Ce phénomène serait dû aux mouvements des particules solides en fonction de la dynamique de l'eau dans le sol.

(1) : La structure du sol est caractérisée par la manière dont sont assemblés ses divers constituants. Elle est définie sous deux aspects :

- La forme et la dimension des particules.
- Les conséquences de leur assemblage et arrangement (voir *fig. 1-I-1*).

Les éléments composites formés de l'assemblage des éléments inertes du squelette par des éléments actifs colloïdaux : argile, humus, hydroxydes ou gels s'appellent **agrégats**, considérés comme des molécules du sol. Ces agrégats associés les uns aux autres donnent naissance à des volumes de taille de plus en plus importante : ce sont des agglomérats et des mottes que l'on peut observer en examinant le terrain en place (Henin, 1976). L'ensemble des agrégats est parfois décrit comme un système hiérarchique à plusieurs niveaux. L'agrégat primaire est le plus simple du matériau pédologique, il ne peut être divisé en agrégats plus petits mais il peut être arrangé avec d'autres pour former des agrégats composés d'un niveau plus élevé d'organisation: agrégats secondaires, tertiaires (Brewer, 1964).



LES MODES DE LIAISON DES ELEMENTS EN AGREGATS, OU ASSEMBLAGES ELEMENTAIRES, DEPENDENT DE L'ABONDANCE ET DE L'ETAT DES COLLOIDES.

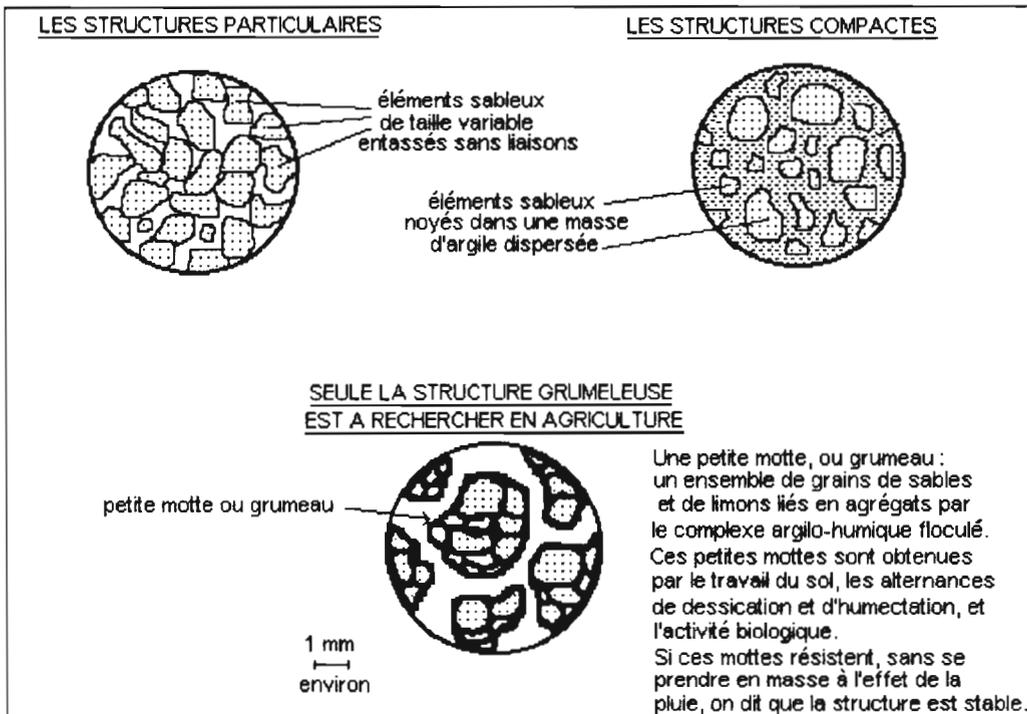
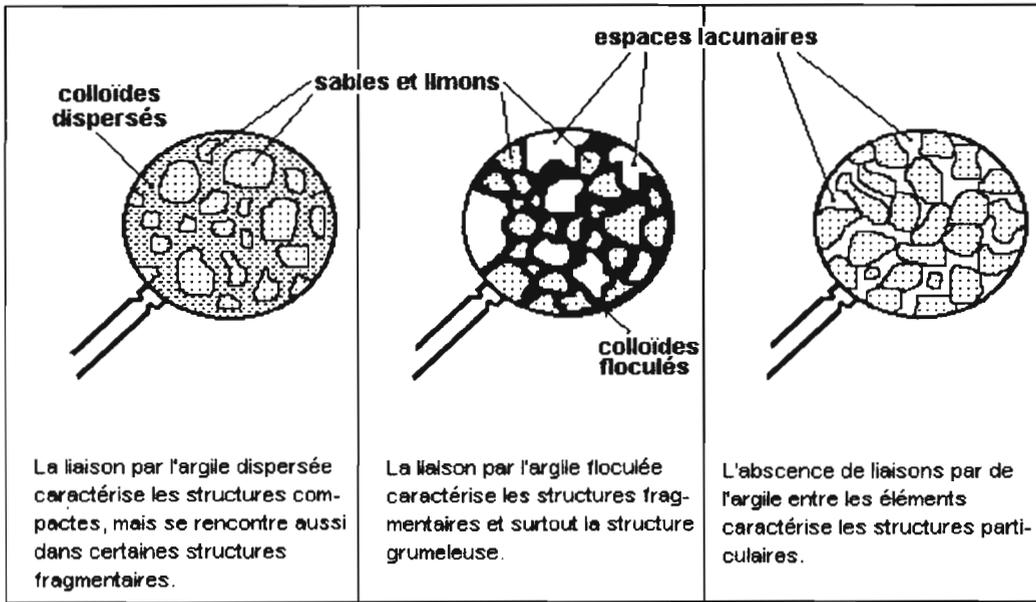


Fig. 1-1-1 : Les multiples formes de la structure du sol, d'après Soltner (1991).

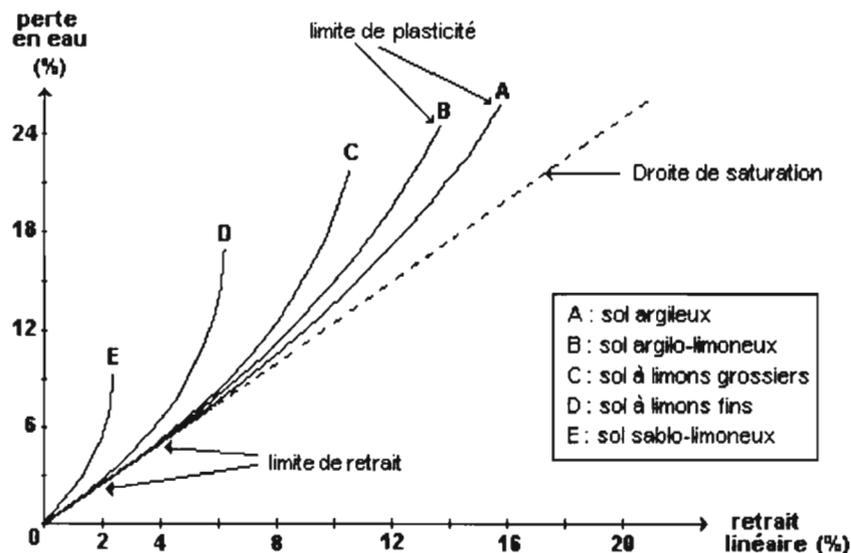


Fig. 1-I-2 : Courbes de retrait de cinq échantillons de sol reconstitué, de textures différentes, selon Tempany (1917) :
« L'allure de la courbe de retrait est différente selon la composition granulométrique du sol ».

Selon Tempany, cette dynamique de l'eau dans le sol peut être décrite par la courbe de retrait : (voir fig. 1-I-2 et 1-I-4).

- Etat initial : A l'état limite de plasticité, toute l'eau du sol est liée aux particules colloïdales sous forme d'un gel qui occupe la totalité des interstices spatiaux du sol : c'est un gel hydrocolloïdal. Lors de l'évaporation de l'eau, les particules du sol se ressèrent entre elles ; c'est *la contraction*.
- Première phase de retrait : Le retrait est quantitativement équivalent au volume d'eau évaporé ; cette phase de retrait est dite "normale". Le retrait est alors provoqué par les frictions internes entre les particules du sol.
- Deuxième phase de retrait : Un « retard » de retrait se remarque alors que l'eau continue à s'évaporer durant le séchage. Tempany l'explique par le fait que les particules résistent à la contraction ; cela est dû à la rigidité suffisante des parois colloïdales. L'air pénètre alors les vésicules partiellement contractées. Il semblerait que cette phase de retrait dépende alors essentiellement du potentiel de rétraction des argiles. Le point à partir duquel ce retard se produit est mis en évidence comme une fonction de la quantité d'argile colloïdale contenue dans l'échantillon de sol : C'est le point de transition des deux phases de retrait.
- Etat final : Le retrait cesse alors que se poursuit l'évaporation ; il y a rupture du gel hydrocolloïdal. Nous avons alors atteint la limite de retrait.

Tempany (1917) étudiait également l'évolution du retrait en fonction des variations de l'espace poral du sol d'après sa masse volumique apparente (*fig. 1-I-3*). Cette relation linéaire du retrait permettait en outre d'apprécier à tout instant la teneur en eau et en matériels colloïdaux d'un échantillon de sol remanié. Elle peut nous renseigner, par extrapolation, sur la **limite de retrait** de l'argile colloïdale pure qui est une caractéristique importante de l'argile.

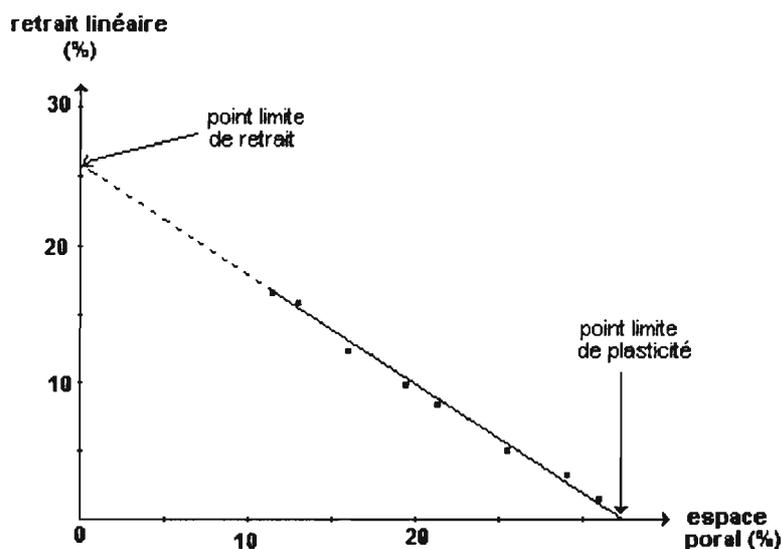


Fig. 1-I-3 : Evolution du retrait linéaire du sol en fonction des variations de son espace poral, selon Tempany (1917).

D'après le retrait d'un échantillon de sol remanié suivant l'allure de sa courbe (*fig. 1.I.2*), l'auteur décrivait ainsi son comportement structural. Ce sont les premières courbes de retrait de sols à textures différentes interprétées suivant la forme de leur courbure.

Quelques années plus tard, en travaillant sur des sols de types géologiquement différents, c'est à dire présentant des degrés d'agrégation différents, Mason (1922) critique la thèse de Tempany en prouvant expérimentalement qu'il n'existait pas de relation évidente entre la teneur en eau initiale d'un échantillon de sol hydraté à la limite de plasticité (1), et le coefficient de retrait linéaire. Il affirmait par contre qu'un lien existait entre la teneur en eau résiduelle et le point de flétrissement (2), ce dernier dépendant de la nature du sol, de son degré d'agrégation, et de la teneur en eau initiale à la limite de plasticité (voir *fig. 1.I.4*).

(1) : Voir page suivante.

(2) : Le point de flétrissement est la quantité d'eau que contient le sol au moment où la plante flétrit irréversiblement.

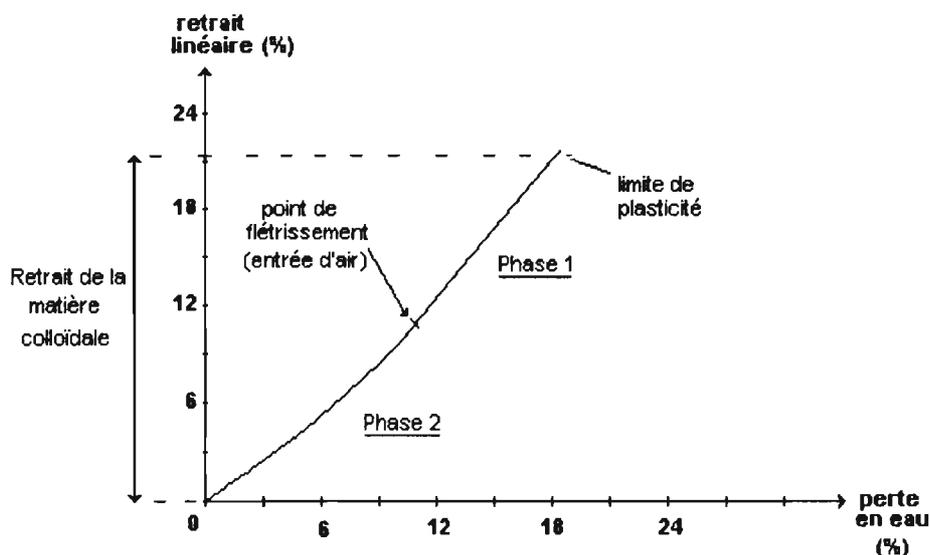


Fig. 1-I-4 : Schema d'une courbe de retrait d'un sol argileux, d'après la théorie de Tempany (1917).

En s'appuyant sur ces hypothèses, Hardy (1923) calculait de façon précise la teneur en eau résiduelle d'échantillons de sols de nature différente (c'est la teneur en eau à la limite de retrait du sol connaissant exactement la quantité d'eau introduite pour l'amener à sa limite de plasticité). Il trouvait ainsi, d'un type de sol à un autre, des teneurs en eau résiduelle différentes (par exemple de l'ordre de 20% pour un sol argileux). Il attribuait cet écart à trois causes principales :

- L'imprécision du calcul du coefficient de retrait linéaire, qui était jusqu'alors une notion aléatoire.
- Le retard plus ou moins important du retrait par rapport à la perte en eau dans la deuxième phase de retrait qui fait varier le point de transition des deux phases suivant la texture du sol. C'est la cause la plus importante.
Ce point de transition est appelé : "**coefficient hygroscopique**" du sol (2).
- La présence d'eau libre de nature différente de l'eau colloïdale dans le sol, suivant sa texture.

(1) : L'eau au **point limite de plasticité**, correspondant au point limite de saturation du matériel colloïdal du sol, elle représente la capacité d'imbibition d'eau de la matière colloïdale du sol ; elle est considérée comme une constante physique des sols argileux. La plasticité dépend des propriétés suivantes :

- La *cohésion*, qui donne au matériel colloïdal une propriété qui évite la déformation.
- La *mobilité*, qui est le travail de l'argile.

Ces propriétés dépendent de la teneur en eau faisant la jonction entre les « canaux » (films d'eau) qui assurent la cohésion et influencent la mobilité (Hardy, 1923).

(2) : Correspond au point de flétrissement défini par Tempany (1917).

En effet, quand un sol argileux est saturé, l'eau contenue dans sa matière colloïdale correspondant en fait à celle au point limite de plasticité, se présente sous deux formes différentes :

- *L'eau colloïdale* contenue dans les parois colloïdales enveloppant les particules d'argile.
- *L'eau porale* (ou eau libre) entourant les masses colloïdales (agrégats), (voir fig. 1-I-5).

Wildson (1921) avait suggéré que l'eau contenue dans la matière colloïdale représentait en fait celle au point de transition des deux phases de retrait (point correspondant au coefficient hygroscopique) décrites par Tempany. Connaissant la teneur en eau totale de l'échantillon, il en déduisait par différence la teneur en eau porale (ou vésiculaire).

La tension exercée par l'eau sur les particules est fonction, non pas du diamètre des particules d'argile ou de l'effet du soluté sur la tension de surface, mais des effets des colloïdes qui exercent des tensions sur les films d'eau. En effet, Wildson (1921) indiquait également d'un point de vue thermodynamique, que les tensions du film d'eau (**F**) étaient liées à la pression de gonflement des colloïdes (**S**) ; (**P**) représentant la pression osmotique de la solution du sol :

$$\mathbf{F} = \mathbf{P} - \mathbf{S} \quad (\text{en Pa.}).$$

Ainsi, la tension du film d'eau est augmentée par l'effet des colloïdes présents dans le sol durant la saturation d'eau. Hardy donne ainsi une des premières descriptions de la structure d'un sol argileux par celle de sa matière colloïdale et par ses teneurs en eau :

" C'est un gel inélastique avec une structure réticulaire. Sa rigidité dépend, d'une part de la nature des particules d'argile qui composent les parois de la structure, et d'autre part de la taille des vésicules enveloppées par ces parois colloïdales".

De plus, l'auteur présente le processus de gonflement des sols argileux de types géologiquement différents comme l'adsorption d'eau colloïdale contrôlée par la nature chimique et Physico-chimique des parois, par la présence d'ions adsorbants sur celles-ci, et par la succion d'eau dans les vésicules.

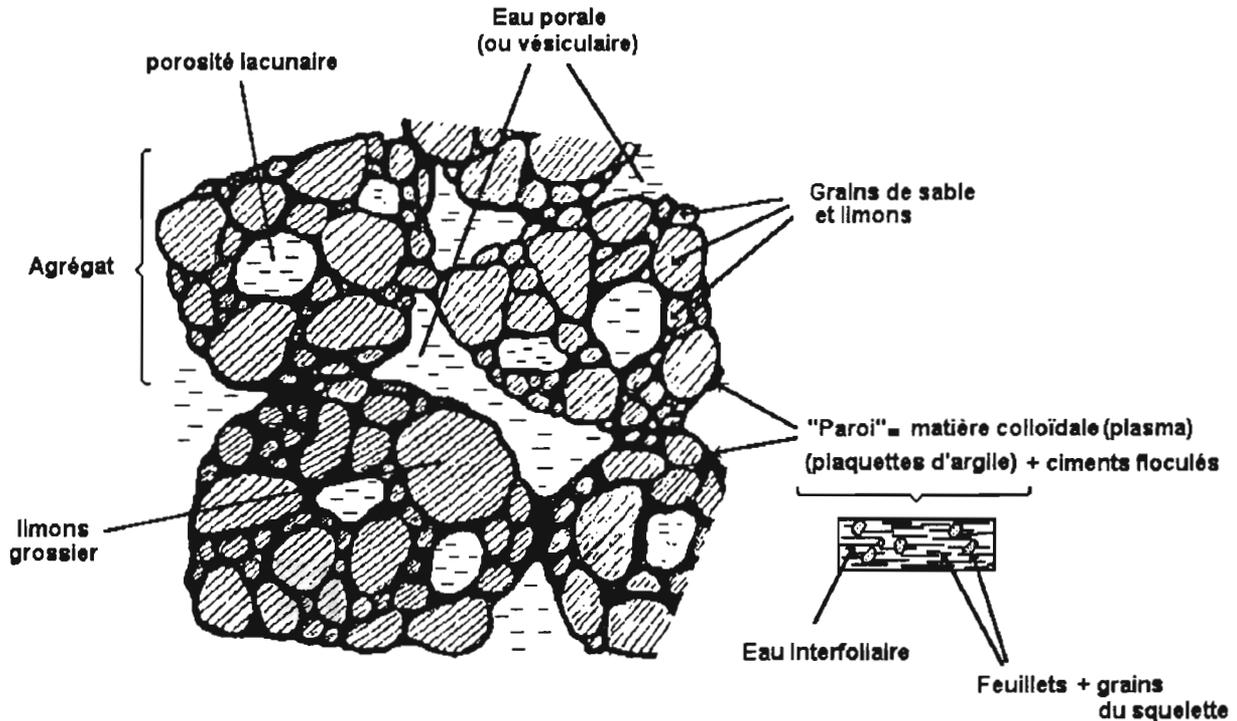


Fig. 1-I-5 : Structure fragmentée d'un sol argileux saturé.

S'appuyant sur les résultats expérimentaux de Tempany et Wildson, Hardy déclarait :

« *Le retrait n'est dû qu'à la teneur en eau vésiculaire* »

D'après Auchinleck(1912), Tempany(1917), Wildson(1921), Mason(1922), et Hardy(1923), les phénomènes de retrait et gonflement des sols argileux remaniés sont principalement liés à leurs variations hydriques.

Une des premières interprétation du fonctionnement de la structure du sol d'après le retrait d'échantillons argileux remaniés de types différents était ainsi décrite. Hardy (1923) proposait à la fois une interprétation théorique du retrait suivant deux phases distinctes (1), et une qualification de la teneur en eau à ces deux niveaux de la structure.

(1) : La première phase linéaire durant laquelle le retrait serait égal au volume d'eau perdu, et la deuxième pendant laquelle un retard du retrait sur la perte en eau se produit : ce phénomène s'explique par le fait que la rigidité des parois des vésicules résistent à la contraction et que l'air pénètre les vésicules.

I.2/ Les différentes phases de la courbe de retrait

I.2.1/ Courbe de retrait d'une pâte d'argile

Jusqu'à présent, le retrait d'échantillons de sols remaniés était calculé linéairement en mesurant régulièrement la longueur d'un bloc moulé à son point limite de plasticité tout au long de son dessèchement à l'air. La distance rétractée était alors ramenée en pourcentage de retrait.

Pour tenter de quantifier ce phénomène de retrait, responsable en partie de la dégradation des sols cultivés, Haines (1923) fut le premier à le calculer, non plus d'après les mesures linéaires de longueur de pâte d'argile, mais plutôt en mesurant par la méthode du déplacement de mercure (1), la variation du volume apparent d'un échantillon de sol argileux remanié en fonction de sa teneur en eau. A partir de cette dernière relation, il trace une courbe de retrait (fig. 1-I-6) et d'après son analyse, interprète les mécanismes du retrait :

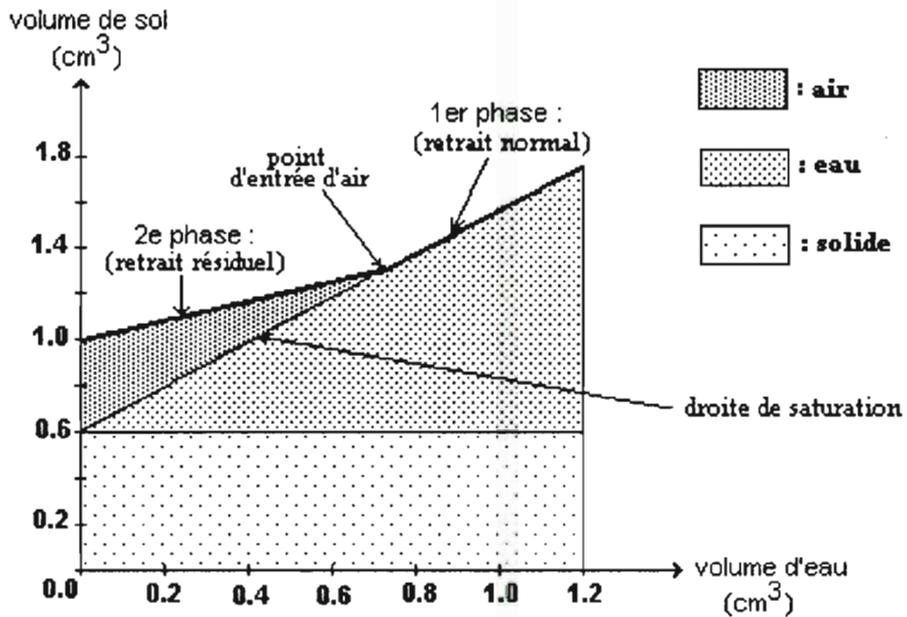


Fig. 1-I-6 : Courbe de retrait du sol selon Haines (1923).

- Il appelle la première phase de retrait : « phase de retrait total » ; c'est l'étape durant laquelle tout volume d'eau perdu par le sol entraîne une diminution strictement équivalente ($dV=d\theta$), sans entrée d'air. Il considérait ce type de retrait comme « normal », d'où le nom de « **phase de retrait normal** ».

(1) : La méthode consistait à mesurer dans un récipient le volume de mercure déplacé par l'échantillon de sol dont on veut calculer le volume apparent, quand celui-ci y est plongé à l'intérieur (suivant le principe d'Archimède).

- La deuxième phase est appelée « **phase de retrait résiduel** ». Les pores se vidant de leur eau sont partiellement remplis d'air ($dV < d\theta$), d'où un retard de retrait (déjà constaté par Tempany).

L'entrée d'air se fait à partir du point de transition entre les deux phases : c'est le « **point d'entrée d'air** ». Tempany l'appelait « point de fletrissement » et Hardy « coefficient hygroscopique ».

D'après Hardy (1923), l'eau évacuée de la première phase de retrait serait de type *vésiculaire* ou *porale* ; celle de la deuxième phase de type *colloïdale*.

Haines (1923) affirmait que le retrait normal était lié à la teneur en argile, alors que le retrait résiduel l'était plutôt à la matière organique. Il considérait par ailleurs que l'interprétation de la courbe de retrait permettait d'expliquer beaucoup de phénomènes agronomiques, notamment la dégradation ou amélioration de la structure d'un sol après qu'il est subit des cycles de dessiccation-hydratation, entraînant ceux de retrait-gonflement.

I.2.2/ Courbe de retrait d'un sol à structure conservée (sol non remanié)

Lauritzen et Stewart (1941) étudiaient ces mêmes phénomènes de retrait, non plus sur des blocs moulés de sol remanié, mais cette fois-ci sur des mottes naturelles (1). En mesurant la variation de leur volume par la méthode de déplacement de liquide suivant le principe d'Archimède (2), ils obtenaient des courbes de retrait d'allure sigmoïdale caractéristique (voir *fig. I-I-8*). Ils constataient qu'au début du retrait, la pente de la courbe représentant le taux de variation du volume apparent sur celui du volume d'eau ($dV/d\theta$) était inférieure à 1.

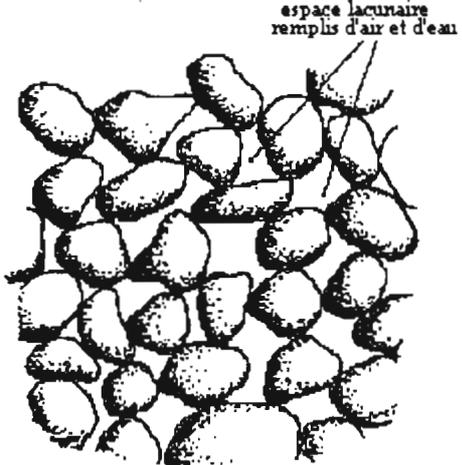
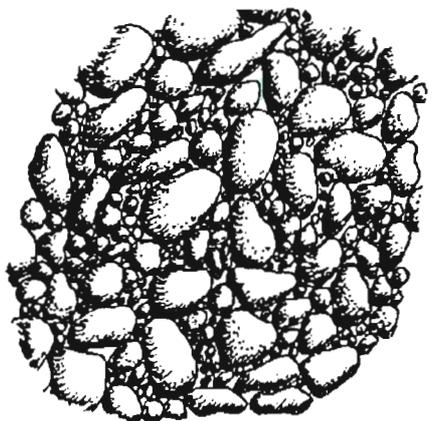
Les courbes de retrait des mottes de sols très denses (cas des sols argileux) se rapprochent de celles de Haines (1923) qui ne comportaient que deux phases de retrait, alors que celle des mottes de sol à faible densité (cas des sols sableux) s'en éloignent du fait qu'elles présentent une phase de retrait supplémentaire. Cette troisième phase de retrait serait donc liée à la structure du sol et marquerait le degré de **développement structural** du sol, responsable de la présence de pores inter-agrégats nombreux dans les sols naturels prélevés (mottes) et inexistant dans les blocs moulés de sol remanié.

Cette façon d'associer la teneur en eau de l'échantillon avec la taille des pores soulignait l'influence du retrait sur le développement de la plante.

En travaillant sur des échantillons de sol à structure et texture différentes, reconstituées ou non remaniées, Lauritzen (1948) confirme bien cette thèse suivant laquelle la présence ou non d'une porosité structurale visible sur la courbe, dépendante de la texture du sol (3) (importante dans les sols sableux et inexistence dans les sols argileux), contribue pleinement au développement ou au contraire à la dégradation de la structure du sol. En effet, la texture d'un sol influe sur sa porosité (voir *fig. I-I-7*), par exemple les effets du sable et de la matière organique qui déterminent la structure du sol influencent le retrait.

(1) : Une motte est un assemblage d'agréats (artificiel ou naturel).

(2) : Cette méthode de mesure de la masse volumique apparente de l'échantillon de sol est la même que celle pratiquée par Haines, mais en remplaçant le mercure par de l'eau et en ayant prit soin auparavant d'enrober la motte de terre de paraffine.

 <p style="text-align: center;"><i>Structure d'un sol sableux.</i></p> <p>Si les sables grossiers dominent, ils laissent entre eux des vides où circulent aisément l'air et l'eau. Mais l'absence de colloïdes limite le pouvoir de rétention de l'eau : le sol est alors filtrant.</p>	 <p style="text-align: center;"><i>Structure d'un sol sablo-limoneux.</i></p> <p>Si les sables fins et les limons accompagnent les sables grossiers, ils colmatent les vides laissés entre ces derniers : le sol se tasse facilement sous l'effet de la pluie : Il devient battant et imperméable à l'eau et à l'air.</p>
---	--

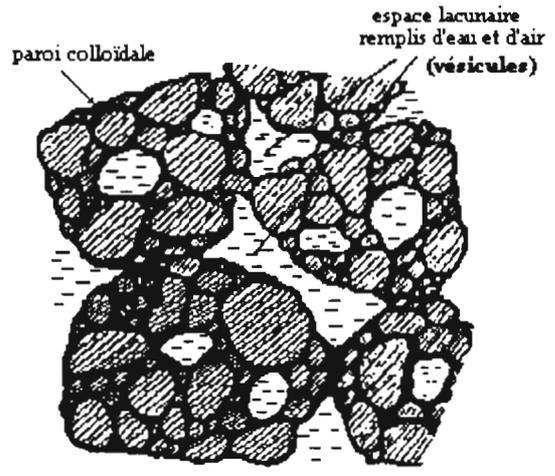
 <p style="text-align: center;"><i>Structure d'un sol argileux.</i></p>	<p>Si suffisamment d'argile et d'humus accompagnent les sables, ils permettent la formation d'agrégats laissant circuler l'eau et l'air, mais retenant assez d'eau pour les plantes. Les colloïdes ont permis au sol d'acquérir une structure fragmentée.</p>
--	--

Fig. 1-I-7 : La texture d'un sol influe sur sa porosité; d'après Soltner (1991).

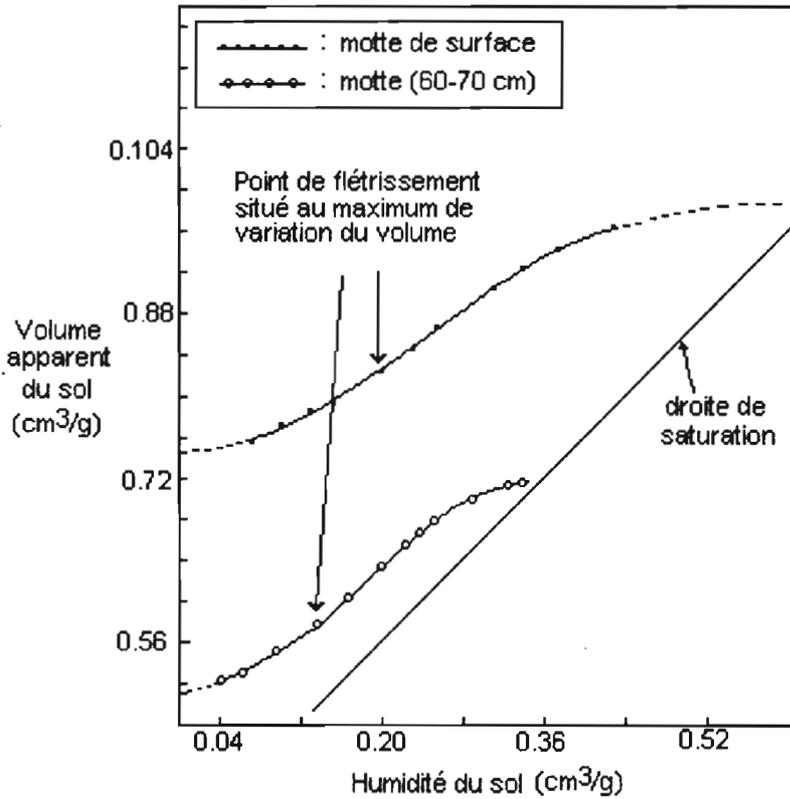


Fig. 1-I-8 : Courbes de retrait de mottes, selon Lauritzen et Stewart (1941).

En s'inspirant des travaux de Haines (1923) et Lauritzen (1948), Stirk (1954) étudiait également le retrait des échantillons de sol de textures et structures différentes, et confirmait la présence d'une phase de retrait suivant laquelle la diminution de volume du sol était inférieure à celle du volume d'eau évaporé. Il la qualifiait de « **phase de retrait structural** ». Cette phase au cours de laquelle les pores les plus gros étaient drainés (perte d'eau « porale » d'après Hardy) avant que les particules ne soient en contact (perte d'eau « colloïdale ») était déjà reconnue par Lauritzen et Stewart (1941). Elle traduit le *developpement structural du sol*. Stirk prouva alors que la texture du sol (1), symbolisée par sa teneur (%) en argile, et la structure, par la stabilité structurale quantifiée par la taille des agrégats qui le composent, influencent le comportement du retrait, celui-ci étant exprimé en pourcentage de variation d'espace poral (volume d'air / volume de sol), voir figures 1-I-9 et 1-I-10.

(1) : La texture d'un sol est la composition granulométrique définie d'après la proportion de ses particules minérales inférieures à 2 mm, elle comprend :

- Argiles : 0-2 μm .
- Limons fins : 2-20 μm et grossiers : 20-50 μm .
- Sables fins : 50-200 μm et grossiers : 200-2000 μm (0.2-2mm), (Lozet et Mathieu, 1990).

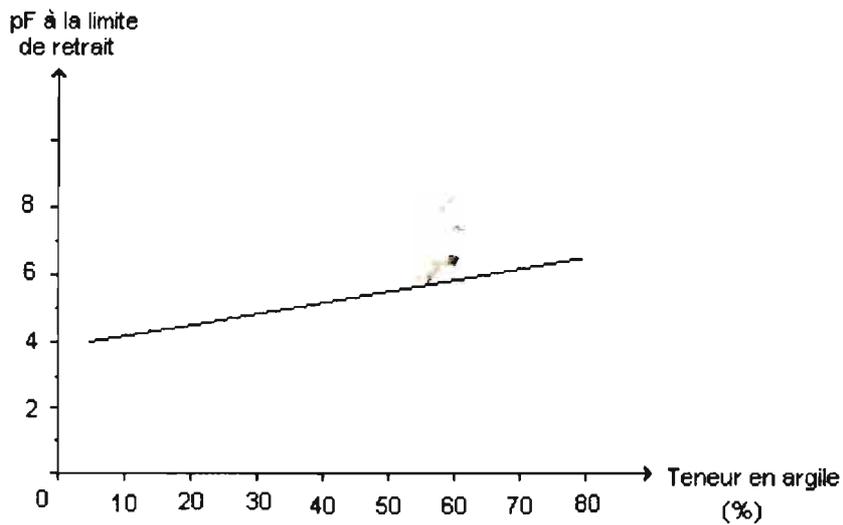
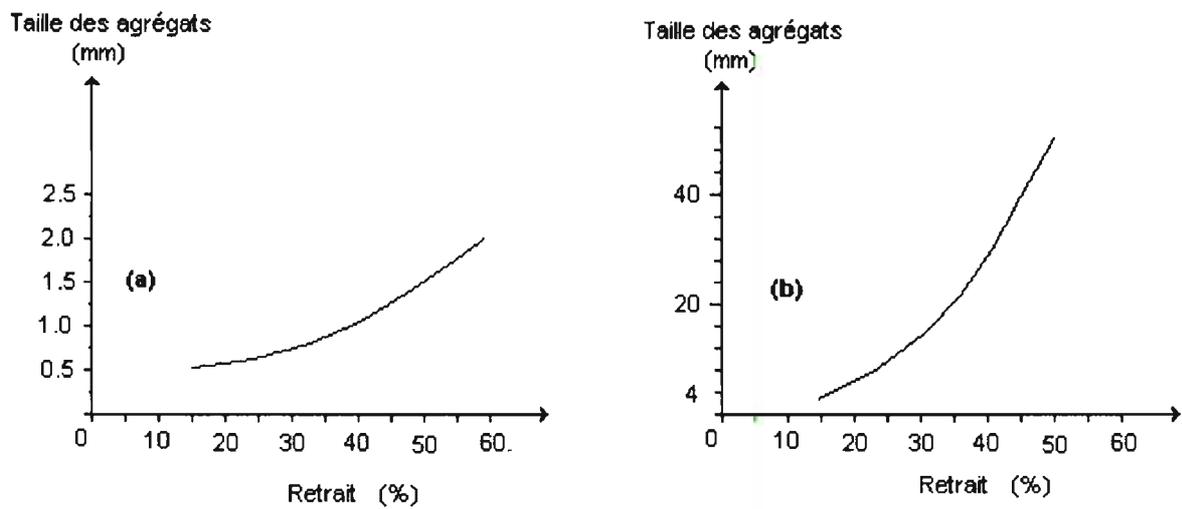


Fig.1-I-9 : Influence de la texture de sols sous différents pF à la limite de retrait, d'après Stirk (1954).



. Particules fines (argile)
 . retrait plus fort que pour (b).

. Particules grossières
 . retrait plus faible que pour (a)
 ⇒ structure plus stable
 ⇒ développement structural plus fort.

Fig.1-I-10 : Influence de la structure sur le retrait, d'après Stirk (1954).

L'auteur mettait également en évidence une quatrième phase (déjà observée par Haines (1923) sur de l'argile pure), au cours de laquelle le retrait était quasiment nul ($dV \approx 0$) : il l'a qualifié de « **phase de non retrait** ». Nous verrons par la suite que l'allure de cette phase de retrait des sols argileux dépend en fait de la nature de l'argile qui les constitue.

Stirk présentait également des courbes de retrait volumique, non plus en fonction de la teneur en eau, mais en fonction de la succion matricielle (nous définirons un peu plus loin cette notion de potentiel). Il constatait que plus de 50% du retrait total du sol se situait autour de $pF=4.2$, correspondant au point de flétrissement à partir duquel le retrait résiduel commence son processus.

Nous avons vu que Lauritzen et Stewart (1941) avaient découvert, en travaillant sur des échantillons de sol de types différents, une phase de retrait liée à la structure et contribuant au développement structural. Stirk (1954) l'avait appelé « phase de retrait structural ».

Reeve et Hall (1978) étudiaient à leur tour le retrait structural sur des échantillons de sol non remanié et de développement structural différents, ce dernier étant quantifié d'après le taux (% d'argile/%limon) et d'après le degré de développement structural du sol prélevé. Ils confirmaient ainsi le fait que les échantillons à développement structural faible (%argile/%limon élevé ou à degré de développement structural faible) présentaient un retrait structural très faible voire nul (*fig. 1-I-11*).

Au contraire, ceux à degré de développement structural élevé comportent une structure macroporale importante ; ils la qualifiaient de **macrostructure**. De plus, on constatait qu'il existait une relation linéaire croissante entre le taux de carbone organique dans le sol et l'entrée d'air dans la macro-porosité, favorisant ainsi la production de fissures et par là même, le développement structural. Au cours du retrait, il gêne alors considérablement le développement des racines des plantes cultivées (Newman et Perrins, 1977). Johnston et Hill (1944) avaient décrit ce phénomène de fissuration des sols argileux et constataient que les fissures se déformaient et se développaient suivant un clivage, là où la teneur en eau était la plus élevée (1).

(1) : Davidson et Page (1956) confirmaient ce constat en prouvant que la tendance au retrait et gonflement du sol n'était pas seulement liée à sa teneur en argile minérale, mais aussi de la teneur en matière organique et en concrétions calcites.

Un sol doté d'une bonne structure aura désormais un retrait structural tel qu'il permettra une bonne pénétration d'air au cours du séchage, et le maintien d'une porosité favorable. Ils calculaient le retrait volumique en pesant régulièrement au cours du retrait le volume d'eau déplacé par l'échantillon enrobé de résine « SARAN » (1) à des degrés d'humidité différents.

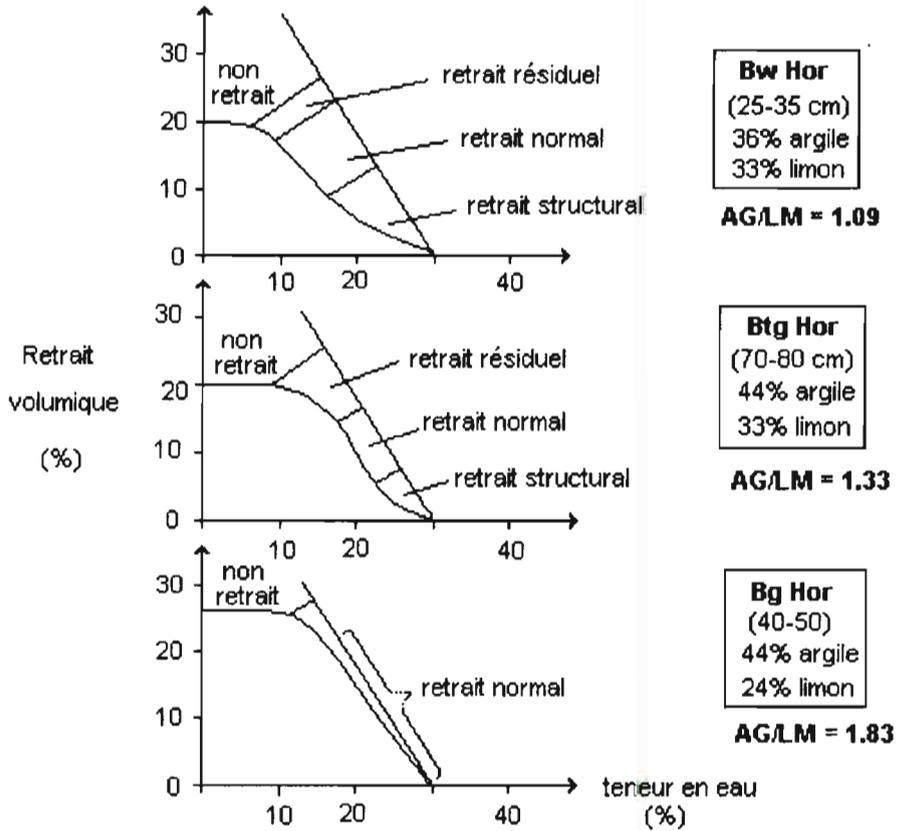


Fig.1-I-11 : Courbes de retrait selon Reeve et Hall (1978) représentant l'évolution du retrait structural lié au rapport (% argile AG / % limon LM) en fonction de la teneur en eau.

(1) : La résine SARAN est un polymère (2 propene nitrile 1,1 dichloroéthène)_n utilisée la première fois par Brasher et al. (1966). Etant perméable à l'eau vapeur et presque imperméable à l'eau liquide, elle permet au même échantillon de sol (reconstitué ou naturel et quelle que soit sa forme) qui en est enrobés, de sécher et se rétracter librement tout en restant disponible à d'éventuelles mesure de son volume par déplacement de liquide suivant le principe d'Archimède tout au long de sa déshydratation. Cette méthode, très utilisée jusqu'au début des années 90, fût vivement critiquée pour son manque de précision dans les fortes teneurs en eau, et pour un problème d'adhérence de surface de la résine, ou autre problème de résistance au gonflement lors de la saturation en eau.

Chan (1982) a présenté des courbes de retrait de mottes naturelles de 3 types de sol différents (1), en traçant une droite théorique de 45° calculée d'après le retrait d'une pâte d'argile de masse volumique de solide $M.V(\text{solide}) = 2.7 \text{ g/cm}^3$ ayant un retrait normal (sans entrée d'air) tout au long de sa déshydratation ; on l'appellera « **droite de saturation** », de pente = 1 (fig.1-1-12).

On remarquera les trois phases de retrait décrites précédemment (retrait structural, normal et résiduel). L'auteur les caractérise par la pente de leur partie linéaire (2). Ainsi, une pente égale à 1 indique un retrait normal alors qu'une pente inférieure à 1 caractérise un retrait résiduel. Ce qui différencie le retrait de ces trois types d'échantillon de sol, c'est la phase de retrait structural. Les résultats indiquent que le développement structural des mottes d'un sol ferme est supérieur à celui d'un sol irrigué (leur volume d'air est supérieur).

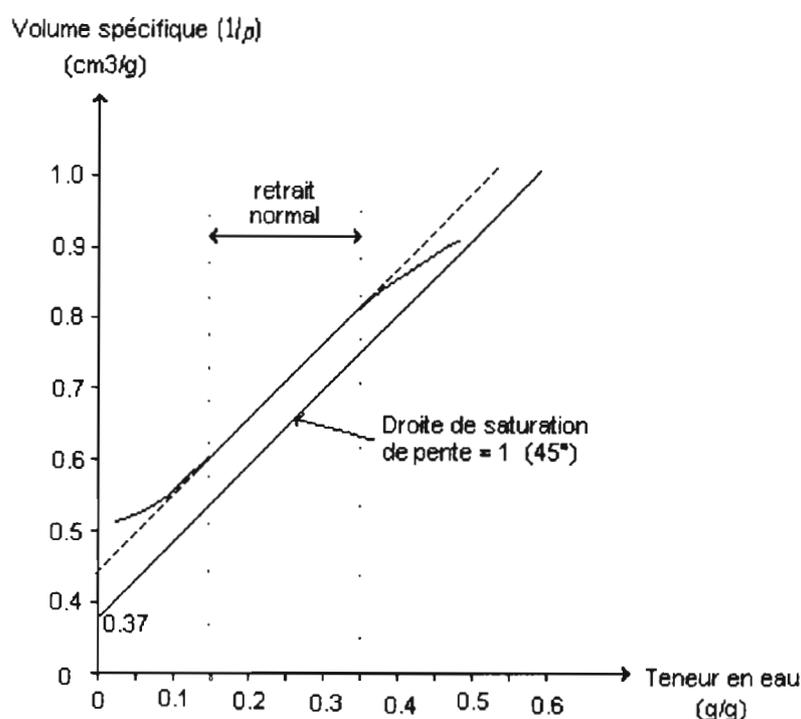


Fig.1-1-12 : Courbe de retrait de motte naturelle et droite de saturation, d'après Chan (1982).

(1) : Sol remanié, sol non remanié prélevé d'un site irrigué et sol non remanié prélevé d'un site sec.

(2) : Haines (1923) avait déjà constaté expérimentalement que la pente de la phase qui suit celle du retrait normal était inférieure à 1.

I.3/ Les techniques de mesure de la courbe de retrait

Depuis Haines (1923), la détermination de la courbe de retrait caractéristique du sol, selon les termes proposés par Mitchell (1992), reposait sur la mesure du volume massique apparent d'un échantillon de sol reconstitué porté à différents états d'humidité connus. Cependant, l'obtention d'une telle courbe de retrait est en pratique délicate et laborieuse ; plusieurs techniques ont été utilisées au cours du temps.

On distingue deux groupes de méthodes pour mesurer la courbe de retrait, celles où la mesure du volume apparent du sol est faite directement sur l'échantillon par densimétrie au cours de son retrait, et celles où elle est obtenue en mesurant un retrait linéaire sur une ou plusieurs dimensions de l'échantillon en posant certaines hypothèses d'isotropie du retrait.

I.3.1/ Les méthodes de mesure directe du volume de l'échantillon

Les méthodes de mesure directes du volume d'un échantillon de sol sont pour la plupart basées sur le principe de la poussée d'Archimède s'exerçant sur l'échantillon plongé dans un liquide. La mesure directe du volume d'un échantillon de sol se fait alors par celle de son volume d'eau qu'il déplace dans un récipient.

On distingue deux types de méthodes selon que l'on enrobe ou pas l'échantillon :

- En effet, il peut être préalablement enrobé ou recouvert d'un film imperméable : cela peut être de la paraffine (Lauritzen et Stewart, 1941, Audry et al., 1973), une résine polymère « saran » (Brasher et al., 1966), voire une membrane extensible (Tariq et Durnford, 1993).
- L'échantillon peut aussi, sans avoir été préalablement enrobé, être plongé directement dans un liquide non pénétrant tel que le mercure (Haines 1923, Greene-Kelly 1971), ou de l'huile à grande viscosité (Bronswijk, 1990). Cette technique est aussi employée par les géotechniciens avec du toluène (Sibley et Williams, 1989).
Une autre technique consiste à saturer préalablement l'échantillon du même liquide que celui dans lequel on effectue la poussée d'Archimède, ceci pour éviter l'intrusion du liquide dans la porosité du sol pendant son immersion. C'est le cas de la méthode au pétrole (Monnier et al. 1973, Fies et Stengel 1981, Tessier 1984, Hallaire 1987).

Toutes ces méthodes directes ne permettent pas l'automatisation de la mesure du retrait en continu sur le même échantillon ; la courbe est alors constituée d'une dizaine de points (volume apparent et teneur en eau) répartis entre l'état saturé et l'état sec du sol. Pour certaines d'entre elles, les mesures peuvent être affectées d'une erreur de l'ordre de 1 à 2%, due à la pénétration du liquide d'enrobage ou celui déplacé si l'échantillon n'est pas enrobé, dans le cas de sols à larges pores.

Elles ne sont pas très bien adaptées pour des sols fragiles et friables ou très poreux présentant une cohésion insuffisante à l'état humide (exemple des sols sableux très sensibles aux fortes suctions de la pompe à vide pour les méthodes du type « membrane extensible »). De plus, l'enrobage de l'échantillon pour la mesure directe de son volume apparent entraîne sa destruction après mesure, il est alors difficile de suivre l'évolution de son retrait sans perte de matière entre les différentes étapes.

La réalisation d'une courbe de retrait significative des propriétés hydrostructurales du sol nécessiterait alors beaucoup d'échantillons, et quand elle serait possible, son tracé tout au long du retrait deviendrait difficile à exécuter.

I.3.2/ Les méthodes de mesure indirecte du volume de l'échantillon

Les méthodes de mesure linéaires permettent d'estimer des variations de taille de l'échantillon dans une direction donnée, mais n'autorise pas l'analyse de porosité qui nécessite la prise en compte de trois dimensions. Le retrait volumique peut être calculé à partir du retrait linéaire si celui-ci est isotrope. En effet, lorsqu'un échantillon se rétracte de façon isotrope, le retrait dans l'une de ses dimensions peut être exprimé par exemple en fonction de la teneur en eau pondérale issue de la courbe de retrait volumique.

La mesure indirecte du retrait peut se faire mécaniquement, selon Schafer et Singer (1976), par mesure linéaire au pied à coulisse de la longueur d'une pâte d'argile moulée durant son dessèchement. A partir des dimensions mesurées, on peut calculer le coefficient d'extensibilité linéaire (COLE) en fonction de la teneur en eau de l'échantillon. Cette méthode se pratique exclusivement sur des matériaux de sol inférieurs à 2 mm, elle ne peut donc refléter le retrait des sols dont la taille des particules serait supérieure à 2 mm.

Selon la technique de Berndt et Coughlan (1976), l'échantillon de sol non remanié sous forme de carotte est mis à saturation pendant sept jours. Durant son retrait dans des tubes cylindriques, la hauteur et le diamètre sont mesurés par des jauges électriques et un vernier. Les auteurs peuvent suivre ainsi le retrait de l'échantillon par calcul de sa masse volumique apparente (d'après la hauteur et le diamètre) à différents états hydriques.

En utilisant le même principe de mesure, Towner (1986) donnait une interprétation du retrait tridimensionnel in-situ d'après les travaux de Aitchinson et Holmes (1953).

L'analyse du retrait peut être faite de manière visuelle par microscopie électronique à balayage, pour une caractérisation de l'arrangement des constitutions de sols (Tessier et Berrier, 1979). Afin de figer l'organisation de son système poreux, l'échantillon est préalablement traité par congélation et lyophilisation ou par la méthode du point critique suivant sa taille, avant d'être observé. Dans ce cas, cette analyse qualitative complètera celle du retrait de mottes réalisée par mesure des teneurs en eau d'après la succion du sol (évaluée en log de la hauteur de colonne d'eau en cm), en fonction de la teneur en argile de l'échantillon.

Wires et al. (1987) calculaient manuellement le retrait volumique d'un échantillon de sol durant son séchage en mesurant linéairement, avec une précision de $\pm 0.2\text{mm}$, le déplacement dans les trois dimensions d'aiguilles plantées dans une carotte de sol saturé tout au long de son séchage. Topp et Davis (1985) mesuraient parallèlement par réflectrométrie les teneurs en eau en différents points du retrait.

Une autre méthode visuelle permet d'étudier distinctement les retrait vertical et horizontal d'échantillons naturels de sols argileux au cours de leur dessèchement : c'est la méthode d'analyse bidimensionnelle d'images d'agrégats filmés durant leur retrait par caméra située au dessus de l'échantillon, celui-ci étant posé sur le plateau d'une balance (Hallaire, 1991). L'image projetée sur un plan, permettant une analyse en deux dimensions, est numérisée sous forme d'une matrice carrée. Le retrait linéaire ainsi mesuré peut-être calculé à partir du retrait volumique si celui-ci est isotrope (1). Cette méthode est moins précise dans le cas des sols peu gonflants que celle utilisant des capteurs linéaires de déplacement où l'on mesure des variations absolues de la taille des échantillons. C'est le cas de la mesure automatique et en continu du retrait d'échantillons de sol ferrallitique en cours de séchage, par capteur linéaire de déplacement en contact avec la carotte de sol non remanié (Braudeau, 1987).

I.3.3/ Mesure en continu de la courbe de retrait

La courbe de retrait pourrait permettre la caractérisation qualitative et quantitative de la structure d'agrégats ou de mottes de sol. Mais jusqu'à présent, à cause des difficultés de mesure, sa formulation mathématique était établie avec une précision trop insuffisante aux environs des points de transition des phases pour établir un modèle continu ou discontinu du retrait (Mc Garry et Danniels, 1987 ; Mc Garry et Malafant, 1987). C'est pourquoi Braudeau (1987) a proposé un moyen de les calculer pour la première fois **en continu** à partir du retrait d'échantillons de sol au cours de leur séchage :

L'appareillage alors utilisé était composé d'un bras mobile terminé par une pointe jouant le rôle de « palpeur » et d'une balance de précision. En contact avec l'échantillon enrobé de colle néoprène pour l'empêcher de s'écrouler lors de sa saturation et pour favoriser le contact sol-palpeur, le capteur de déplacement mesurait son retrait linéaire et la balance, les variations de son poids (*fig. 1-I-13*). Les courbes de retrait linéaire volumique ainsi calculées représentaient le retrait volumique de l'échantillon en fonction du temps et de la teneur en eau (*fig. 1-I-14*).

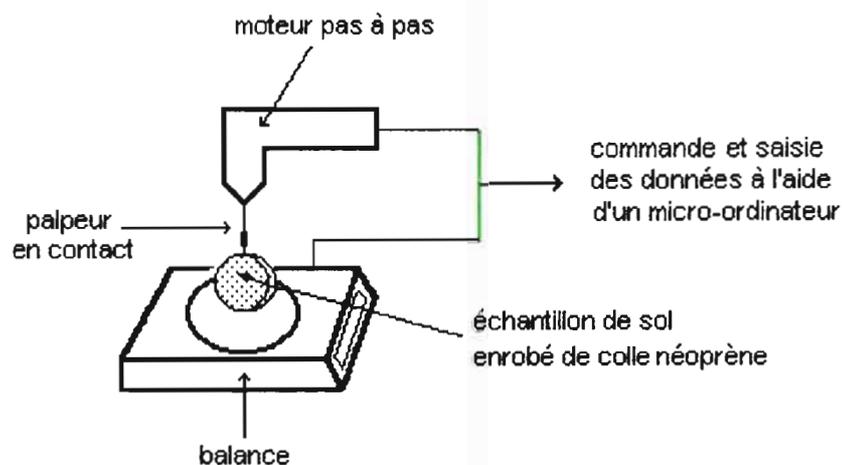


Fig. 1-I-13 : Appareil de mesure de la rétraction et de l'évaporation d'un échantillon de sol ferrallitique au cours de son séchage, d'après Braudeau, 1987.

(La surface latérale de l'échantillon enrobée de colle néoprène étant posée sur la plateau d'une balance)

(1) : Le tropisme est l'évolution d'un mouvement dans une direction donnée. Dans le cas du retrait d'un sol, cette notion est utilisée pour qualifier le mouvement de sa déformation :

- . unidirectionnelle s'il est orienté dans une direction préférentielle.
- . équidimensionnelle s'il est orienté dans toutes les directions.

Dans ce dernier cas, si la déformation se fait avec la même force dans toutes les directions, il sera alors isotrope.

Une recherche bibliographique sur l'isotropie du retrait a été menée par Coquet (1995), qui s'intéressait à l'étude in-situ des phénomènes de retrait-gonflement des sols.

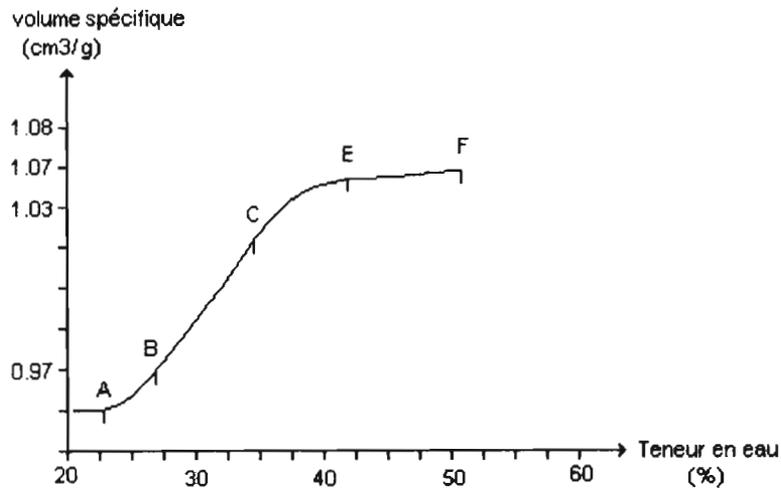


Fig.1-I-14 : Exemple de courbe de retrait volumique mesurée en continu, d'après Braudeau (1987).

Pour calculer ces courbes de retrait, il était supposé que le retrait s'effectuait de manière isotrope :

- Volume d'un cylindre : $V = \pi \frac{D^2}{4} H$
- Volume de l'échantillon cylindrique en faisant l'hypothèse d'isotropie :

$$\frac{V}{V_{sat.}} = \left(\frac{D}{D_{sat.}} \right)^3$$

($V_{sat.}$ et $D_{sat.}$ sont respectivement les volume et diamètre de l'échantillon dans un état hydrique proche de la saturation, correspondant au point F sur la figure 1-I-14).

Connaissant la masse de solide de l'échantillon de sol sec et son volume massique de solide en fin de manipulation, on peut tracer V_m en fonction de la teneur en eau.

Les différentes phases de la courbe de retrait sont délimitées avec précision aux points de brusques changement de pente observés : A, B, C, etc....La courbe de retrait ainsi calculée permettait de prendre en compte plus facilement, par le suivi de leurs propriétés physiques, les phénomènes de retrait-gonflement des sols.

Tariq et Durnford (1993) ont également mis au point une méthode de mesure en continu de la courbe de retrait : la méthode de la « membrane extensible » (fig.1-I-15). Elle consiste à mesurer régulièrement le déplacement d'eau créée par un échantillon de sol enveloppé d'une membrane de caoutchouc plongé dans un récipient d'eau de volume connu (fig.1-I-16(2)). L'échantillon contenu dans la membrane flexible (fig.1-I-16(1)) reste dans le récipient tout au long de son évaporation contrôlée, de son état saturé jusqu'à sa limite de retrait. La courbe de retrait représentant la variation de la masse volumique apparente de l'échantillon de sol en fonction de sa teneur en eau est ainsi tracée en une vingtaine de points.

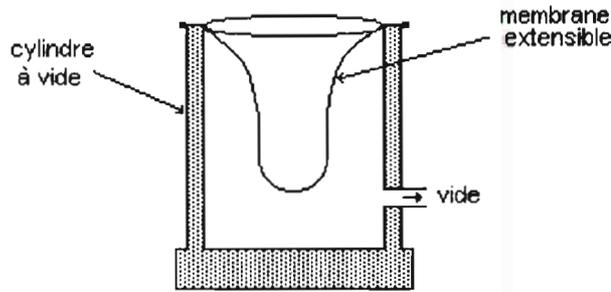


fig.1-I-15 : Appareil pour faire le vide dans une membrane flexible contenant l'échantillon de sol, selon Tariq et Durnford (1993).

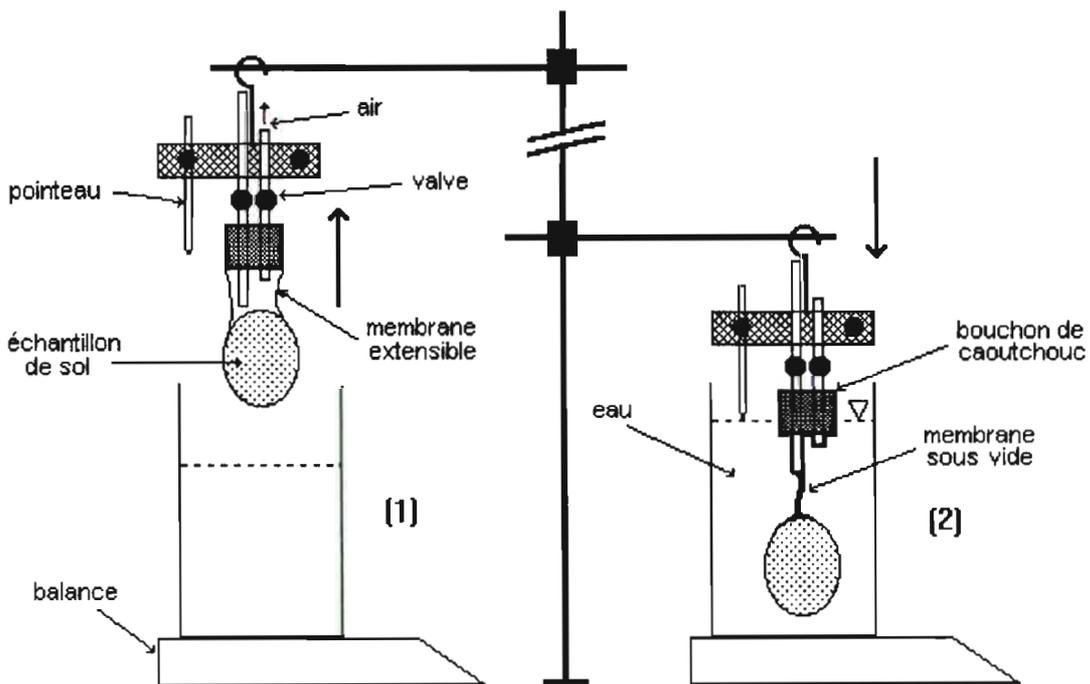


Fig.1-I-16 : Utilisation du dispositif de mesure de volumes apparents d'un échantillon de sol par la méthode de la membrane flexible, selon Tariq et Durnford (1993).

II / FONCTIONNEMENT STRUCTURAL D'UN ECHANTILLON DE SOL A PARTIR DE SA COURBE DE RETRAIT

II.1/ Comportement des agrégats durant le retrait

Jusqu'à présent, malgré sa description précise (Brewer, 1964), la structure du sol était si difficilement quantifiable qu'il n'était pas facile d'en comprendre les mécanismes du retrait.

Nous savions par l'étude de sa courbe, que le retrait du sol se déroulait suivant quatre phases successives, en fonction de la perte en eau de l'échantillon saturé. Deux niveaux d'organisation de la structure du sol y étaient décrits (Hardy, 1923) :

- Le retrait dû à la perte en eau porale (ou inter-agrégat).
- Le retrait dû à la perte en eau colloïdale (ou intra-agrégat).

Chang et Warkentin (1968) s'intéressaient à leur tour à l'étude du comportement d'agrégats de deux tailles différentes (< 0.25mm et compris entre 1 et 4.75mm) au cours de cycles de retrait et gonflement sous contrainte. Ils différenciaient ainsi le retrait poral *inter-agrégat* (1), différent pour les deux types de matériaux étudiés, donc dépendant de la porosité de l'échantillon, du retrait poral *intra-agrégat* qui reste le même quelle que soit la taille des agrégats (*fig. I-II-1*). Ils trouvent ainsi un point seuil appelé « M » qui limite les zones où les comportements physiques des agrégats diffèrent. Les auteurs associaient en fait ce point « M » au point de jonction entre les phases de retrait « normal » et « structural » :

- Avant le point « M » (partie B) : Il y a une différence visible entre les comportements à la compaction des deux types d'agrégats. Leurs tailles jouent un rôle important sur le mouvement du sol. Cette partie correspond en fait à la phase de retrait structural durant laquelle il y aurait réarrangement des agrégats, sans que les pores intra-agrégats ne soient drainés. C'est la phase où le degré de réarrangement des agrégats est le plus élevé.
- Au point « M » : La porosité totale de l'échantillon est égale la porosité intra-agrégat.
- Après le point « M » (partie A) : On ne fait pas de distinction entre la compaction inter- et intra-agrégat. La taille de l'agrégat ne joue pas sur la porosité qui en est indépendante. Cette partie correspond à la phase de retrait normal, durant laquelle l'eau des pores inter-agrégats est évacuée en premier.

Quand on poursuit le séchage, une partie de l'eau intra-agrégat évacuée est remplacée par de l'air, bien que les pores continuent à réduire de volume. A la limite de retrait, le réarrangement des agrégats serait nul.

(1) : Il faut entendre par porosité, la fraction de l'unité de volume du sol en place qui n'est pas occupée par la matière solide. On divise cette porosité en macroporosité et microporosité.

La **macroporosité** (espace inter-agrégats) correspond aux plus gros pores, ceux qui sont utilisés pour la circulation de l'eau et de l'air. La **microporosité** correspond au volume des pores les plus fins qui sont utilisés pour le stockage de l'eau (Hénin et al., 1969).

En étudiant le gonflement des mêmes échantillons lors de leur réhydratation, ils constatèrent un phénomène d'hystérésis (1) qui rend le processus de retrait-gonflement non complètement réversible. Il peut s'expliquer de la façon suivante :

L'air est piégé dans la porosité du sol durant la réhumectation de l'échantillon (dans la phase de gonflement structural) et les pores inter-agrégats remplis d'air ne se remplissent d'eau qu'à partir du point de jonction des phases de retrait structural et normal (point M). En fait, la différence de comportement du sol au retrait et au gonflement se remarque plutôt lors de la phase de gonflement structural correspondant à celle de la réhumectation intra-agrégat.

A une échelle plus réduite, la distribution des volumes de pores comprises entre $0.01\mu\text{m}$ et $30\mu\text{m}$, et l'arrangement des particules sont également des éléments majeurs pour quantifier la structure du sol. Dans cette optique, la taille des pores peut se mesurer directement par microscopie, ou par porosimétrie au mercure (Nagpal et al., 1972 ; Fies, 1984) (2). C'est ainsi que Newman et Thomasson (1979) ont étudié le développement de la structure du sol, en associant la mesure de son retrait poral aux propriétés physico-chimiques de l'eau et de l'air qui le caractérise, comme par exemple le potentiel chimique.

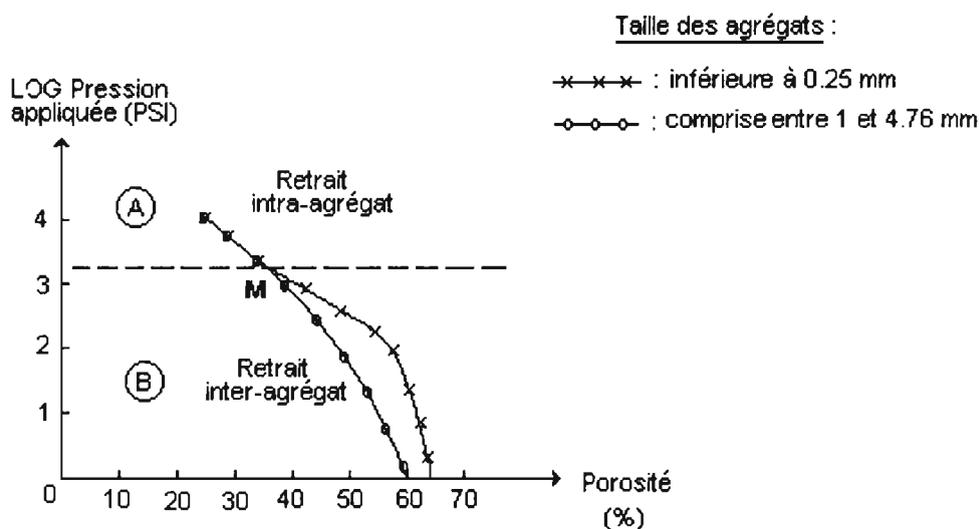


Fig. 1-II-1 : Variation de la pression appliquée en fonction de la porosité d'agrégats de deux tailles différentes, d'après Chang et Warkentin (1968).

(1) : L'hystérésis est le phénomène selon lequel les courbes déterminées par désorption ou drainage diffèrent de celles déterminées par sorption ou humidification (Musy et Soutter, 1991).

(2) : La porosimétrie au mercure permet de déterminer et de quantifier la répartition du volume poral en fonction de la taille des pores sur une gamme de pores accessibles à des rayons de constriction compris entre $100\mu\text{m}$ et quelques nm. Les échantillons analysés (mottes, agrégats ou autres) ont une taille de quelques cm^3 et sont déshydratés à l'air puis à l'étuve à 105°C .

D'après leurs expériences, on sait ainsi que :

- Les pores de taille comprise entre $0.01\mu\text{m}$ et $2\mu\text{m}$ (argiles) se contractent au séchage (1). Les pores instables dont la taille est située entre $0.2\mu\text{m}$ et $30\mu\text{m}$ (limons) disparaissent au séchage.
- Les pores stables de même taille résistent aux tensions de surface ; ils favorisent l'entrée d'air et permettent à de nouveaux pores de taille située entre $0.2\mu\text{m}$ et $2\mu\text{m}$ de se former et de se renouveler au cours de la déshydratation de l'échantillon.

Ce phénomène prouve l'existence d'une structure favorable capable de se régénérer après d'éventuels dommages.

L'intensité du retrait à l'échelle des agrégats est indépendante de leur mode d'assemblage. Grimaldi et Tessier (1986) ont démontré que l'essentiel du retrait se produisait entre $pF=3$ (2) et $pF=4.2$ (voir *fig. 1-II-2*) et que l'on pouvait émettre l'hypothèse selon laquelle le retrait le plus intense de la motte serait lié à la présence d'un volume de pores compris entre 1.5 et $0.1\mu\text{m}$, susceptible de se désaturer entre ces deux potentiels hydriques, mais aussi de se contracter pour qu'il y est retrait. Le retrait est partiellement fonction de l'importance des surfaces de contact entre agrégats et du maintien de ces contacts au cours de la dessiccation, assurant ainsi la répercussion du retrait des agrégats à la motte dans son ensemble.

Nous venons de voir qu'il existait une correspondance évidente entre les courbes de retrait exprimées en fonction du pF et celles exprimées en fonction de la teneur en eau (en cm^3/g), (voir *fig. 1-II-2*).

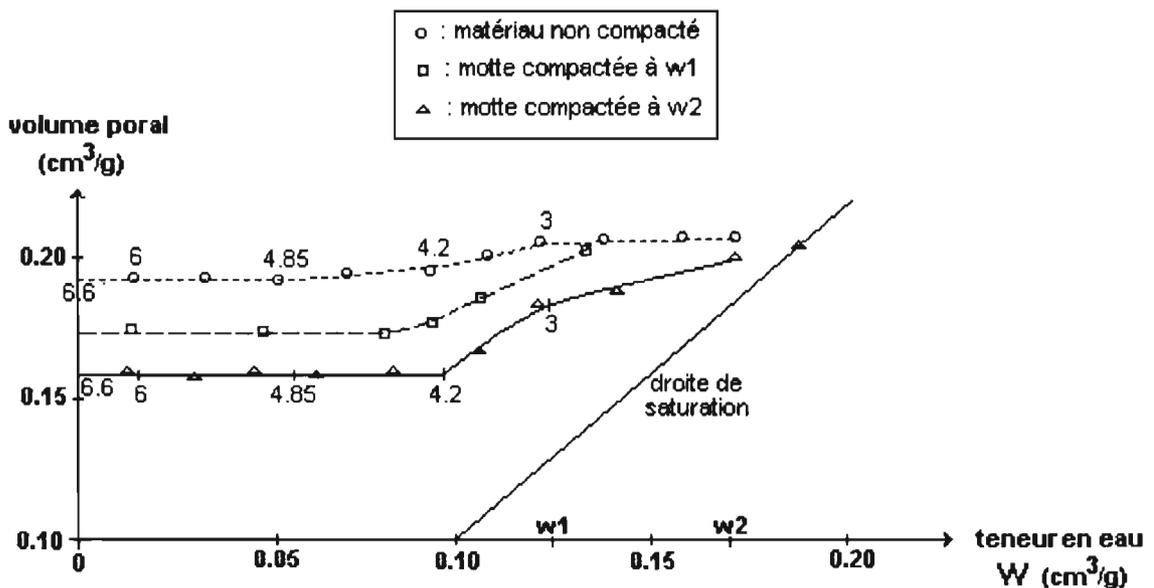


Fig. 1-II-2 : Variation du volume poral intra-agrégat et du volume poral de motte de sol limoneux au cours de la dessiccation, selon (Grimaldi et Tessier 1986).

(Les nombres le long des courbes indiquent les pF correspondants)

(1) : Voir composition granulométrique en pied de page 20.

(2) : voir définition ci-après.

Quelques notions de pF :

Définition du pF, d'après Bourrié et Pedro (19..) :

Le fait qu'une partie de l'eau d'un sol puisse « échapper » à l'action de la gravité signifie que son enthalpie libre est inférieure à celle de l'eau libre. On appelle « **potentiel de l'eau du sol** » cette diminution d'énergie, qui est due pour une part à des effets liés à la matrice solide (actions capillaires etc..) : c'est alors le **potentiel matriciel** ; et pour une autre part à la présence d'électrolytes dans la phase liquide, donc à la pression osmotique : c'est le **potentiel osmotique**.

Lorsque ces potentiels sont mesurés par analogie avec la succion nécessaire pour extraire l'eau leur correspondant, le pF est égal au logarithme décimal de la succion évaluée par la hauteur d'une colonne d'eau en centimètres.

En toute rigueur, le pF s'écrit donc : $pF = \log(H)$ (H est la succion positive, en cm d'eau)

On peut également exprimer le pF en fonction de l'activité de l'eau :

En effet, la transformation d'une mole d'eau pure à la pression de référence ($P_0 = 10^5$ Pascal) en une mole d'eau liée correspondant à une succion H exprimée positivement, c'est à dire soumise à une pression $P = P_0 - \rho_w^0 g (H/100)$, met en jeu une énergie ΔG .

(ρ_w^0 étant la masse volumique de l'eau et g l'accélération de la pesanteur, P et P_0 en Pascal)

Relation entre pF et enthalpie libre :

Si on considère une mole d'eau, de volume V_w^0 , à 25°C, l'énergie dépensée pour faire passer le volume molaire de P_0 à P correspond à la variation de l'enthalpie libre, soit :

$$\Delta G = \int_{P_0}^P \bar{V}_w^0 \cdot dP \quad (1)$$

$$\text{à } \bar{V}_w^0 \text{ constant, et d'après (1) : } \Delta G = -\bar{V}_w^0 \cdot \rho_w^0 g \frac{H}{100} \quad (2)$$

$$\text{si } M_w \text{ est la masse molaire de l'eau, } \rho_w^0 = \frac{M_w}{V_w^0}, \text{ et on peut écrire : } \Delta G = -M_w g \frac{H}{100} \quad (3)$$

et comme par définition, $pF = \log H$ et $\Delta G = -M_w g 10^{pF-2}$ (4), avec $M_w = 18.015 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{mole}^{-1}$ et $g = 9.8 \text{ ms}^{-2}$, on peut alors écrire :

$$\Delta G = -10^{pF-2.75} \quad (5)$$

Cette équation établit donc la relation entre le pF et la variation d'enthalpie libre d'une mole d'eau passant de l'état de référence (eau pure libre) à l'état d'eau pure liée au sol à température constante.

Mais comme au cours de cette transformation seul varie le potentiel matriciel, ΔG représente en fait le potentiel matriciel ψ_M qui est donc défini par :

$$\psi_M = -M_w g 10^{pF-2} \quad (6)$$

Si on se réfère à la définition donnée par Gibbs, le potentiel chimique n'est autre que l'enthalpie molaire partielle :

- Dans le cas de l'eau pure, à l'état liquide, on peut donc écrire : $\mu_w = \psi_M + \text{constante}$ (7)

- Pour l'eau pure libre prise dans l'état de référence (T et P), $\psi_M = 0$, et $\mu_w = \mu_w^0$ (8)

- Pour l'eau liée, on a la relation : $\psi_M = \mu_w - \mu_w^0 \neq 0$ (9)

Il suffit alors d'appliquer à l'eau la définition de l'activité donnée par Lewis (1907) :

$$\Rightarrow \mu_w = \mu_w^0 + RT \ln a_w \quad (10)$$

$$(8) \text{ et } (10) \Rightarrow \psi_M = RT \ln a_w \quad (11)$$

$$(6) \text{ et } (11) \Rightarrow RT \ln a_w = -M_w g 10^{pF-2} \quad (12)$$

$$\Rightarrow \log(-\ln a_w) = pF - 4.035 - \log T$$

Pour mieux définir le rôle de la structure pédologique sur le comportement hydrique du sol, Robain et Curmi (1986) ont comparé deux horizons argileux à structure différentes et ont calculé pour chacun d'eux des courbes d'humidité pondérale en fonction du pF appliqué, qui peuvent être assimilées à des courbes de retrait (*fig. 1-II-3*) :

- H1 hétérogène à porosité importante comprenant deux types de structures : une dominante à agrégats mesurant entre 0.3 et 1 mm et une autre de taille comprise entre 10 et 15 mm.
- H2 homogène à porosité plus faible, contenant une structure en polyèdres de taille comprise entre 5 et 10 cm.

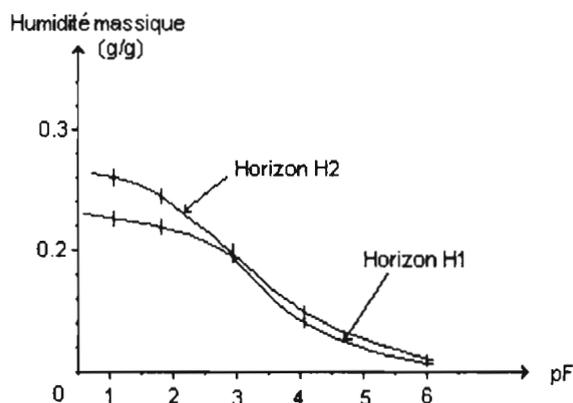


Fig. 1-II.3/ Courbes de variation d'humidité massique en fonction du pF, d'après Robain et Curmi (1986).

Ils constatent que le volume des vides *intermottes* est quantitativement équivalent pour les deux horizons. Le volume des vides *intramottes* est quant à lui formé par des pores vidés de leur eau à un pF inférieur à 2.5, résultant de l'assemblage des micro-agrégats. C'est à cette échelle de la structure interne des mottes que la différence d'organisation induit une différence de comportement hydrique, elle joue en effet un rôle prépondérant sur le comportement du sol à la fois par sa teneur en eau massique qui est un des paramètres de la sensibilité du sol au tassement, par sa teneur en eau volumique et par le taux de saturation qui gère les problèmes de réserve en eau du sol. En fait, les auteurs montrent que c'est le retrait intra-motte qui caractérise la structure du sol.

Bruand (1985 et 1986) compare des courbes de retrait expérimentales d'échantillons de sol reconstitués à partir de matériaux d'un même horizon, dont les agrégats sont de dimensions décimétrique, centimétrique, millimétrique et micrométrique (fig. 1-II-4).

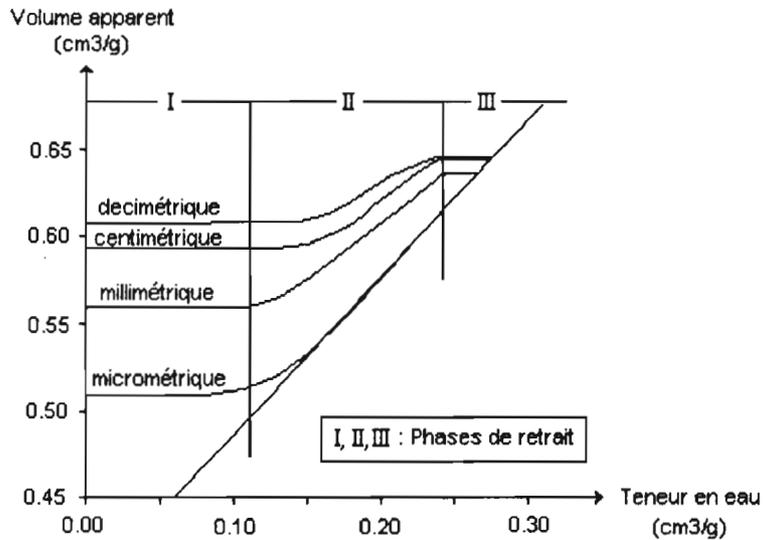


Fig. 1-II-4 : Courbes de retrait d'échantillons de dimension différente, d'après Bruand (1985 et 1986).

L'auteur note que l'espace poral des mottes de dimension centimétrique concerné par le processus d'extraction d'eau pour des valeurs supérieures à 0.25 cm³/g est identique à celui des mottes de dimension centimétrique et décimétrique.

Bruand et Prost (1987) remarquent sur des courbes de même type, que ce n'est seulement que dans la phase (II) que le volume apparent varie : cela signifie que le volume d'entrée d'air diminue au fur et à mesure que la taille des agrégats est réduite. On voit bien dans ce cas que *la pente du retrait normal caractérise la structure de l'échantillon de sol*, et quelle que soit la taille de ses agrégats et particules qui le constitue.

D'après Braudeau (1988a et b), il existe dans un sol structuré deux systèmes poraux micro- et macroscopique qui représentent respectivement un volume fonctionnel responsable du retrait global de l'échantillon et l'espace poral entre tous les agrégats. Le volume microporal ou « intra-agrégats » est constitué d'agrégats primaires et de plasma argileux dans lequel l'air pénètre à partir du point de transition entre les phases de retrait normal et résiduel.

Les deux systèmes poraux ont des propriétés hydro-structurales différentes. L'eau inter-agrégats correspond à celle du point qui sépare les phases de retrait normal et structural, c'est le point de « friabilité » (Braudeau 1988b, Colleuille et Braudeau 1996) ; elle dissocie les agrégats primaires entre eux.

Pour expliciter le fonctionnement de la structure du sol, Braudeau propose un modèle fonctionnel à partir de l'analyse d'une courbe de retrait d'un échantillon prélevé. Nous l'évoquerons plus précisément par la suite (chapitre III.2) car nous l'utiliserons pour l'analyse des courbes de retrait.

II.2/ Organisation des argiles au cours du retrait

La microscopie électronique à balayage a été utilisée dans l'étude de la structure du sol, notamment pour permettre de mieux comprendre le fonctionnement et le comportement des matériaux pédologiques. C'est ainsi que Tessier et Berrier (1979) analysent les constituants de pâtes argileuses et de mottes naturelles au cours de leur séchage, celles-ci étant soumises à des contraintes de succion hydrostatique appliquées (pF). Ils mettent au point un dispositif permettant de contrôler l'état hydrique de différentes mottes et établissent une relation de la teneur en eau en fonction de celle de l'argile. De plus, ils constatent que selon le type d'argile, l'organisation des particules est différente pour les mêmes contraintes appliquées :

- A pF = 2 (262 % d'eau), l'organisation du système poreux apparaît isotrope, et la taille des pores est de 2 μm .
- A pF = 3 (86 % d'eau), les éléments du "réseau" formé par l'organisation microscopique de l'argile se disposent parallèlement les uns aux autres.
- A pF = 4 (67 % d'eau), la taille des pores diminue fortement et les éléments du réseau "réseau" s'emboîtent, conduisant à une orientation isotrope.

En fait, au cours de la dessiccation progressive de l'argile (smectite), on distingue deux phases :

- A pF < 4 : L'épaisseur des feuillets est constante ; l'eau est évacuée à l'extérieur des feuillets (eau interparticulaire) et cela entraîne le rapprochement des particules et ce d'autant plus que le pF augmente (Tessier et al., 1980).

(A pF = 4 il ne reste plus que 10% d'eau interparticulaire).

- A pF > 4 : On extrait l'eau interfoliaire; les particules et les feuillets se rapprochent les uns des autres au sein de la particule, jusqu'au contact (cas de la kaolinite) et on est alors dans un système figé car on a atteint la *limite de retrait*.

La limite de retrait étant ainsi définie de façon différente, Tessier (1980) lui donne une signification en fonction de la nature de l'argile, de sa proportion dans le sol, et de ses caractéristiques propres (épaisseur des cristallites par exemple) (2).

Il trace des courbes de retrait représentant l'indice des vides en fonction des contraintes de pression (pF) appliquées (*fig. I-II-5*) à deux types d'argile différents, et constate que les phases de retrait bien connues dépendent de la nature des argiles suivant leurs caractéristiques dimensionnelles et structurales, et particulièrement la phase de retrait résiduelle.

(1) : Le point de friabilité est défini comme le point exact où la couche d'eau entourant les agrégats a complètement disparu, ceux-ci restant saturés. Il se produit alors leur individualisation (Braudeau, 1988a).

(2) : Les argiles sont des silicates d'aluminium plus ou moins hydratés, micro-cristallins, à structure en feuillets ; elles sont douées de propriétés particulières : par leurs charges négatives, elles retiennent des cations sous la forme échangeable ; certains ont la capacité d'absorber de l'eau entre les feuillets, ce qui provoque d'importantes variations de volume entre les saisons sèches et humides. Comme les colloïdes, elles peuvent se trouver dans le sol à l'état dispersé ou à l'état floculé, et jouent de ce fait un grand rôle dans la formation d'agrégats dont elles constituent, avec la matière organique, les ciments (Duchaufour, 1991).

Cela s'expliquerait par le mouvement des feuillets (cristallites) plus ou moins rigides qui se rapprochent les uns des autres et par leur déformation possible sous l'effet de la succion selon les épaisseurs. En effet, plus les cristallites sont épaisses, plus la limite de retrait sera atteinte à des pF faibles (il est alors d'autant plus facile pour l'eau de s'en échapper), et la rétraction en est plus importante.

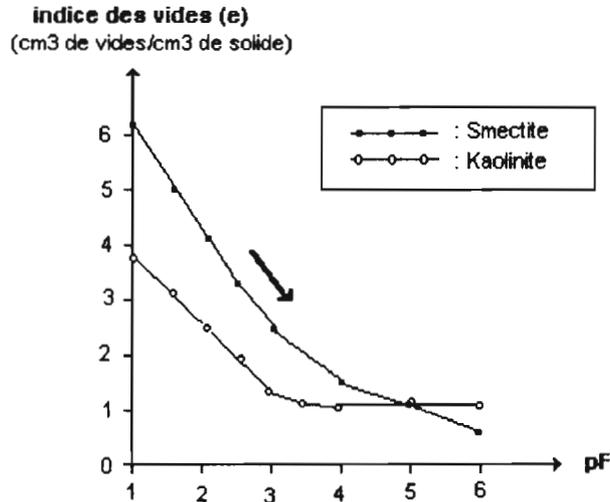


Fig. 1-II-5 : Courbes de retrait représentant l'évolution de l'indice des vides en fonction du pF appliqué de deux argiles, selon Tessier (1980).

La courbe de retrait des pâtes saturées d'argile est relativement mieux connue dans la littérature que celle d'échantillons de sol non remanié (Yong et Warkentin 1975). C'est une donnée essentielle des propriétés de gonflement-retrait des argiles.

A partir d'une courbe de retrait d'un échantillon de sol modélisée (Braudeau, 1988a et b), on peut déterminer la courbe de retrait de sa phase argileuse (Braudeau et Bruand, 1993) comme l'indique la figure Fig. 1-II-6. Afin de le prouver expérimentalement, les auteurs comparent le volume microporal déterminé par porosimétrie à mercure (Fiès, 1984) à celui calculé à partir de la courbe de retrait modélisée.

Cette méthode permet ainsi de définir certaines propriétés caractéristiques de la phase argileuse d'un échantillon de sol non remanié comme la *capacité de gonflement-retrait* (CGR), et la *capacité en eau utile* (CEU), sans qu'il soit nécessaire de l'extraire de l'échantillon de sol et donc sans que sa structure soit modifiée.

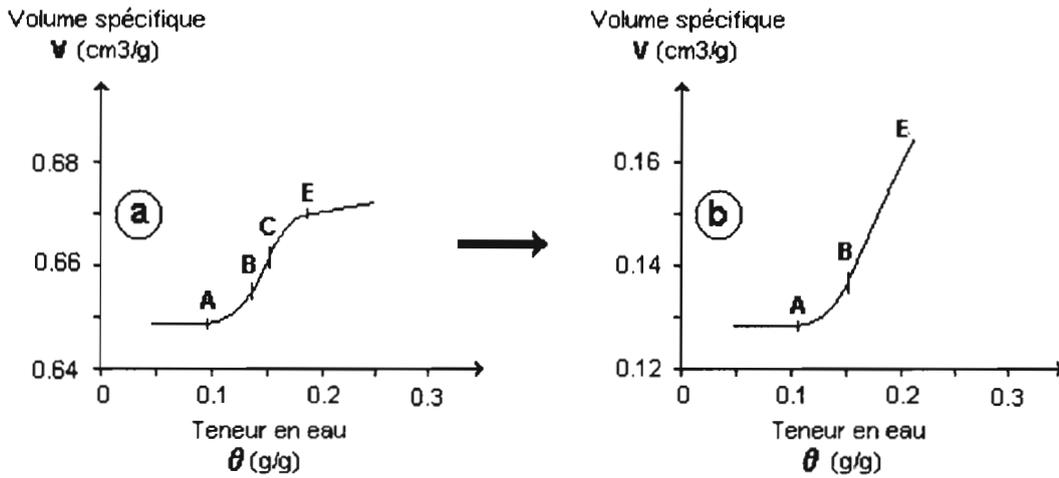


Fig. 1-II-6 : Courbe de retrait de l'échantillon de sol non remanié (a), et courbe de retrait du volume microporal (b) calculé en appliquant le modèle de retrait structural, d'après Braudeau et Bruand (1993).

Par la même méthode d'analyse, on peut obtenir la courbe de retrait caractéristique d'une kaolinite pure (figure 1-II-7) ; les caractéristiques présentées sur cette courbe sont les coordonnées des points qui font la transition entre les phases de retrait normale, résiduelle et nulle :

Point E = point maximum de gonflement : A partir de ce point, le retrait de l'argile se fait à l'état saturé le long de la droite de saturation. L'air ne pénètre pas dans l'échantillon et le retrait compense exactement le volume d'eau extrait. Le faible écart observé sur la figure entre la courbe de retrait et la droite de saturation est insignifiante par rapport aux erreurs expérimentales ou autres artefacts possibles (anisotropie du retrait, faible fissuration dès le départ de l'analyse, bulles d'air incluses...)

Notons que sur l'argile pure, il est difficile de déterminer ce point de saturation maximum avec précision car il dépend beaucoup des conditions expérimentales.

Point B = point d'entrée d'air dans le système poral de l'argile :

L'air commence à pénétrer dans la porosité de l'argile et remplace une partie de l'eau évaporée. Le point B est l'endroit précis où la courbe de retrait s'écarte de la droite de saturation.

Point A = point limite de retrait (*shrinkage limit*) : il sépare le retrait résiduel du retrait nul.

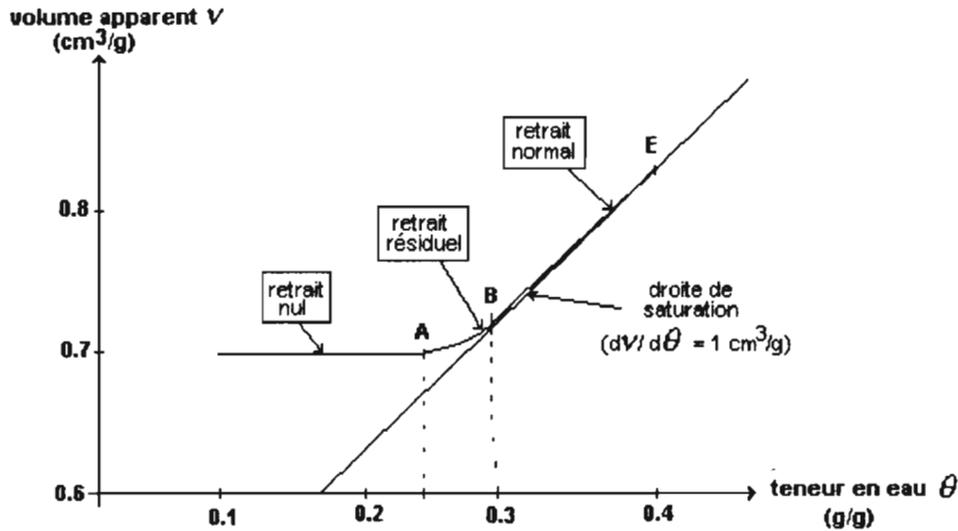


Fig. 1-II-7 : Courbe de retrait caractéristique d'une argile pure (kaolinite).

Remarque : Ces caractéristiques varient évidemment avec la pression externe alors qu'elles sont considérées ici à la pression atmosphérique, sans pression de confinement.

La position du point d'entrée d'air (B) dans l'argile dépend de la forme de ses particules (cristallites) et de leur encombrement au moment du retrait à l'état saturé. Les cristallites de kaolinite ont la forme de plaquettes hexagonales rigides relativement épaisses par rapport aux autres types d'argiles (0.05 à 5 μm). C'est pourquoi leur arrangement à la limite de retrait et au point d'entrée d'air présente une porosité interstitielle importante : respectivement 25 et 30% lues sur la courbe (fig.1-II-7), en accord avec les données mentionnées dans la littérature (Tessier 1978, Stengel 1981).

On peut considérer que *le point d'entrée d'air (B) et la limite de retrait (A) sont des caractéristiques intrinsèques de l'argile et la morphologie de ses particules.*

Par contre, la capacité de gonflement de l'argile (au dessus du point B), c'est à dire sa capacité à absorber l'eau, dépend, non plus de l'encombrement des particules entre elles, mais plutôt des conditions physico-chimiques environnantes :

- composition chimique de la solution de sol
- espace poral inter-agrégats
- cohésion de la structure d'assemblage s'il s'agit de l'argile du sol.

A partir de ces observations morphologiques et expérimentales, un modèle fonctionnel de la structure du sol, à l'échelle de la motte de terre prélevée d'un horizon (« fabric » dans la terminologie de Brewer) est proposé.

III./ MODELISATION DE LA COURBE DE RETRAIT

Pour interpréter le comportement des systèmes naturels mal connus et mieux comprendre les liens qui existent entre leurs divers éléments, il est nécessaire d'avoir recours aux modèles. Ceux-ci permettent de simuler leur évolution au cours du temps, en tenant compte des événements qui s'y déroulent. Plus précisément, afin de caractériser qualitativement et quantitativement la structure du sol et les éléments fonctionnels constitutifs, on modélise la courbe de retrait d'échantillons de sol. Pour cela, il faut ajuster une équation paramétrique qui s'ajuste à la courbe expérimentale observée.

Dans la bibliographie des sciences du sol, les tentatives de modélisation de la courbe de retrait d'échantillons de sol sont relativement peu nombreuses. Nous allons dans ce chapitre présenter brièvement les principales.

III.1/ Les différents modèles

- Yule et Ritchie (1980a et b), ont proposé un modèle de retrait à trois phases décrites par des segments de droite. Ils considéraient que le retrait total n'était en fait attribué qu'au retrait normal, négligeant de ce fait les phases de retrait structural et résiduel. (voir *fig. 1-III-1*).

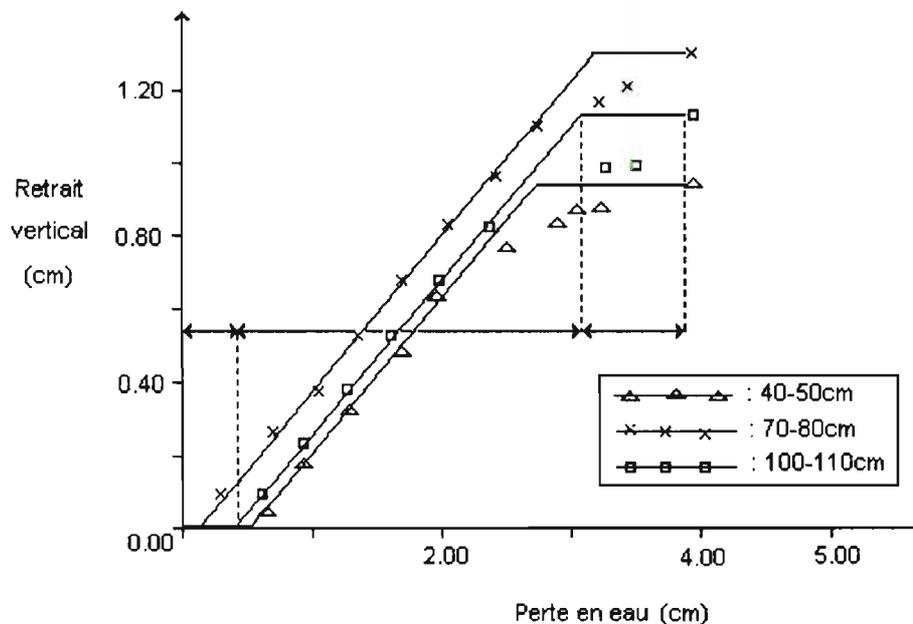


Fig. 1-III-1 : Courbes de retrait de vertisols prélevés à trois profondeurs différentes, d'après Yule et Ritchie (1980a).

- En formulant une équation générale obéissant au principe des états correspondants pour décrire le retrait volumique d'un milieu triphasique (sol, air, eau), Giraldez et al. (1983a et b) ont proposé un modèle de courbe de retrait par ajustement («**The General Soil Volume Change**»). Celui-ci ne tenait compte que de deux phases de retrait : normal et résiduel (fig. 1-III-2). Le changement de pente entre les deux phases correspondrait d'un point de vue thermodynamique à une transition de phases avant et après l'entrée d'air dans le sol argileux. C'est à ce point de transition que Sposito et Giraldez (1976) calculaient une fonction hydrodynamique universelle permettant de modéliser la courbe de retrait pour tous les types de sol.

Le modèle est décrit par le polynôme du troisième degré suivant :

$$v = v_s + 0.743 V_w \theta_{AE} + 0.230 \left(V_w / \theta_{AE} \right) \theta^2 + 0.027 \left(V_w / \theta_{AE}^2 \right) \theta^3$$

- . V_w représente la pente de la droite de saturation (elle est généralement égale à 1 pour une argile pure),
 - . θ est la teneur en eau massique au cours du retrait (g/g),
 - . θ_{AE} est la teneur en eau massique au point d'entrée d'air (g/g),
 - . v_s est le volume spécifique du solide (cm³/g),
 - . v est le volume spécifique de l'échantillon de sol (cm³/g).
- (La courbe de retrait est donc décrite par deux paramètres : θ_{AE} et v_s .)

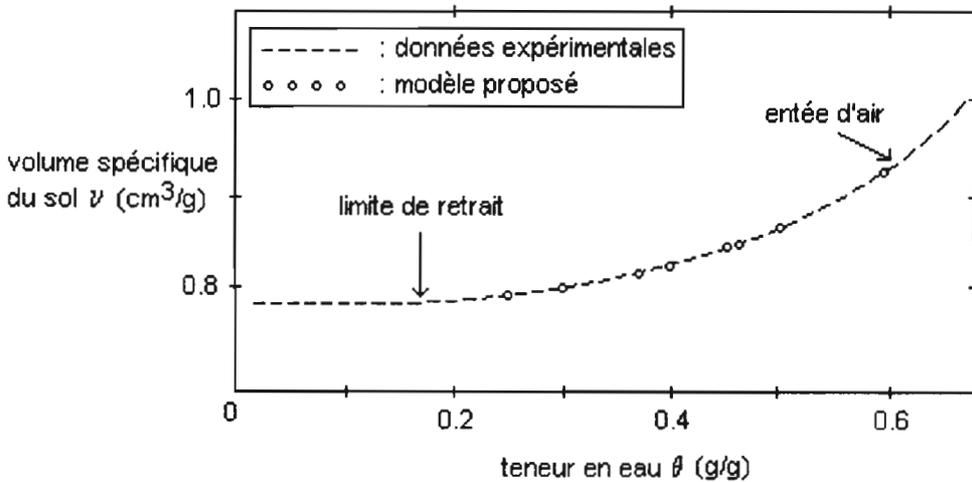


Fig. 1-III-2 : Modèle de Giraldez et al. (1983a) d'après les données de Fox (1964) sur des argiles noires de Houston.

- Mc Garry et Malafant (1987) ont également essayé, afin d'évaluer le comportement et la qualité de la structure d'un sol, de modéliser la courbe de retrait suivant trois phases de retrait (trois segments de droite) : structural, normal et résiduel (fig. 1-III-3).

Afin de valider leur modèle « en trois droites » (« Three Straight Lines Model »), ils l'ajustaient à trois courbes de retrait expérimentales tracées d'après les données de Johnston et Hill (1944), Newman et Thomasson (1979) et Chan (1982). Ce modèle s'avérait être le plus simple et celui qui donnait le meilleur ajustement. Il comporte trois segments de droite correspondant aux phases de retrait structural, normal et résiduel dont les pentes sont, contrairement aux modèles précédents, considérées comme des paramètres supplémentaires pour décrire la courbe de retrait. Celle-ci comporte huit paramètres qui sont les coordonnées des points de transition A, B, M v_s et α . Ces deux derniers modèles étaient limités en précision car les données expérimentales utilisées pour les définir étaient en nombre insuffisant pour décrire correctement toutes les phases de retrait.

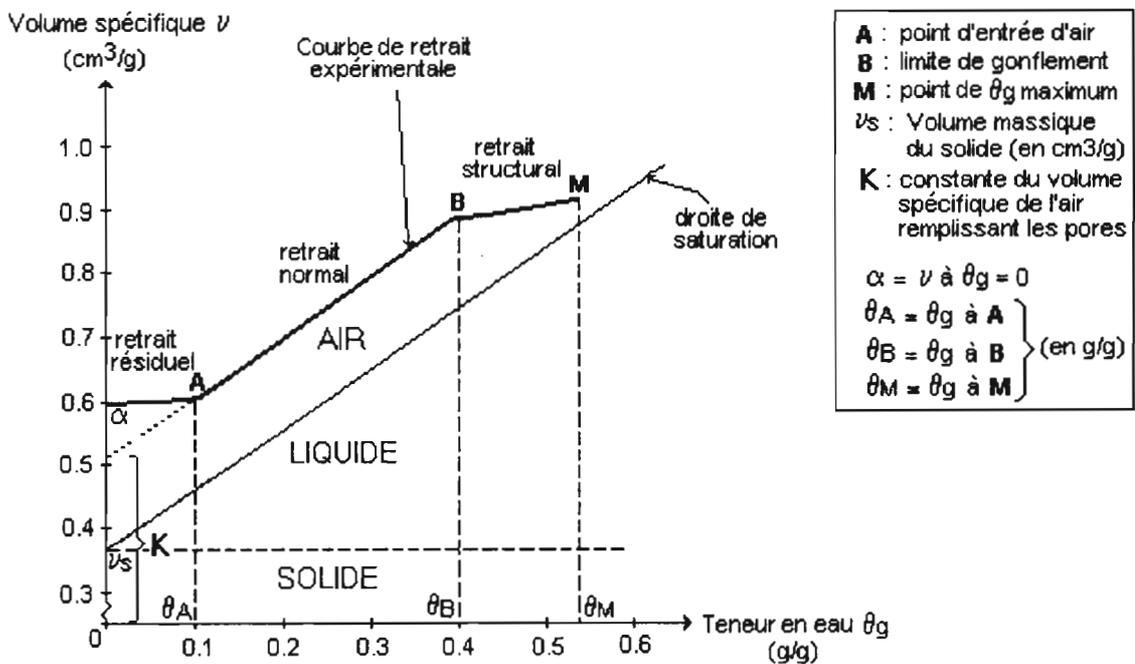


Fig. 1-III-3 : Modèle « en trois droites » de Mc Garry et Malafant (1987).

Le modèle est défini par les équations suivantes :

(1) Phase de retrait résiduel ($0 \leq \theta_g \leq \theta_A$) :

$$v = (\nu_s + \alpha) + \left(\frac{\theta_A - \alpha + K}{\theta_A} \right) \theta_g$$

(2) Phase de retrait normal ($\theta_A \leq \theta_g \leq \theta_B$) :

$$v = (\nu_s + K) + \theta_g$$

(3) Phase de retrait structural ($\theta_B \leq \theta_g \leq \theta_M$) :

$$v = (\nu_s + \gamma) + \left(\frac{\theta_B - \gamma + K}{\theta_B} \right) \theta_g$$

Plus tard, trois autres modèles ont été publiés :

- Un modèle paramétrique de la courbe de retrait ("**Modèle de Retrait Structural**") découpée en cinq parties limitées par quatre points A, B, C et E est établit par Braudeau (1988a et b), nous l'étudirons plus en détail en III.2/ de ce chapitre.
- Le modèle de Kim et al. (1992) qui simule le retrait d'échantillons d'un sol à argiles marines non évoluées, par ajustement exponentiel et linéaire suivant trois phases de retrait : structural, normal et résiduel (*fig. 1-III-4*).
Ils appliquent aux trois phases de retrait identifiées une série d'ajustements linéaire et exponentiel et définissent l'équation paramétrique exponentielle suivante

$$Y = \frac{a}{(e^{\alpha X})} + bx$$

- . Y est une variable représentant l'indice des vides,
 - . x est une variable indépendante représentant l'indice d'eau,
 - . a est un paramètre correspondant à l'indice des vides du sol séché à 105°C,
 - . b est un paramètre correspondant à la pente de la droite de saturation,
 - . α est un paramètre lié au point d'entrée d'air.
- (La courbe est donc décrite par trois paramètres : a, b et α).

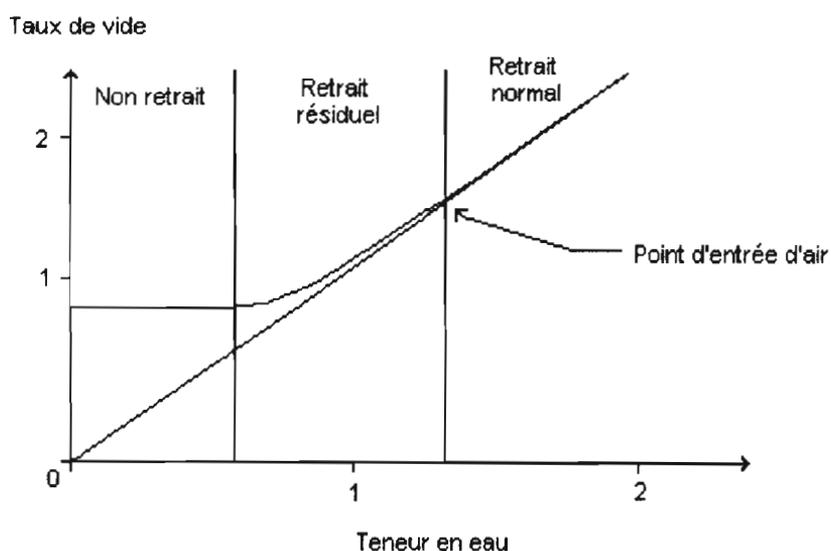


Fig. 1-III-4 : Modèle de Kim et al. (1992).

- Le modèle « **polynômial** » de Tariq and Durnford (1993) à la *fig. 1-III-5*, est, comme le modèle « exponentiel » de Braudeau, calculé par ajustement des équations des phases de retrait de la courbe théorique à la courbe expérimentale. Celle-ci est mesurée en continu sur le même échantillon, en utilisant une nouvelle méthode de mesure du retrait volumique du sol à différents degrés d'humidité, de la saturation à la limite de retrait : c'est la méthode à la « membrane extensible ». Le modèle est bâti sur le principe suivant lequel les phases linéaires sont représentées par des droites et les parties incurvées par des fonctions lui donnant une allure sigmoïdale en forme de "S". Il est défini pour chacune des phases de retrait par les équations polynomiales suivantes :

(1) Phase de retrait structurale :
$$e = a_0 + a_1 \vartheta + a_2 \vartheta^2$$
,

(2) phase de retrait normal :
$$e = e_r - \vartheta_r + \vartheta = e_n - \vartheta_n + \vartheta$$
,

(3) phase de retrait résiduel :
$$e = c_0 + c_1 \vartheta + c^2 \vartheta^2 + c^3 \vartheta^3$$
,

(4) phase de non retrait :
$$e = e_z$$
.

. e représente l'indice des vides,

. ϑ représente l'indice d'eau.

(La courbe de retrait est donc décrite par sept paramètres qui sont les coordonnées des points de transition : z, n et r).

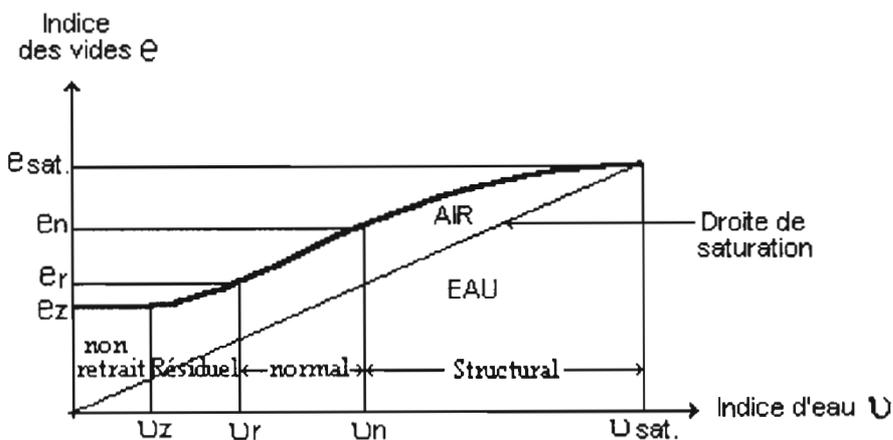


Fig. 1-III-5 : Modèle polynômial de Tariq et Durnford (1993).

III.2/ Le modèle de retrait structural (MRS)

III.2.1/ Modèle fonctionnel de la structure du sol

III.2.1.1/ Intérêt d'un modèle fonctionnel

En posant un modèle fonctionnel de la structure du sol, trois objectifs sont visés (Braudeau et al. 1996) :

- Afficher clairement l'approche morphologique et les hypothèses qui sont à la base du modèle, et donc de son interprétation ; ceci pour permettre une critique constructive du modèle.
- Donner une définition précise et cohérente des différentes variables descriptives de la structure du sol et de son fonctionnement en les référant au modèle.
- Modéliser ces différentes variables en fonction de la teneur en eau, en appliquant au modèle des équations paramétriques.

En effet, un modèle fonctionnel est une formalisation simplificatrice de la réalité, basée sur des observations expérimentales. Une représentation graphique du fonctionnement hydro-structurale est présentée à la *figure 1-III-8*. Son rôle est très important, car par lui sont définies sans ambiguïté toutes les variables descriptives de l'objet, variables qui par la suite peuvent être mesurées adéquatement ou modélisées quantitativement par l'application des lois physiques ou d'équations empiriques.

Il est constitué généralement d'un modèle descriptif ou morphologique de la structure de l'objet, accompagné d'un minimum d'hypothèses sur ses propriétés fonctionnelles.

III.2.1.2/ Le modèle morphologique

Le modèle morphologique du modèle fonctionnel que l'on veut poser est « une pièce » ou un maillon du modèle morphologique de la structure du sol mis en place par Brewer (1964).

Dans leur grande majorité, les sols présentent, à l'échelle d'une motte de 100 cm³ environ prélevée dans un horizon à structure homogène, un système poral bimodal. Il s'agit, selon Brewer, du niveau de structure secondaire (« soil fabric ») qui correspond à l'arrangement des agrégats primaires (« primary peds »), comme le montre la *figure 1-III-6*.

D'après lui, en effet,

« The levels of organisation due to the arrangement of peds, therefore, can be based conveniently on the size, shape and arrangement of the simplest peds (primary peds). Also, the s-matrix of soil materials with such complex arrangement of peds., is by definition, the material within the simplest peds exclusive of pedological features other than plasma separation » (Brewer 1964).

L'agrégat primaire («primary ped») est donc une unité de description essentielle de la structure du sol ; il est défini, non par sa taille comme le note Brewer, mais par le fait qu'il ne puisse être divisé en agrégats plus petits.

Notons qu'avec l'agrégat primaire est aussi défini le matériau plasmique qui le constitue, appelé aussi « **s-matrix** » par Brewer : c'est le mélange intime de plasma, sables ou grains du squelette et vides lacunaires. Ainsi, en concordance avec cette description morphologique de la structure du sol, deux systèmes de porosité se distinguent morphologiquement et fonctionnellement (*fig. 1-III-6*) ; on peut ainsi sans ambiguïté définir :

- Une microporosité qui serait celle de la « s-matrix » constituant les agrégats primaires. Négligeant la porosité de leurs éventuels autres constituants, le volume microporal est donc le volume poral des agrégats primaires.
- Une macroporosité qui serait la porosité d'assemblage, inter-agrégat, quel que soit leur niveau d'échelle (primaire, secondaire...).

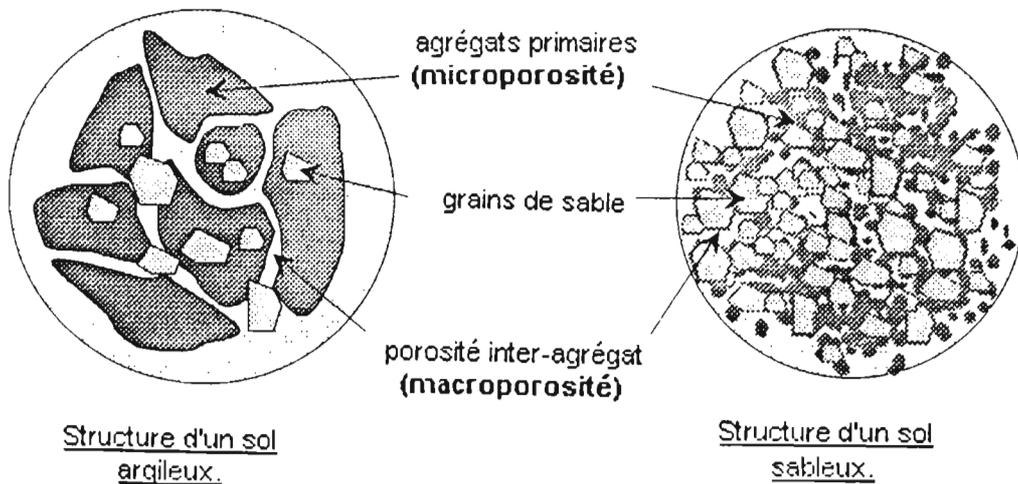


Fig. 1-III-6 : Modèle morphologique de la structure du sol à ses deux niveaux d'organisation (Braudeau et al., 1996).

III.2.1.3/ Les deux hypothèses de fonctionnement

On a vu précédemment que l'on pouvait calculer et tracer automatiquement et de façon continue la courbe de retrait d'échantillon de sol structurés (Braudeau, 1987). A partir de l'expression mathématique de Sposito et Giraldez (1976) qui calculent une équation paramétrique universelle traduisant thermodynamiquement un changement d'état triphasique du sol au point d'entrée d'air dans sa microporosité, Braudeau (1988a) propose un modèle du « fonctionnement structural d'un échantillon de sol avec la variation de la teneur en eau ». Ce modèle est comparé aux courbes de retrait expérimentales mesurées. Son fonctionnement repose sur des hypothèses qui définissent les deux systèmes de porosité micro. et macroscopiques précédemment définis, et permet de quantifier les volumes d'eau, d'air de pores répartis dans ces deux systèmes, en fonction de la teneur en eau de l'échantillon :

- Première hypothèse :

Il existe un système poral microscopique qui constitue l'un des volumes fonctionnels responsable du retrait global de l'échantillon de sol, d'après le modèle de Brewer (1964) : c'est celui de ses agrégats primaires constitutifs. Son point d'entrée d'air est le point de transition entre les phases de retrait normal et résiduel (point B sur la courbe). A ce point, la porosité du système est égale à la teneur en eau de l'échantillon correspondante : $V_{\text{micro}} = W_B$ (en cm^3/g)

- Deuxième hypothèse :

La variation du volume global d'un échantillon de sol à structure en agrégats est une combinaison linéaire des volumes fonctionnels composant l'échantillon, responsables du retrait (agrégats primaires), et de l'eau inter-agrégats.

En fait, la première hypothèse définit qualitativement un volume fonctionnel de volume poral V_{mi} et de teneur en eau W_{mi} , dans lequel l'air pénètre à partir du point B de la courbe de retrait.

La deuxième hypothèse exprime la relation entre le volume global de l'échantillon, ses volumes fonctionnels consécutifs causant le retrait, et l'eau inter-agrégats contenue dans la macroporosité. En confrontant le modèle défini par ces hypothèses aux données expérimentales, on établit les expressions suivantes :

$$\boxed{dV = K_{(C-B)} dV_{\text{p,mi}} + K_{(F-E)} dW_{\text{ma}}} \quad (\text{en } \text{cm}^3/\text{g}) \quad (1),$$

avec : $\boxed{dV_{\text{p,mi}} = x dW} \quad (2),$

et. $\boxed{dW_{\text{ma}} = (1-x) dW} \quad (3).$

x représente la fraction de l'eau s'évaporant de l'échantillon, provoquant le retrait de $V_{\text{p,mi}}$. $K_{(C-B)}$ et $K_{(F-E)}$ étant respectivement les pentes des phases de la courbe de retrait normal et structural, (voir *fig. I.III.7*) w_{ma} la teneur en eau de la macroporosité (en cm^3/g), et $V_{\text{p,mi}}$ le volume poral de la microporosité (en cm^3/g).

Ainsi, la courbe de retrait peut-être décrite en totalité par cette équation paramétrique (1). Les points qui délimitent ses brusques changement de pente (A, B, C,...) représentent des points caractéristiques qui séparent en fait les quatre phases de retrait (structural, normal, résiduelle, et non retrait). Les coordonnées de ces points sont les paramètres de la courbe de retrait (voir figure 1-III-7)

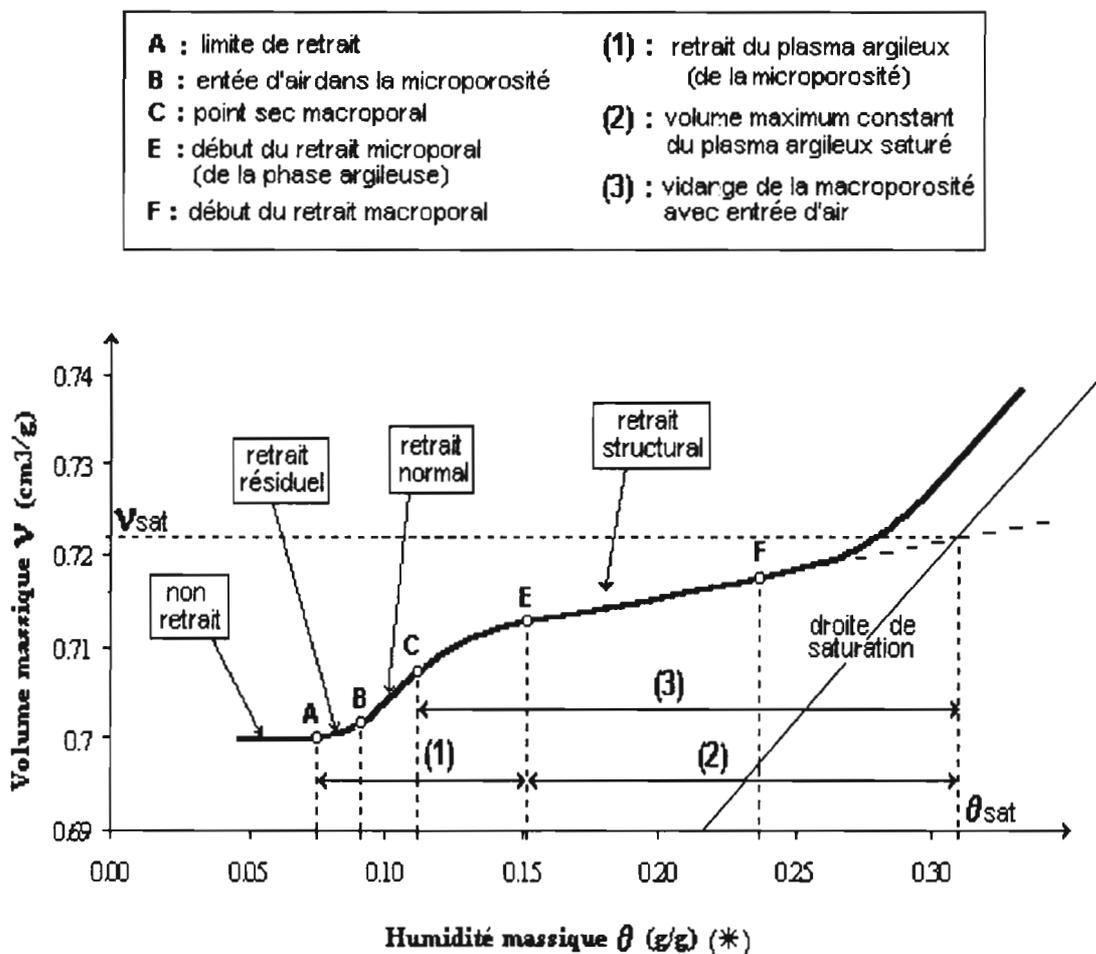


Fig. 1-III-7 : Description du retrait d'un échantillon de sol ferrugineux reconstitué : Phases de retrait et points caractéristiques selon le Modèle de Retrait Structural (Braudeau, 1988 a et b).

(*) : La teneur en eau massique θ exprimée en (g/g) est équivalente à la teneur en eau W exprimée en (cm³/g) si l'on considère que la masse volumique de l'eau est égale à 1g/cm³.

En fait, d'après le modèle morphologique précité, le point **E** correspond au point maximum de gonflement du plasma argileux du sol (dans les agrégats primaires), et le point **C** représente le « point sec macroporal » comme le montre la *fig. 1-III-7* ; c'est le point où l'eau ne se situe plus que dans le système poral du plasma argileux, la porosité inter-agrégat est alors entièrement remplie d'air et la porosité plasmique saturée d'eau. Il est appelé point de *friabilité* du sol (Braudeau, 1988b ; Braudeau et Colleuille, 1996). Le point **B** est le point d'entrée d'air dans la porosité plasmique des agrégats primaires. Le point **A** correspond à la limite de retrait du plasma argileux et de l'échantillon global.

Les différentes parties linéaires et incurvées de la courbe représentant ses phases de retrait sont mises en équation, et ajustées à la courbe expérimentale. On en déduit huit paramètres indépendants : **VA**, **wA**, **wB**, **wC**, **wE**, **K_(F-E)**, **K_(C-B)**, et **V_s** (volume massique de la phase solide) mesurés sur la courbe de retrait, permettant de calculer pour toutes teneurs en eau **W**, tous les volumes structuraux (**V**, **V_{mi}**, **V_{ma}**) de l'échantillon ainsi que la répartition de l'eau (**w_{mi}**, **w_{ma}**) et de l'air (**V_{mi} - w_{mi}**), et (**V_{ma} - w_{ma}**) dans celui-ci.

III.2.1.4/ Les propriétés du modèle

Le scénario du retrait de l'échantillon de sol et les différents points particuliers sont représentés à la *figure. 1-III-7*, à partir d'une courbe de retrait mesurée sur un échantillon de sol ferrugineux, sablo-argileux du Sénégal contenant 20% d'argile. L'équation (1) peut s'écrire :

$$dv = K_{no} \cdot dV_{p_{mi}} + K_{st} \cdot \frac{d\theta_{ma}}{\rho_w}$$

K_{no} et **K_{st}** étant respectivement les pentes des phase de retrait normal (C-B) ou « basic » d'après Mitchell (1992) et structurale (F-E) (*fig. 1-III-7*).

➤ Les variables descriptives du modèle

Les variables descriptives des états hydro-structuraux du sol sont définis sur le graphique de la *figure. 1-III-8*, construit à partir des hypothèses du modèle fonctionnel décrivant deux systèmes poraux :

- **Le système microporal** est exclusivement celui du plasma argileux, milieu déformable, composé du mélange de particules fines (argile, hydroxydes, matière organique, limons fins...) dont le point d'entrée d'air est le point B sur la courbe. La phase de retrait microporal (retrait de la phase argileuse) s'étend de A à E.

La phase de retrait A-C est propre à celle de l'argile pure, mais la phase argileuse commence à se rétracter au point E. Son volume poral $V_{p,mi}$, rapporté à la masse de l'échantillon sec est donc parfaitement défini en ce point, tel que :

$$V_{p,mi}(B) = \frac{\theta_B}{\rho_w}$$

- * $V_{p,mi}(B)$ représente le volume poral micro. au point B (exprimé en cm^3/g).
- * θ_B représente la teneur gravimétrique en eau au point B (en g/g).
- * ρ_w exprime la masse volumique de l'eau $\approx 1\text{g}/\text{cm}^3$.

V_{mi} est alors considéré comme un volume fonctionnel composé d'éléments structuraux dont l'arrangement forme le volume global de l'échantillon : Braudeau (1988b) les appelle « *agrégats fonctionnels* » du sol. Il définit le volume poral inter-agrégats (Chang et Warkentin, 1968).

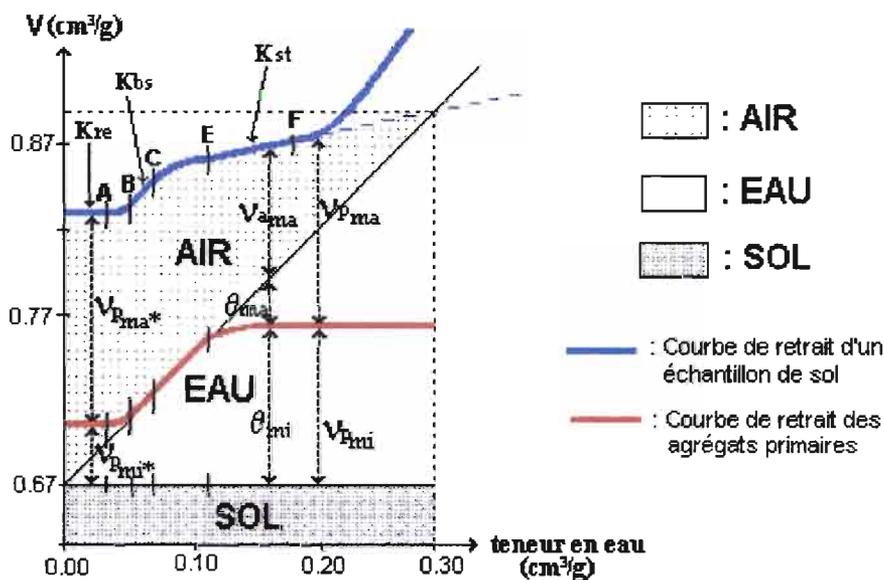
- **Le système macroporal** représente la porosité d'assemblage, hors plasma argileux. Sa propriété essentielle, qui permet de la différencier du système poral précédent, est sa faible variation structurale en fonction de la teneur en eau. La phase de retrait **macroporale** s'étend de F à C ; F-E correspondant au retrait structural. C'est en majeure partie la porosité inter-agrégat qui contient des fissures, tubules et interstices, sans distinction de taille et de forme (son volume poral est V_{ma}). L'eau y est retenue par des forces capillaires, dépendantes de la présence de ménisques en contact avec l'air :

$$v_{p,ma} = (v - v_{p,mi} - v_s)$$

- * $v_{p,ma}$ représente le volume poral macro. (en cm^3/g)
- * v est le volume massique total de l'échantillon de sol (en cm^3/g)
- * $v_{p,mi}$ le volume massique poral micro. (en cm^3/g)
- * v_s exprime le volume massique de la phase solide étant égal à l'inverse de ρ réelle (en cm^3/g).

- $K_{(C-B)}$ est la pente de la phase de retrait normal (appelée K_{no}). Elle se présente comme la dérivée partielle du volume global de l'échantillon V par rapport au volume de la microporosité dV/dv_{mi} . De ce fait, K_{no} caractérise la structure de l'échantillon de sol en deux niveaux d'organisation emboîtés l'un dans l'autre : la microporosité dans l'échantillon de sol.

$$K_{(C-B)} = \frac{dV}{dv_{mi}} = \text{cst.} \quad (K_{(C-B)} = K_{no}).$$



VOLUMES SPECIFIQUES :	TENEURS EN EAU :
V : volume spécifique de l'échantillon de sol (cm ³ /g)	θ : Teneur gravimétrique en eau de l'échantillon de sol (g/g)
$V_{p_{ma}}$: Volume poral de la macroporosité (cm ³ /g)	θ_{ma} : Teneur en eau dans la macroporosité (g/g)
$V_{p_{mi}}$: Volume poral de la microporosité (cm ³ /g)	θ_{mi} : Teneur en eau dans la microporosité (g/g)
$V_{p_{mi}}^* = V_{p_{mi}}$ cst. à $\theta < \theta_A$ (cm ³ /g)	θ_{sat} : Teneur en eau à saturation (g/g)
$V_{p_{ma}}^* = V_{p_{ma}}$ cst. à $\theta < \theta_A$ (cm ³ /g)	
$V_{a_{ma}}$: Volume d'air dans la macroporosité (cm ³ /g)	
V_{sat} : Volume du sol à saturation (cm ³ /g)	PENTES DES PHASES DE RETRAIT :
V_s : Volume spécifique du solide ("densité réelle") en (cm ³ /g)	K_{re}, K_{bs}, K_{st} : Pentes des phases linéaires de retrait

Fig. 1-III-8 :
 Représentation graphique du fonctionnement hydro-structural du sol suivant le Modèle de Retrait Structurale (Braudeau et al., 1996).

➤ *Calcul des teneurs en eau et en air associées à chacun des deux systèmes :*

Pour calculer les différentes teneurs en eau et en air des deux systèmes poraux, on exprime toutes les variables descriptibles, définies d'après le modèle fonctionnel explicité à la figure 1-III-8 précédente, en fonction de V et θ :

- Les teneurs volumiques en eau micro. et macroporales θ_{mi} et θ_{ma}
- les volumes micro. et macroporaux v_{pmi} et v_{pma} les teneurs en air volumiques micro. et macroscopiques w_{ami} et w_{ama} .

En plaçant ces points dans l'équation (1), et en intégrant à partir du point B où $\theta_{miB} = \theta_B$, on obtient :

Pour $\theta > \theta_B$:

$$v_{pmi} = \frac{\theta_B}{\rho_w} + \frac{\left((v - v_B - K_{st}) \left(\frac{\theta - \theta_B}{\rho_w} \right) \right)}{(K_{no} - K_{st})}$$

v_{pmi} en cm^3/g (volume de vide/g de sol sec)

$$\theta_{mi} = (v_{pmi} \cdot \rho_w) \quad \text{en g/g (g d'eau / g de sol)}$$

et $v_{pma} = (v - v_{pmi} - v_s)$ en cm^3/g

où v_s est le volume massique de la phase solide : $v_s = v_{sat} \cdot \left(\frac{\theta_{sat}}{\rho_w} \right)$

$$\theta_{ma} = (\theta - \theta_{mi}) \quad \text{en g/g}$$

$$w_{ami} = 0 \quad \text{en } cm^3/g$$

$$w_{ama} = (v - v_s) - \left(\frac{\theta}{\rho_w} \right) \quad \text{en } cm^3/g$$

Pour $\theta < \theta_B$:

$$v_{p\text{mi}} = \left(\frac{\theta_B}{\rho_w} \right) + \left(\frac{v - v_B}{K_{no}} \right) \quad \text{en cm}^3/\text{g}$$

$$v_{p\text{ma}} = (v - v_{p\text{mi}} - v_s) \quad \text{en cm}^3/\text{g}$$

$$\theta_{mi} = \theta \quad \text{en g/g}$$

$$\theta_{ma} = 0 \quad \text{en g/g}$$

$$w_{a\text{mi}} = \left(v_{p\text{mi}} - \frac{\theta}{\rho_w} \right) \quad \text{en cm}^3/\text{g}$$

$$w_{a\text{ma}} = (v - v_{p\text{mi}} - v_s) \quad \text{en cm}^3/\text{g}$$

Ces équations montrent l'utilité d'une telle modélisation de la relation $v = f(\theta)$ permettant le calcul de chacune des variables précédentes en fonction de la teneur en eau.

θ_A , θ_B , θ_C et θ_E sont des propriétés intrinsèques de la microporosité liées aux propriétés de réarrangement de ses particules constitutives.

V_A , V_s , K_{no} et K_{st} sont des propriétés d'arrangement des agrégats au niveau de l'échantillon. Ces grandeurs mesurées constituent donc des paramètres structuraux du sol, caractérisant le comportement de la structure variable et fonctionnelle.

IV./ LES MESURES DE RETRAIT ET GONFLEMENT EN GEOTECHNIQUE

Introduction

La *géotechnique* fait appel aux techniques du génie civil qu'elle applique à l'étude du *sol* et de la *roche*, c'est à dire aux matériaux naturels qui constituent l'écorce terrestre. Elle se divise en plusieurs branches dont la mécanique des sols et la mécanique des roches qui s'intéressent respectivement à leurs caractéristiques et leurs propriétés mécaniques.

La mécanique des sols est en fait l'application à l'étude des sols des principes de base de la mécanique, tels que la dynamique, la mécanique des fluides et la mécanique des matériaux. En effet, tout comme l'eau, le béton et l'acier, qui sont des matériaux industriels courants dans le domaine du génie civil, le sol est un matériau de construction ou une matière sur laquelle on érige des structures ; c'est pourquoi il est très important d'en comprendre le comportement et d'en connaître les propriétés. Nous retracerons ici brièvement celles des phénomènes de retrait et gonflement des sols.

IV.1/ Les phénomènes de retrait et gonflement en géotechnique

Le retrait et gonflement des sols naturels sont spécifiques à certains sols argileux, et principalement lié aux variations de leurs teneurs en eau.

Le gonflement en terrain rocheux résulte essentiellement de l'expansion en présence d'eau de certains minéraux argileux (sméctites) et est susceptible d'apparaître dans des environnements géologiques extrêmement variés.

Les sables et les limons sableux présentent également des cycles de retrait et gonflement suivant les fluctuations de leur teneur en eau, mais il s'agit de phénomènes rares dont les manifestations sont très limitées.

La **structure** désigne l'organisation microscopique et moléculaire des **feuillet**s argileux, de leur organisation interne en réseaux cristallins, à l'assemblage élémentaire de ces feuillet

s en **plaquettes**.

- A l'échelle *microscopique* de l'argile, le gonflement lié à une augmentation de la teneur en eau et à une acquisition de cette eau au sein de la structure même de l'argile est dit **inter- foliaire**.
- A l'échelle *macroscopique* de l'argile, l'organisation des plaquettes qui dépend de leur taille, la distance qui les sépare, et la force de liaison de l'eau qui les relie entre elles (cohésion), va gouverner le comportement mécanique de l'argile durant les phénomènes de retrait et gonflement afin de les identifier physiquement et mécaniquement, et définir les besoins de fondation de la construction. L'acquisition d'eau supplémentaire au sein de cette texture provoquera une augmentation du volume du sol en écartant les plaquettes les unes des autres : c'est le gonflement **interparticulaire**.

Nous aborderons dans cette partie, particulièrement le comportement des sols gonflants, les conséquences sur les bâtiments, et les différentes méthodes de mesure de retrait dans ce domaine industriel.

IV.2/ Les conséquences sur les constructions

Après 1976, les années sèches successives de 1989, 1990 et 1993 sont lourdement ressenties par les assureurs.

Les sinistres dues aux phénomènes de retrait et gonflement, notamment sur les pavillons et constructions légères sont de plus en plus nombreux. Les dommages touchent également les voiries et réseaux divers : les réseaux de drainage subissent par exemple des inversions de pente qui provoquent le débordement des drains et en conséquence de quoi alimentent elles-même le phénomène.

Les routes (non conçues pour les sols gonflants) peuvent être quasi-détruites, après quelques saisons, par l'action du retrait-fissuration qui favorise la pénétration de l'eau et donc le gonflement en profondeur.

Certains grands tunnels comme celui du Lac du Bourget construit de 1974 à 1978 se soulèvent à raison de plusieurs cm/an avec, pour cet exemple, une pression de gonflement de 13.5 MPa., provoquant des fissurations longitudinales et une dislocation partielle du radier bétonné (Robert, 1991).

Outre qu'il puisse s'agir d'un gonflement ou d'un tassement, la déformation du sol de fondation, principalement en fonction de la rigidité de la structure portée, peut prendre deux aspects :

- Déformation de type flexion.
- Déformation de type cisaillement.

Dans le premier cas, tout comme une poutre sur deux appuis, une face va être comprimée et l'autre sera tendue et parcourue en conséquence de fissures de traction subverticales, alors que dans le second cas (cisaillement) les fissures vont être générales dans toute la section de la poutre et orientées à 45° (*fig. I-IV-1*).

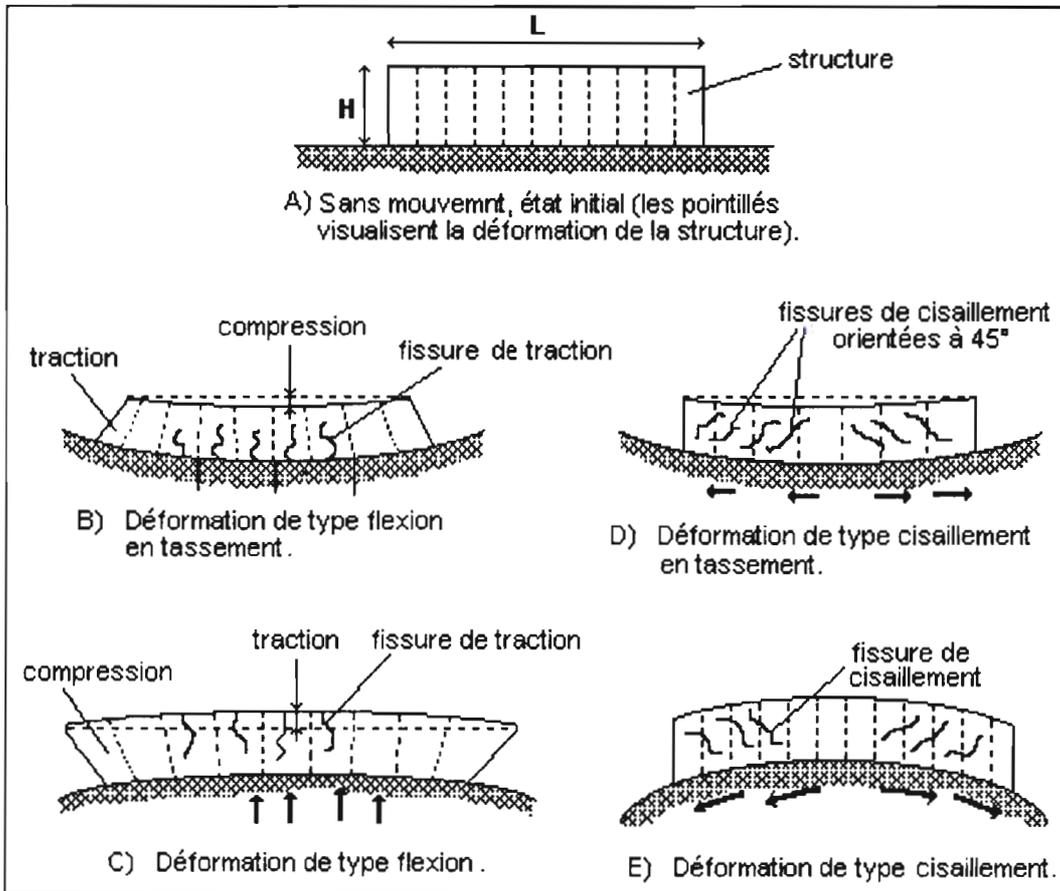


Fig. 1-IV-1 : Formes et directions de fissuration, selon Mouroux, Margron et Pinte (1988).

IV.3/ Les méthodes de mesure du retrait et gonflement des sols

Le retrait des sols, sous l'effet d'une diminution de leur teneur en eau, a été jusqu'à présent beaucoup moins étudié que le phénomène inverse, celui du gonflement des sols argileux sous l'effet d'une augmentation de leur teneur en eau.

IV.3.1/ Mesure en laboratoire

Il n'y a pas actuellement d'essai de retrait normalisé. Des résultats assez récents permettent cependant de proposer un essai simple qui paraît très intéressant et qui quantifie le retrait d'un échantillon de sol entre l'état de teneur en eau initial et un état de dessiccation donné.

Philipponnat (1990) propose en effet une méthode qui consiste à mesurer le poids et le volume d'un échantillon de sol intact ou reconstitué, de forme cylindrique, à différents intervalles de temps, tout au long de son dessèchement.

Il en détermine une loi entre l'amplitude de gonflement linéaire relatif $\Delta H/H$ (%) lorsque le sol supportant une contrainte totale $\sigma < P_g$ est soumis à une alimentation en eau libre, c'est à dire lorsque la succion devient nulle (*fig. 1-IV-2*).

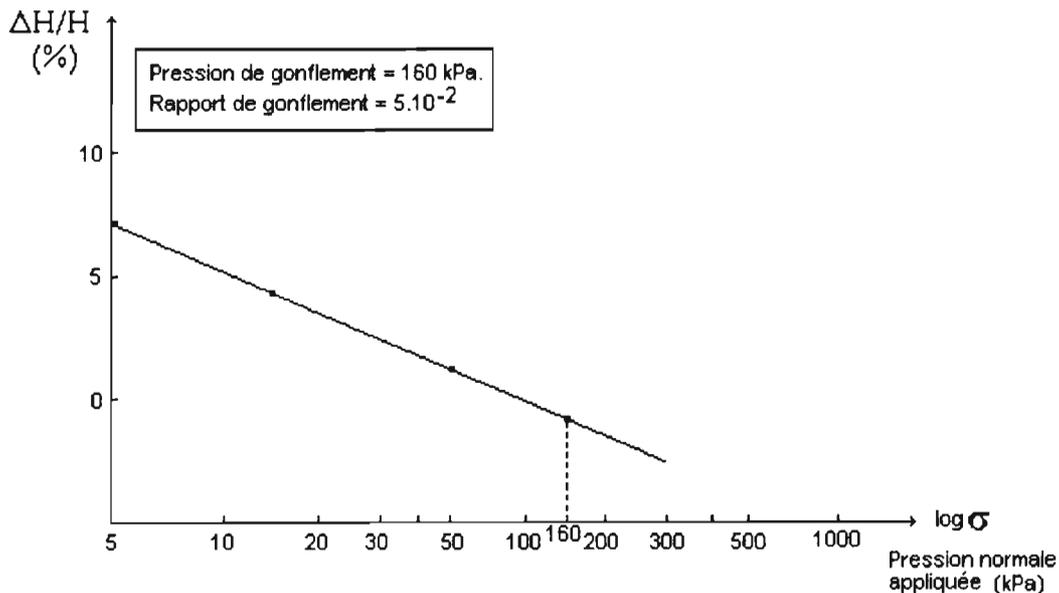


Fig. 1-IV-2 : Relation linéaire entre ($\Delta H/H$) et $\log(\sigma)$, selon Philipponnat (1990).

Cette figure montre le gonflement linéaire relatif $\Delta H/H$ (%) qui se produit lorsque le sol supportant une contrainte est soumis à une alimentation en eau libre, c'est à dire lorsque la succion devient nulle.

Le retrait peut aussi être exprimé en fonction du potentiel matriciel = pF (ou capillaire) de l'eau retenue par le sol :

Le fait qu'une partie de l'eau du sol puisse échapper à l'action de la gravité signifie que son énergie libre a diminuée par rapport à celle de l'eau libre. On appelle **potentiel matriciel** cette diminution d'énergie. Ce potentiel matriciel noté ψ représente le travail à fournir à la masse pour compenser la diminution d'énergie ; il est exprimé en g/cm^2 , en atm. ou en cm de hauteur d'eau. Sa variation avec la teneur en eau est classiquement représentée par des courbes de potentiel matriciel où $pF = \log \psi$ en fonction de la teneur en eau (*fig. 1-IV-3*).

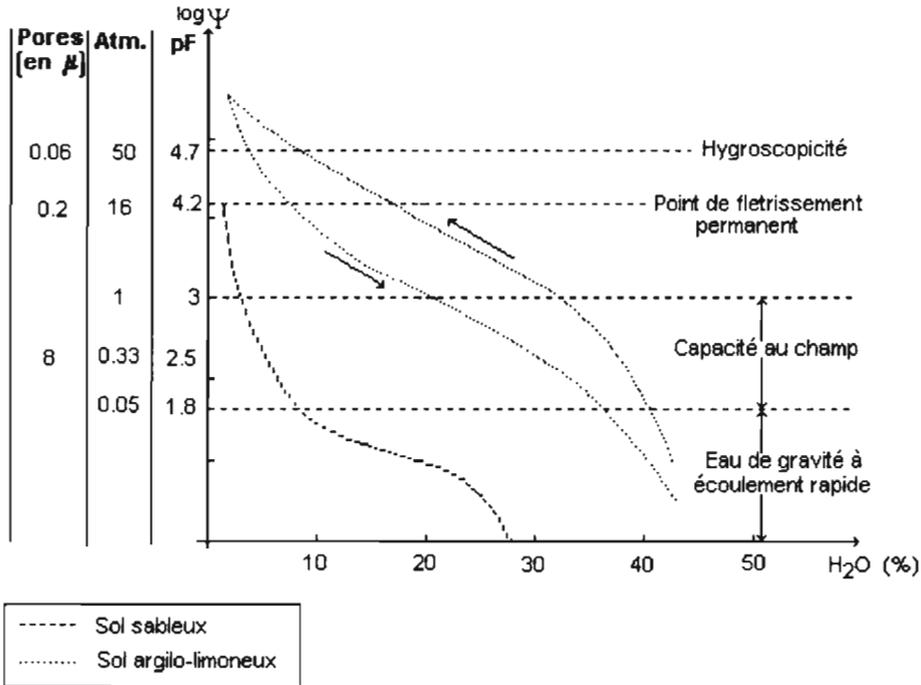


Fig. 1-IV-3 : Courbes du potentiel matriciel (pF), selon Atlan (1991).

Toute variation de ψ conduit à une variation égale de la contrainte effective et donc à une déformation (principe de Terzaghi) :

- Une augmentation de ψ liée à une diminution de la teneur en eau implique une consolidation, donc un **retrait**.
- Une diminution de ψ liée à une augmentation de la teneur en eau entraîne une relaxation des contraintes, donc un **gonflement**.

Voyons à présent un exemple d'une méthode de mesure du retrait et gonflement réalisée en laboratoire : mesure à l'oedomètre.

Mesure à l'oedomètre :

• Essai de gonflement :

Plusieurs types d'approche sont décrites par différents auteurs. Cependant, les spécialistes s'accordent sur la fiabilité très limitée des méthodes indirectes et sur l'intérêt de la mesure directe.

On a vu que Philipponnat mesurait la pression de gonflement P_g d'un échantillon de sol à l'état naturel, dans un état de succion élevé, à l'aide d'un oedomètre (1) (fig. 1-IV-4). Il déterminait ainsi la loi entre l'amplitude de gonflement ($\delta H/H$) et la pression normale appliquée σ au sol (fig. 1-IV-1).

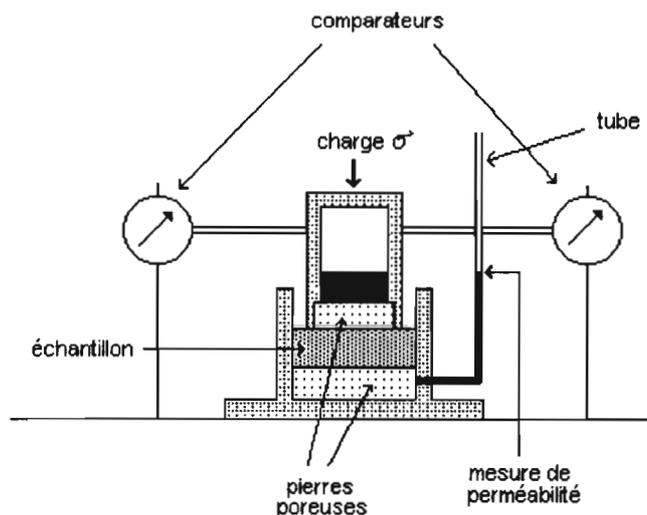


Fig. 1-IV-4 : Oedomètre, selon Cambefort (1971).

Pour une charge donnée, les comparateurs permettent de suivre l'évolution des tassements de l'échantillon dont l'épaisseur est de quelques centimètres. Un tube latéral permet de faire des essais de perméabilité sous la charge appliquée. On cherche à calculer la charge qui empêche le gonflement de l'échantillon et ainsi avoir une estimation rapide des tassements :

Pression. de gonflement = Pression. de consolidation *in situ* du sol.

(1) : Un oedomètre est un appareil destiné à l'étude de la consolidation et à une estimation rapide des tassements (Antoine et Fabre, 1980). Dans cet appareil, on étudie les déformations d'une pastille de sol, frettée latéralement, sous une charge donnée comme par exemple celle qu'introduira une fondation posée sur une couche de sol (Cambefort, 1971).

- Essai de retrait :

Dans le même esprit, l'essai de retrait a pour objet de quantifier les variations dimensionnelles du sol entre l'état de teneur en eau naturelle initiale et un état de dessiccation donné.

L'essai proposé par Philipponnat (1990) consiste à mesurer la masse volumique d'un échantillon cylindrique de sol intact ou reconstitué, par immersion de celui-ci dans un bain de mercure et à différents intervalles de temps, jusqu'à son dessèchement total à l'air. A partir de cet essai on peut tracer, entre autres, deux courbes de retrait (*fig. 1-IV-5*). Les mesures de laboratoire ainsi que l'observation du comportement in-situ des sols permettent alors de décrire le comportement des sols durant leur retrait.

- Pour les sols argileux, l'auteur distingue deux phases :

- Première phase : W diminue de W_0 à W_{re} ; le sol reste quasi-saturé. La diminution est quasi-proportionnelle à la diminution de la teneur en eau.
- Deuxième phase : W diminue de W_{re} à 0 ; le sol se désature. La diminution du volume est inférieure au volume d'eau perdue, puisqu'une partie du volume interstitiel (volume des vides), à l'origine plein d'eau, est occupée par l'air.

- Pour des sols limoneux-argileux, l'auteur distingue également deux phases beaucoup moins distinctes.
- Pour des sols non argileux, il ne distingue aucun retrait significatif.

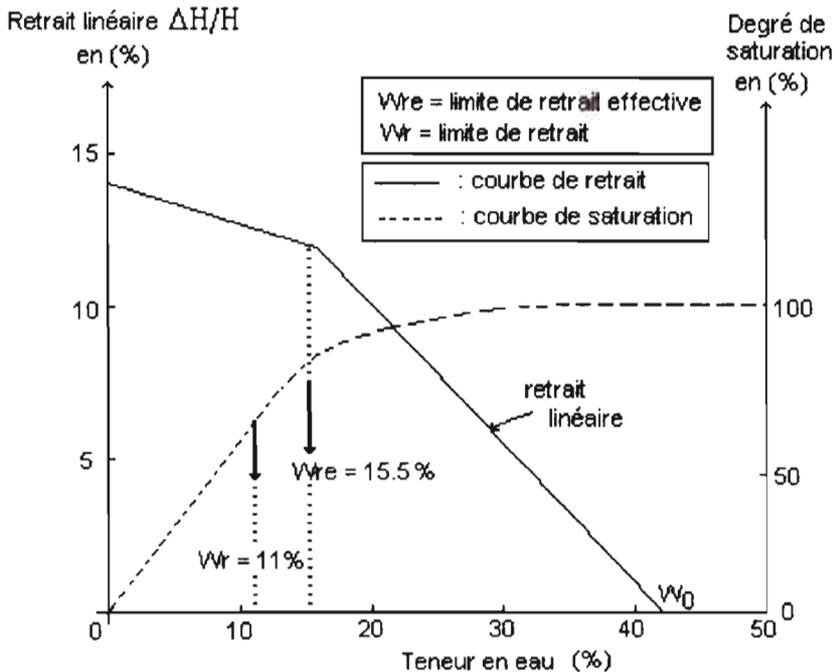


Fig. 1-IV-5 : Essai de retrait au mercure, selon Philipponnat (1990).

Les essais réalisés montrent que la courbe de retrait linéaire comporte deux branches quasi-rectilignes. La branche fortement inclinée de la courbe correspond au retrait du sol avant qu'une désaturation importante se produise, et la courbe peu inclinée au retrait résiduel du sol éloigné de la saturation. La pente de cette branche est appelée retrait linéaire :

C'est le paramètre le plus significatif permettant d'identifier les sols expansifs.

Une technique permettant de suivre l'évolution du retrait par mesure du volume d'air présent dans l'échantillon et du volume de solide sec en fonction de sa teneur en eau au cours du séchage est mise au point par Sibley et Williams (1989). Elle permet en effet de mesurer le volume d'air à l'intérieur et à l'extérieur des fissures, ainsi que le degré d'affaissement ou déviation de surface du sol.

Plusieurs approches ont été utilisées pour déterminer le volume du sol au cours de son retrait durant le séchage :

- Mesures directes des dimensions de l'échantillon : mesure de limite de retrait, retrait volumique, linéaire, mesure de perte de poids, etc...
- Mesure du déplacement de fluide par l'échantillon : méthode basée sur le théorème d'Archimède, technique au mercure, et méthode par mesure de déplacement du toluène (Sibley et Williams, 1989).

Cette dernière est plus précise et plus reproductible que les autres précitées ; elle nous décrit le mode directionnel du retrait par l'intermédiaire d'une courbe illustrant la relation du coefficient d'isotropie en fonction de la teneur en eau w (%) = V_w/V_s , (voir *figure 1-IV-6*) :

➤ Anisotrope jusqu'à w_1 ,

➤ isotrope de w_1 à w_c .

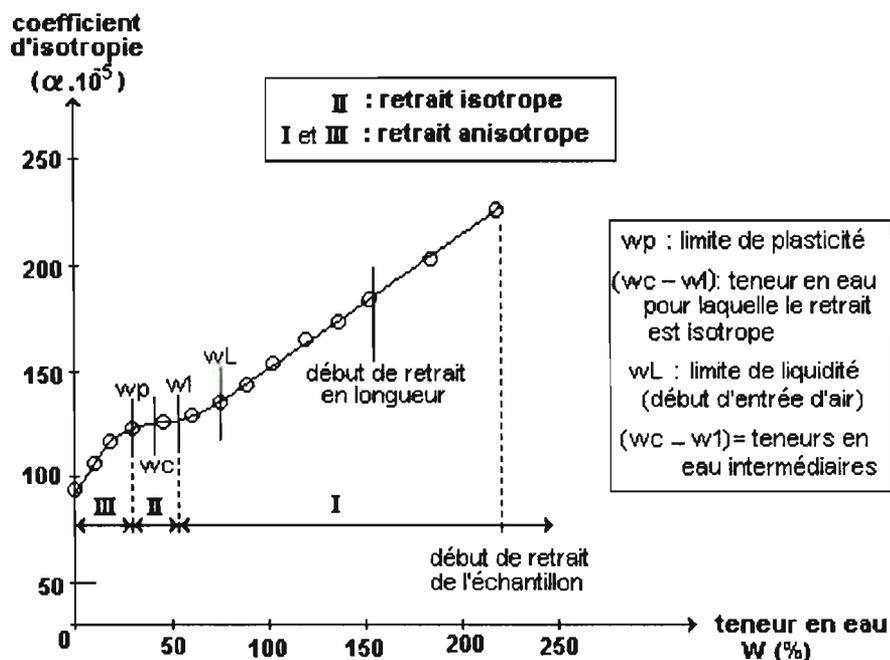


Fig. 1-IV-6 : Relation entre le coefficient d'isotropie (α) et la teneur en eau (w) durant le séchage d'un échantillon argileux, selon Sibley et Williams (1989).

Calcul du coefficient d'isotropie α :

$$\boxed{V_T = \alpha \cdot L_T^3} \quad \text{pour un retrait isotrope } (\alpha \text{ constant}).$$

$$\alpha = \frac{(V_A + V_S + V_W)}{L_T^3} = \frac{V_T}{L_T^3} \quad \text{avec} \quad V_S = \frac{MS_{105}}{\rho_{\text{Sol}} \cdot \rho_{\text{Eau}}}$$

- V_T = volume total du sol (cm^3) → *mesuré par la méthode du déplacement de toluène,*
 V_A = volume d'air du sol (cm^3) → *mesuré par la méthode du déplacement de toluène,*
 V_S = volume de solide du sol (cm^3) → *calculé,*
 MS = masse du sol séché à 105°C ,
 V_W = volume d'eau du sol (cm^3) → *mesuré expérimentalement,*
 L_T = longueur de l'échantillon (cm) → *mesurée expérimentalement,*
 ρ_{Sol} = masse volumique du sol (g/cm^3),
 $\rho_{\text{eau}} = 1$.

L'application de cette technique permet donc de déterminer la relation entre le niveau de saturation du sol et sa teneur en eau ; celle-ci peut aussi être calculée en début de saturation quand elle se trouve exactement à la limite de retrait.

Afin d'étudier le comportement des matériaux soumis à la fois à un état de contrainte externe (contraintes verticale et horizontale) et interne (contrainte de tension due à la dessiccation) un appareillage de laboratoire composé d'une cellule triaxiale modifiée (voir *fig.1-IV-7*) a été mise au point (Baumgartl et al., 1995).

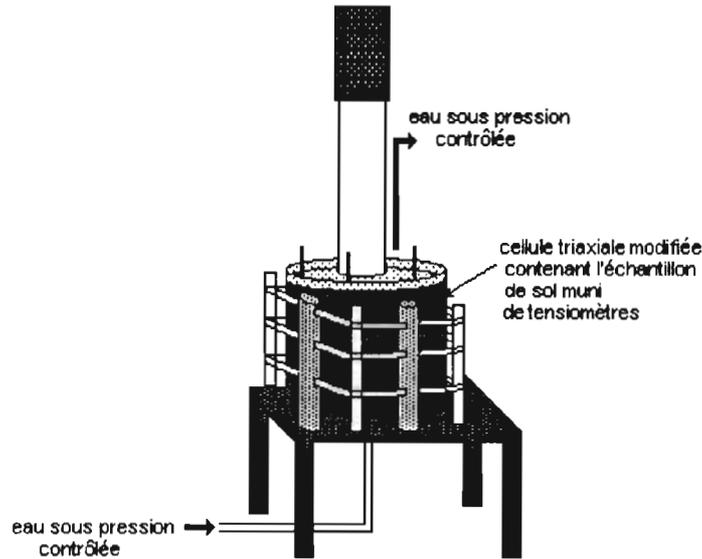


Fig.1-IV-7 : Cellule triaxiale modifiée (hauteur 70cm), d'après Baumgartl et al., 1995.

L'appareil permet de mesurer les déformations verticale et horizontale à l'aide de capteurs électroniques installés dans la cellule autour de l'échantillon durant son gonflement lors de l'humectation contrôlée ou de son retrait lors de sa dessiccation (*fig.1-IV-8*). Il permet également le calcul des propriétés hydrauliques du matériau par une méthode inverse, contribuant à modéliser le comportement hydraulique et mécanique du sol sous contrainte.

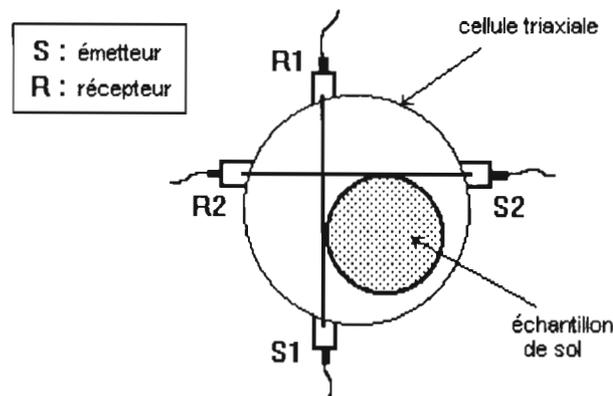


Fig.1-IV-8 : Principe de la mesure des déformations horizontale et verticale d'un échantillon de sol sous contrainte dans une cellule triaxiale, d'après Baumgartl et al., 1995.

IV.3.2/ Les essais in-situ

L'utilisation de plus en plus fréquente des essais pressiométriques pour le calcul des fondations a conduit à étudier une adaptation du pressiomètre à des mesures de sols gonflants et rétractables pour pouvoir disposer d'un essai in-situ permettant la mesure des caractéristiques pressiométriques dans des conditions en place ainsi que le potentiel de gonflement des sols. Ainsi, des dispositifs de mesure in-situ ont été utilisés par Mariotti (1988) et Ofer (1981) qui mesuraient la contrainte horizontale d'une tranche de sol humidifié en utilisant un *pressiomètre autoforeur*.

Flavigny (1991) met au point un dispositif pressiométrique pour opérer à des faibles profondeurs (quelques mètres) : le *pressiomètre double* (« Expansol »), plus simple mais donnant des résultats sensiblement identiques à ceux du pressiomètre « Ménard »; il permet la mise en évidence du phénomène de gonflement des sols argileux lorsqu'ils sont soumis à un apport d'eau, aussi bien en gonflement libre qu'en pression de gonflement.

D'autres essais plus anciens de mesure in-situ de la déformation du sol sont à retenir (Cassan, 1978) :

- Le Tassomètre pneumatique ou hydraulique T.P.A. des Ponts et Chaussées, qui mesure le tassement à l'intérieur d'un forage.
- Le tassomètre pneumatique « Soil Instrument Limited » qui mesure la pression de tassement.
- Les clinomètres mesurent la déformée d'un tube souple introduit dans un forage de petit diamètre.
- Le diamètreur mesure la variation du diamètre d'un forage en fonction de la profondeur avec des sondes de diagraphes électriques ou nucléaires.

V./ CONCLUSION

Au début du siècle (Watts,1908), on s'intéressait au retrait du sol et l'associait au comportement particulière et hydrique de sa structure.

Tempany (1917) représentait graphiquement le processus du retrait linéaire de sol de textures différentes en fonction de sa perte en eau, et décrivait d'après l'allure des courbes ainsi tracées, le déroulement de ses différentes étapes.

La mesure de la courbe de retrait d'un sol est en effet un bon moyen de suivre l'évolution dynamique de sa structure tout au long du retrait. En comparaison à la mesure volumique directe moins précise qui limite le calcul de la courbe de retrait et ainsi son exploitation analytique, la mesure indirecte par capteur de déplacement en une seule expérimentation et sur le même échantillon est mieux adaptée et plus efficace. En effet, cette technique permet d'automatiser la manipulation et ainsi de mesurer en continu avec une grande précision le retrait linéaire d'un échantillon de sol prélevé en fonction de sa perte en eau. De plus, elle permet une interprétation plus rigoureuse du comportement structural. Cependant, malgré sa pertinence, cette technique demeure problématique sur de nombreux points :

- La mesure du volume dans une seule direction, en supposant l'isotropie de la déformation ; cette hypothèse n'est a priori pas évidente pour tous types de sols.
- Le modèle mathématique est basé sur une méthode d'ajustement qui n'est pas adaptée à tous les types de sol.
- La mesure est réalisée sur un seul échantillon, ce qui limite considérablement le champ analytique et par là même, la rigueur d'une interprétation.
- La méthode n'est pas validée sur des sols à textures et structures différentes.

La deuxième et troisième partie de ce mémoire tenteront d'éclaircir ces points importants en proposant d'expérimenter un nouvel appareil de mesure du retrait d'échantillons de sol :

Le rétractomètre laser.

DEUXIEME PARTIE

MATERIELS ET METHODES

LE RETRACTOMETRE LASER A PASSEUR D'ECHANTILLONS



Photo : J.M. Costantini

Rétractomètre laser à passeur d'échantillons pneumatique.



Photo : J.M. Costantini

Mesure de la variation bidimensionnelle du volume de huit échantillons de sol au cours de leur retrait.

I./ LE RETRACTOMETRE LASER

Introduction

Le principe de la mesure rétractométrique, décrite pour la première fois par Braudeau (1987), permet une mesure automatisée et continue du retrait linéaire volumique d'un échantillon de sol en fonction de sa teneur en eau.

Les premières mesures de retrait ont été réalisées à l'aide de capteurs de déplacement de type « palpeurs » en contact avec l'échantillon enrobé d'un film de colle néoprène (Braudeau 1987). Cette technique limitait les mesures à un plan vertical, dans une seule direction.

Bellier et Larvy Delarivière (1993) utilisaient des capteurs optiques sans contact pour tenter de mettre en évidence le phénomène d'anisotropie du retrait sur des échantillons de sol reconstitués. Ce procédé expérimental était limité à une seule manipulation par échantillon analysé. Sachant qu'une manipulation dure en moyenne 72 heures par échantillon, une analyse rétractométrique complète (au moins trois répétitions) devenait alors longue et fastidieuse. Par ce fait, il limitait considérablement les possibilités de traitement analytique (statistique etc...) des données expérimentales. De plus, le traitement des courbes de retrait par une méthode d'ajustement des points non adaptée à certains types de sols (exemple des sols limoneux et argileux, type vertisol) rendait alors l'analyse peu fiable et non reproductible pour ces exemples précis.

Un nouvel appareil permet de mesurer en continu et automatiquement le retrait de huit échantillons en une seule manipulation : le rétractomètre laser.

I.1/ Présentation

L'appareil de mesure est un rétractomètre à lasers composé de trois unités comme le montre la *figure 2-1-1* :

- (I) Unité mécanique/pneumatique : **le passeur d'échantillons pneumatique.**
- (II) Unité mesure : **capteurs lasers type "spot" et "barrières" ; balance électronique.**
- (III) Unité d'acquisition des données par micro-informatique : **cartes de saisie.**

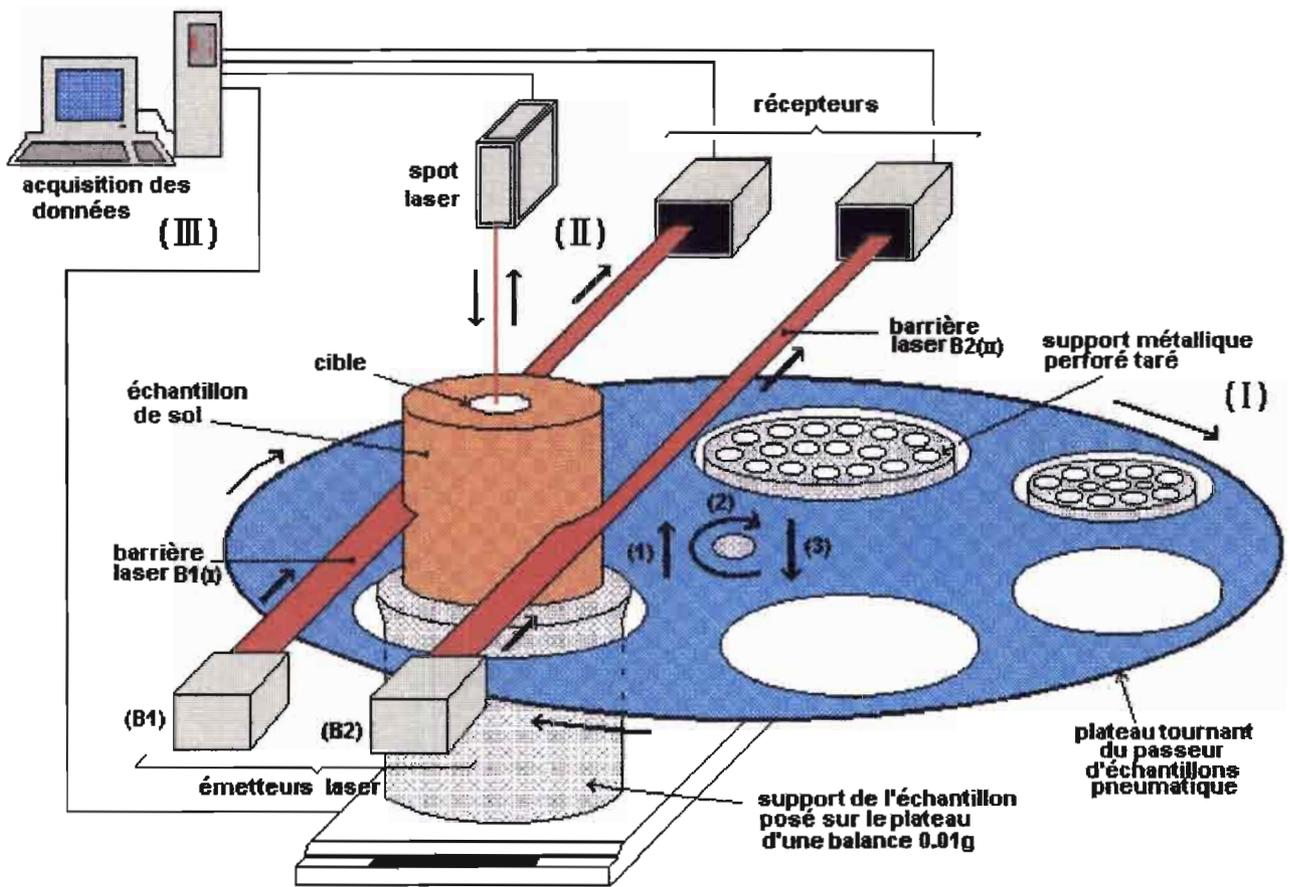


Fig. 2-I-1 : Principe de fonctionnement du rétractomètre laser.

- (1) : Montée du plateau porte-échantillons.
- (2) : Rotation d'un huitième de tour.
- (3) : Descente du plateau et pose de l'échantillon sur la balance.

I.1.1/ Unité mécanique/pneumatique : *passeur d'échantillons pneumatique*

Elle est composée d'un plateau métallique à huit postes de mesure. Chaque poste correspond à un emplacement prévu pour accueillir un support métallique perforé et taré, sur lequel est posé l'échantillon à analyser (fig. 2-I-2).

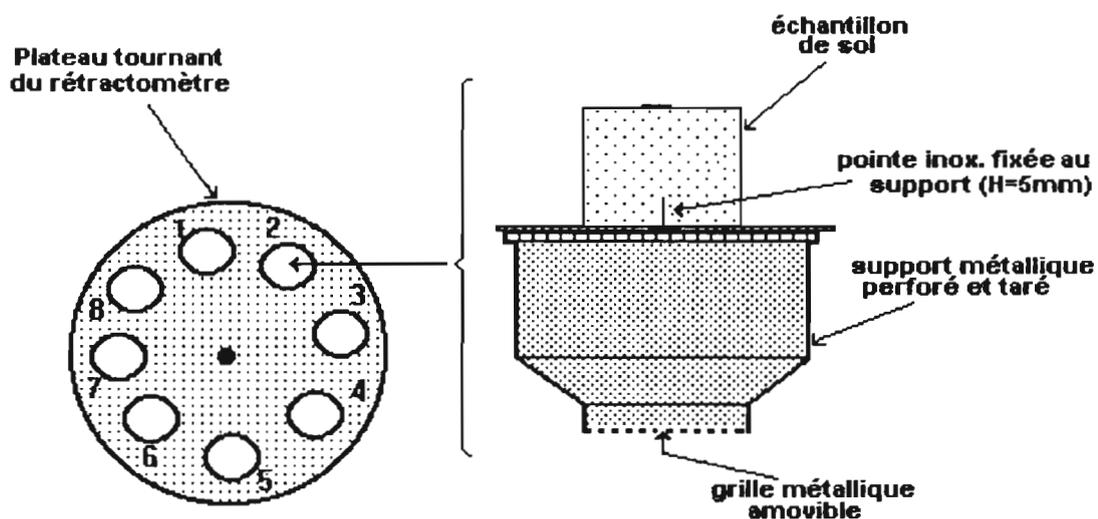


Fig. 2-I-2 : Support métallique emboîté dans les orifices du plateau tournant du rétractomètre (Feltens, 1995).

Le plateau est, dans un premier temps, animé d'un mouvement vertical de va-et-vient par un vérin pneumatique, suivi d'un mouvement de rotation assuré par un piston à tirage tangentiel (Feltens 1995). Ces deux mouvements commandés par un système pneumatique automatisé, dont le principe est présenté à la *figure 2-I-3*, assurent la dépose, la reprise de l'échantillon, et la mise en place de l'échantillon suivant sur le poste de mesure (voir grafcet *fig.2-I-4*).

Le choix d'un entrainement pneumatique a été délibérément choisi pour la robustesse de son mécanisme. Une autre option (électrique par exemple) pourrait être envisagé dans la mesure où malgré ses qualités, le système pneumatique ne permet pas le contrôle de la vitesse de rotation du plateau.

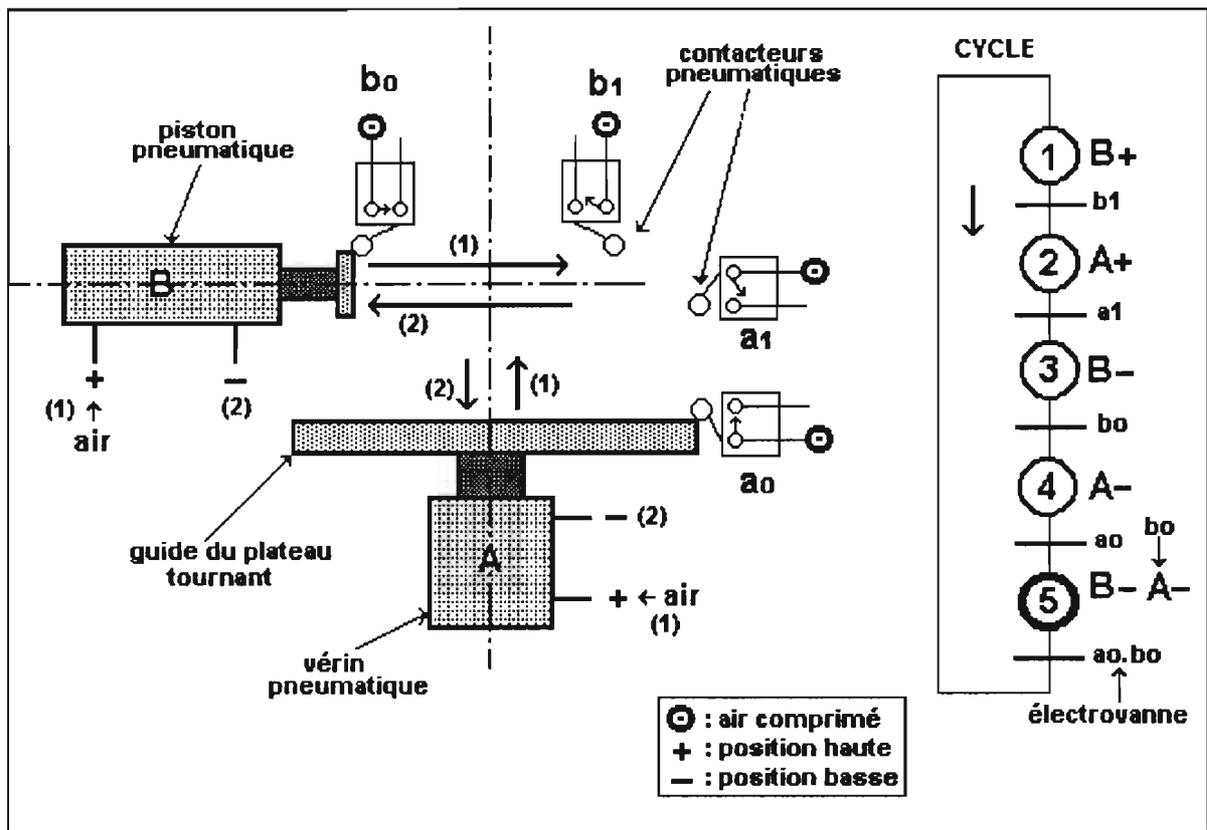


Fig. 2-I-3 : Cycle pneumatique du passeur d'échantillons.

Les deux mouvements de ce cycle sont commandés automatiquement à partir d'une centrale de relais pneumatique (l'air comprimé est fournie en continu par un compresseur huit bars). Ils démarrent à partir de l'ouverture d'une électrovanne qui permet l'envoi d'air comprimé dans le circuit. Elle est commandée par un programme informatique qui va également assurer la lecture des signaux des mesures (lasers + balance) pour chaque échantillon analysé.

GRAFCET du rétractomètre :

Le GRAFCET est un diagramme fonctionnel dont le but est de décrire graphiquement les différents comportements d'un automatisme séquentiel.

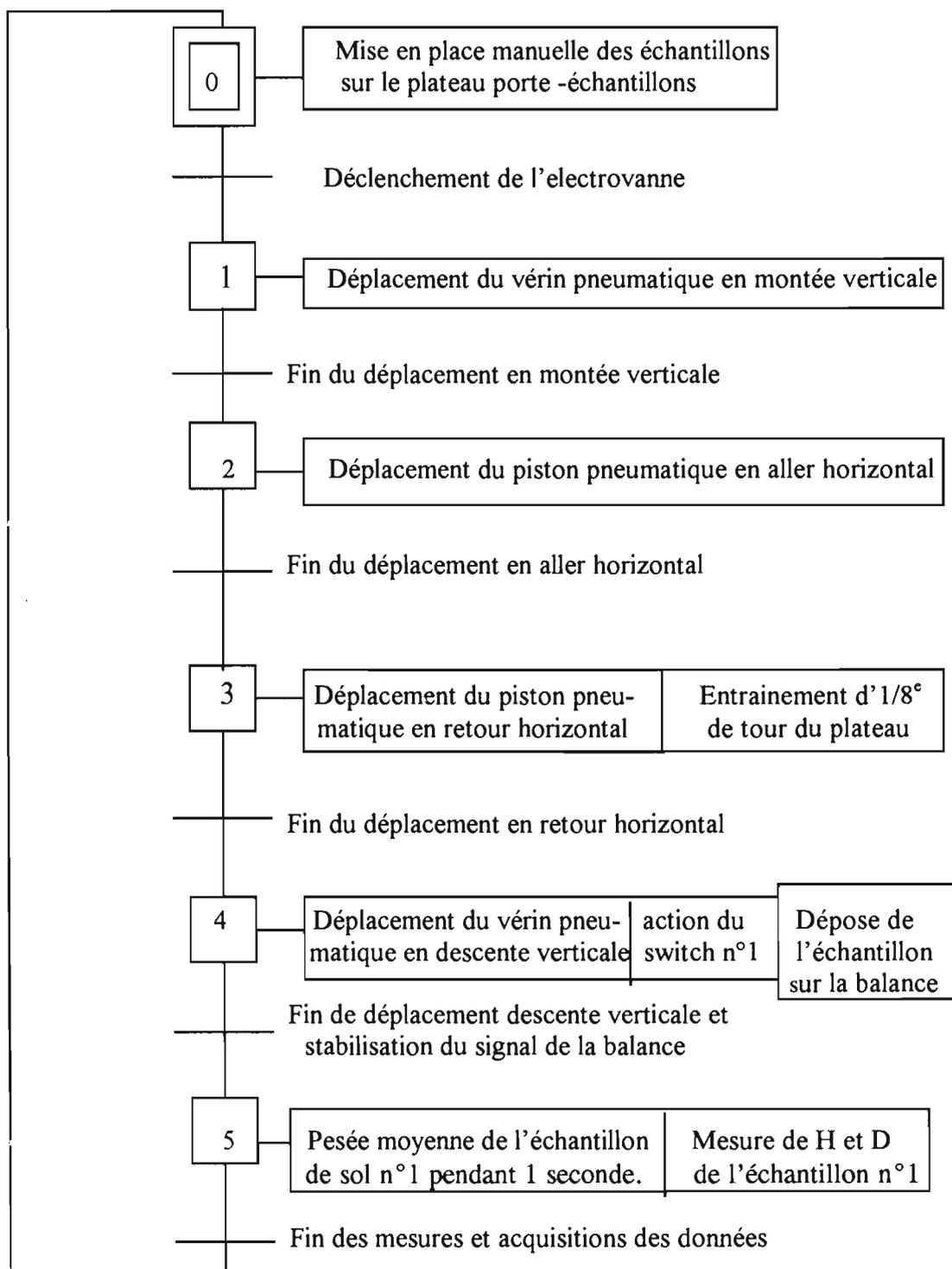


Fig. 2-I-4 : Grafcet du fonctionnement automatique du rétractomètre.

Principe de fonctionnement :

Les capteurs mesurent en continu la diminution du « diamètre » (1) de l'échantillon de sol entre les deux faisceaux laser tout au long de son retrait (fig.2-I-5).

Le faisceau émis par la diode laser du transmetteur est transformé en un faisceau parallèle grâce à une unité de lentilles projetantes. Le faisceau laser est ainsi dirigé à travers la rainure du récepteur et intercepté par l'élément réceptionnant la lumière (élément photosensible) comme le montre la figure.2-I-6. Comme l'objet mesuré intercepte partiellement le faisceau laser, le changement de taille de l'ombre est traduit par un changement de la quantité de lumière reçue (voltage). La tension résultante est utilisée comme sortie de comparateur en tension de sortie analogique.

$$\text{Diamètre (D)} = B'1 + B'2 + L \quad (\text{en volt})$$

Un étalonnage, en utilisant des piges de diamètres connus, permettra de convertir le diamètre D (volt) en diamètre D (millimètre) :

$$D \text{ (mm)} = a_D (B'1 + B'2) + b_D + L \quad \begin{matrix} a_D \text{ en mm/V} \\ b_D \text{ en mm} \end{matrix}$$

$$\Rightarrow D \text{ (mm)} = (a1.B'1 + b1) + (a2.B'2 + b2) + L$$

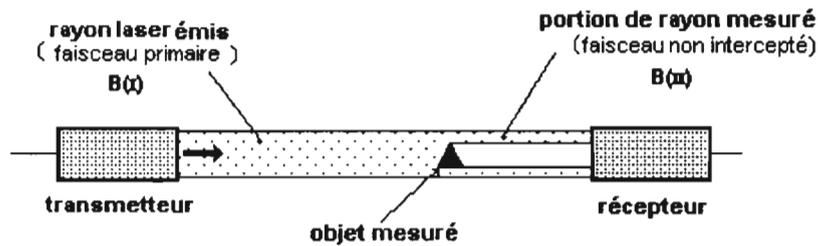


Fig. 2-I-6 : Capteur type " barrière LX2 ".

(1) : Par définition, le diamètre est la droite qui, passant par le centre d'un cercle joint deux points de celui-ci. Mesurer le diamètre d'un échantillon cylindrique sous-entend que celui-ci aie le même diamètre en tout point de sa hauteur, ce qui n'est pas le cas d'un cylindre de sol. C'est la raison pour laquelle nous utiliserons le terme de « diamètre » entre guillemets lorsque l'on précisera la dimension horizontale mesurée de l'échantillon de sol.

I.1.2.2/ Le capteur laser sans contact type " spot LB70 " :

Ce capteur de déplacement mesure la variation de hauteur de l'échantillon de sol tout au long de son retrait (fig.2-I-7).

D'une manière générale, il calcule la distance qui sépare un objet à mesurer d'un récepteur (détecteur photodiode). Dans notre cas, la cible sera une pastille de PVC de 20mm de diamètre posée à plat sur l'échantillon.

Le principe de fonctionnement de ce capteur repose sur la méthode de triangulation optique (fig.2-I-8) qui offre l'avantage d'être facile à mettre en oeuvre lorsqu'il s'agit de déterminer (sans contact) des déplacements, des épaisseurs, et des éloignements.

Remarque : Pour éviter d'éventuelles interférences des barrières laser sur le spot (ou inversement) à cause des radiations diffuses réfléchies qui entraîneraient la perturbation des signaux, ce dernier est maintenu protégé dans un capuchon métallique faisant l'effet d'une chambre noire isolant ainsi la source du spot laser

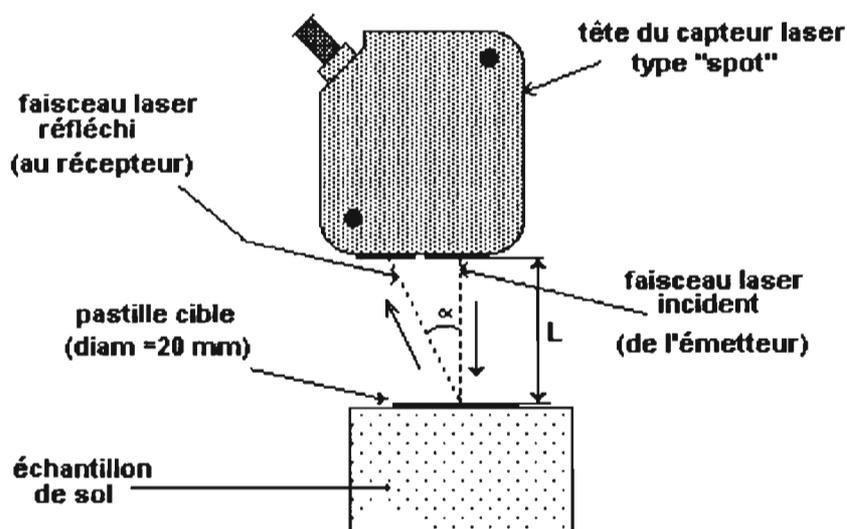


Fig. 2-I-7 : Principe de fonctionnement de la mesure de la hauteur par capteur de déplacement laser type " spot laser ".

Principe de fonctionnement de la méthode de triangulation :

Dans le montage suivant (fig. 2-I-8), le faisceau lumineux d'une diode laser est pointé sur l'objet dont on veut mesurer le déplacement. Il est focalisé par une première lentille L1, touche la cible, puis est réfléchi suivant une réflexion diffuse. Il est focalisé à nouveau par une deuxième lentille L2 avant de se projeter sur un capteur linéaire composé de photodiodes de position (récepteur). Le système optique forme alors dans son plan focal un spot dont la position de l'impact sur le récepteur dépend de la distance à laquelle il se trouve de l'objet. En effet, le détecteur photoélectrique repère la position de cette image par rapport à l'axe optique (d), et les informations I1 et I2 sont traitées par micro-processeur qui donne des indications sur la position de la cible, permettant le calcul de la distance (D) suivant sa formule donnée ci-après. Cette information peut être une sortie tension analogique ou une sortie numérique.

Si B est la longueur de la base, θ_f l'angle que fait le faisceau laser par rapport à la base, f la distance focale de l'objectif L2 et d la distance de l'image à l'axe optique, la distance cherchée D est donnée par la relation :

$$D = \frac{B \cdot \operatorname{tg} \theta_f}{(1 - d / f \cdot \operatorname{tg} \theta_f)}$$

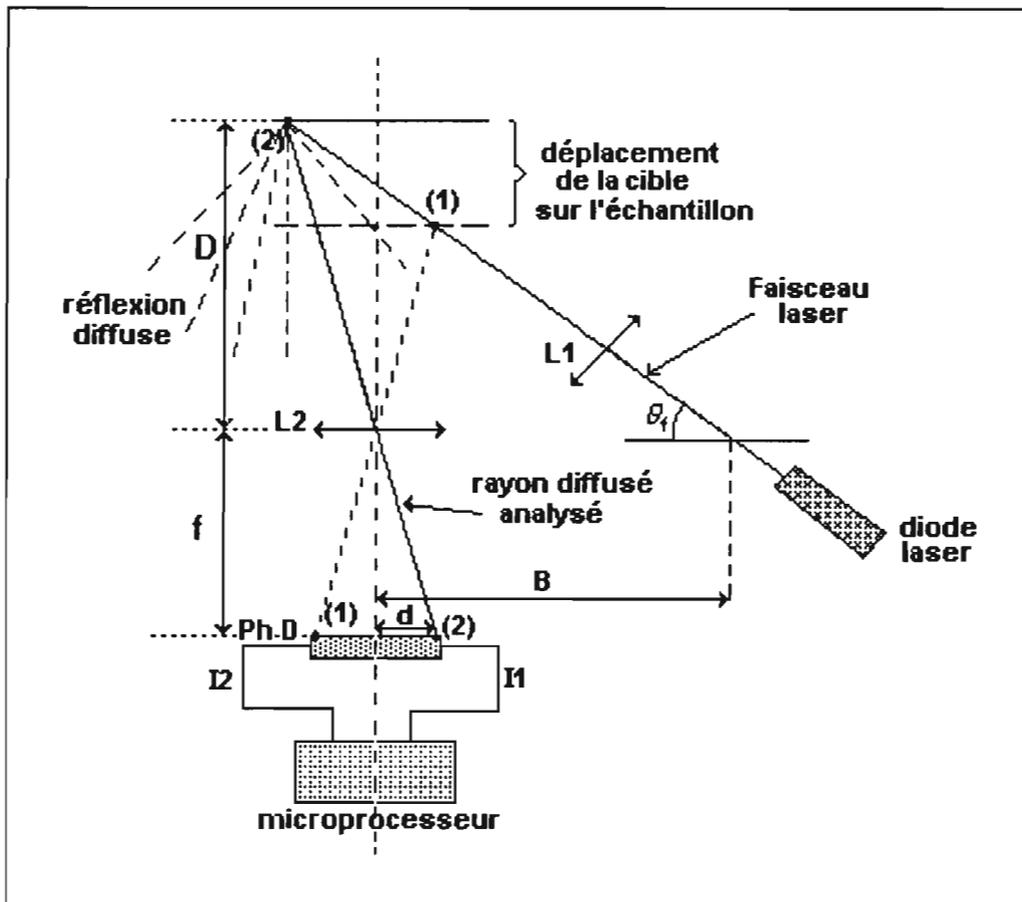


Figure 2-I-8 : Principe de la triangulation pour un dispositif de mesure de distance par capteurs optiques de position.

L'avantage de ce système est que l'exploitation de son principe permet d'automatiser la mesure et ainsi déterminer rapidement, à distance, des profils tridimensionnels.

Son inconvénient est que le point mesuré n'est généralement pas sur l'axe optique, et que sa position n'est repérable que par l'impact laser.

La technique de mesure du "spot laser" est donc différente de celle des "barrières laser". L'avantage de ce capteur est sa technicité : l'émetteur et le récepteur se trouvent tous deux dans la tête du capteur.

Avant toute mesure, il faut régler la position initiale du spot par rapport à la cible en sorte qu'elle soit au centre du champ de détection ; c'est à dire à zéro volt.

$$\boxed{\text{Hauteur (H)} = L} \quad (\text{en volt})$$

La calibration se fait avec des piges de hauteurs connues pour convertir la hauteur H(V) en H(mm) :

$$H = a_H \cdot L + b_H \quad \begin{array}{l} a_H \text{ en mm/V} \\ b_H \text{ en mm} \end{array}$$

I.1.2.3/ La balance de précision (0.01g) :

Le troisième élément constitutif de l'unité de mesure du rétractomètre à laser est une balance électronique (0.01g) qui mesure la masse de l'échantillon au cours de son retrait. Dès que la masse mesurée est stable, les capteurs lasers mesurent automatiquement le retrait en diamètre et en hauteur pendant une seconde (Fig. 2-I-9).

Remarque : Le mouvement du plateau de la balance sous l'effet des variations de poids de l'échantillon au cours de son dessèchement est compensé de telle sorte qu'il reste immobile par rapport aux faisceaux laser durant toute la manipulation (voir chapitre I.1.2.2/).

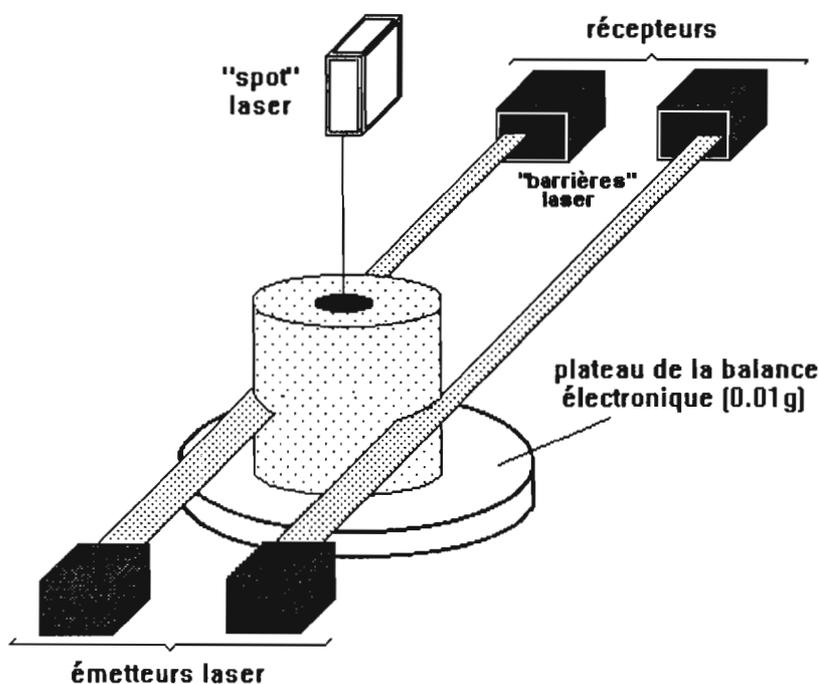


fig. 2-I-9 : Schéma de principe des mesures instantanées de variation de la masse, diamètre, et hauteur d'un échantillon de sol.

I.1.3/ Unité d'acquisition des données

L'acquisition des données se fait à l'aide d'un micro-ordinateur, en passant par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition du type "PCL 812 PG" (advantech). Elle assure les conversions des signaux "analogique / numérique" et "numérique / analogique". Le programme de commande de l'acquisition est réalisé en langage C++ ; son schéma simplifié est le suivant :

- Appeler CN1 : lecture des signaux laser.
- Appeler CN3 : action de l'électrovanne ⇒ rotation du plateau ⇒ action d'un switch (correspondant à un poste de mesure).
- Appeler CN4 : lecture des signaux des switch (0 ou 5v).
- Appeler RS 232 : saisie du signal de la balance électronique.
- Appeler barrière 1, barrière 2, spot : mesures de distance et dimension.

On a vu dans le paragraphe I.1.1/ précédent que le cycle pneumatique ainsi que la lecture des signaux des mesures capteurs lasers et balance étaient également automatisés. Le schéma de principe en est le suivant (fig. 2-I-10) :

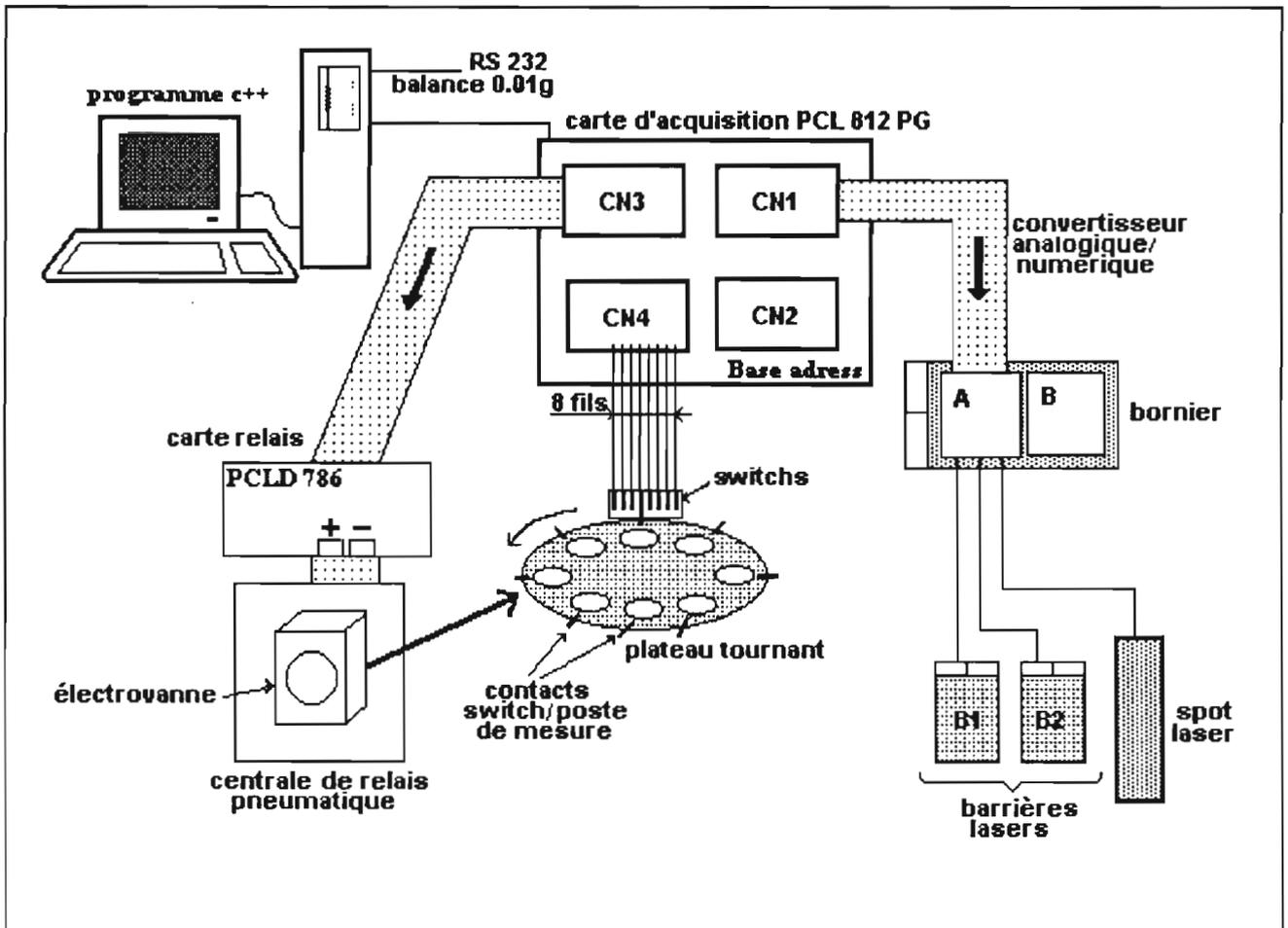


Fig. 2-I-10 : Schema de principe du circuit automatisé du rétractomètre laser.

SPECIFICATIONS DES ELEMENTS DE MESURE DU RETRACTOMETRE

	SPOT LASER (capteur de déplacement laser)	BARRIERES LASER (capteurs photoélectriques à barrage laser)	BALANCE
IDENTIFICATION			
Constructeur	Keyence Japon	Keyence Japon	Mettler
Modèle	LB-72W	LX2-12	Toledo PB 1502

CARACTERISTIQUES DU LASER ET BALANCE			
Source lumineuse	diode laser à S.C	diode laser à S.C (780nm)	-
Puissance de la source	3 mW	0.3 mW max.	-
Distance de travail	40 mm	300 mm max.	-
Champ de mesure	±10 mm	10 mm	-
Zone de détection	diamètre : 1 mm	(LxE) = 10x1 mm	-
Résolution	2 µm à 60 ms	10 µm	-
Précision	-	-	0.01 g
Portée	-	-	1510 g
Répétabilité	-	-	0.01 g
Linéarité	1% pleine échelle	1%	± 0.02 g
Dimensions ext.	-	-	190 x 290 x 62 mm
Poids net	270 à 200 g	150 à 200 g	2.5 kg

CARACTERISTIQUES DE L'AMPLIFICATEUR LASER			
Voltage	± 4 volts (0.4V/mm)	1 à 5 volts (0.4V/mm)	-
Impédance	100Ω	100Ω	-
Fréquence de réponse	700 Hz	1 kHz	-
Alimentation	12 à 24 V	12 à 24 V	-
Température de travail	0 à +50°C	0 à +50°C	-
Lumière de travail	4000 lux max.	10000 lux	-
Taux d'humidité	35 à 85%	35 à 85%	-

Tab.2-1-a : Caractéristiques techniques données par les constructeurs.

I.2/ Validation des mesures

Introduction

Une mesure de grandeur, résultat d'une opération instrumentale, ne peut jamais donner comme résultat la valeur exacte de cette grandeur, mais seulement une valeur mesurée qui s'en approche plus ou moins. C'est pourquoi nous allons, dans le cas du rétractomètre, analyser ses différentes caractéristiques concernant les mesures afin d'en évaluer les limitations techniques. Dans ce cas précis, la mesure du retrait consiste en une série de trois mesures simultanées en continu de hauteur, « diamètre » et poids d'un échantillon de sol durant son retrait.

Selon les principes de validation appliqués par l'Institut National de Métrologie, la mesure d'un rayonnement optique se caractérise principalement par :

- . la qualité du signal (bruit, linéarité, résolution),
- . sa fidélité (ou répétabilité),
- . sa précision,
- . son exactitude (ou justesse).

I.2.1/ Qualité des signaux des capteurs « laser »

I.2.1.1/ Le bruit :

Par définition, on appelle *bruit* une interférence du signal de sortie de tout élément d'un système de mesure ; soit dû à l'élément lui-même, supposé soustrait à toute influence extérieure, soit résultant exclusivement d'influence extérieure agissant sur l'élément (Paratte et Robert, 1986).

- Manipulation et conditions de mesure :

On fait une série de mesures de la hauteur et du diamètre d'une pige inerte, à raison d'une mesure toutes les deux minutes dans des conditions où le moins de facteurs extérieurs ou intérieurs possibles agissant sur l'appareil ne pourraient perturber la valeur de la grandeur mesurée.

- La température ambiante est contrôlée et constante.
- La mesure se fait dans une enceinte fermée, à l'abri de lumières parasites durant toute l'analyse.
- L'objet dont on mesure les diamètre et hauteur est un cylindre de PVC inerte et opaque de taille 42x42mm posé sur le plateau de la balance électronique.
- La pige étant fixe durant toute la série de mesure, on se préserve des erreurs dues aux vibrations de l'objet à cause des impulsions pneumatiques.

- La tête du capteur laser «spot» est protégée par une enveloppe inactinique pour éviter d'éventuelles interférences des «barrières» lasers sur le faisceau «spot» (phénomène parasites).

- Résultats :

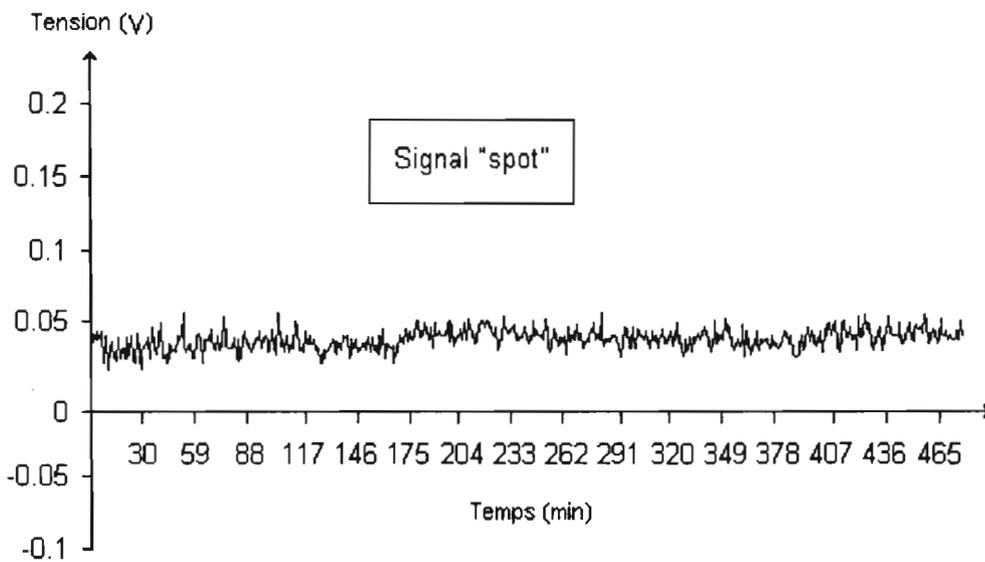
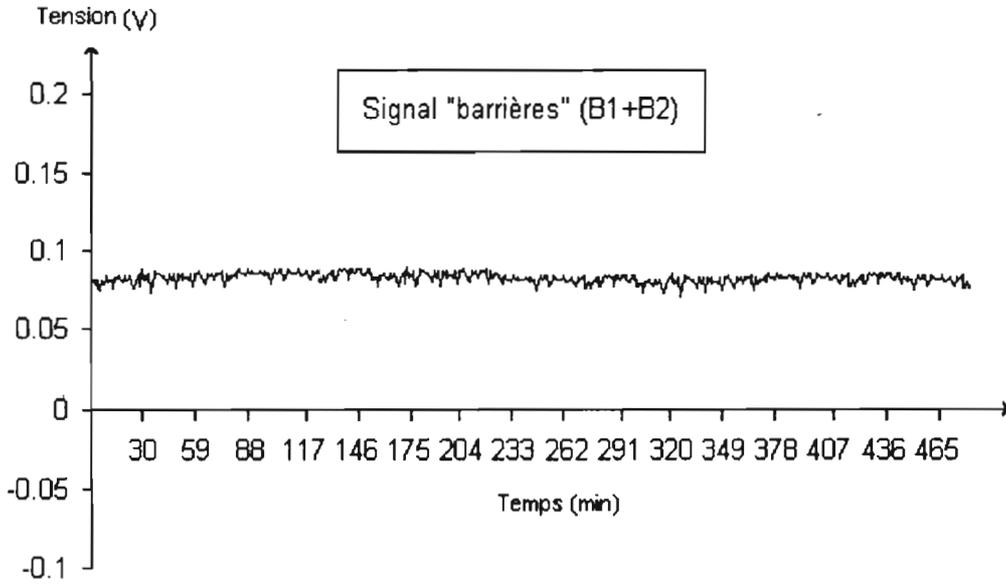


Figure 2-I-10 : Courbes illustrant le bruit du signal.

	masse de la pige (g)	signal spot (V)	signal barrières B ₁ +B ₂ (V)
maximum	69.05	0.056	0.099
minimum	69.02	0.023	0.072
écart-type	0.003	0.007	0.005
écart maxi.	0.030	0.033	0.027

Tableau 2-I-b : Statistiques données pour une série d'environ 900 mesures faites en continu sur 48 heures.

D'après les courbes présentée en *fig.2-I-10* et le *tableau 2-I-b*, on peut constater que le bruit est légèrement plus fort pour le spot laser. Ceci est probablement dû au fait qu'il est très sensible aux perturbations physiques du milieu (beaucoup plus que les barrières (*tab.2-I-a*)), et aux éventuelles micro-vibrations de la « pastille-cible » posée sur l'échantillon lors de la rotation du plateau.

1.2.1.2/ La linéarité :

La *linéarité* décrit le degré de concordance entre le diagramme d'étalonnage statique et une droite choisie comme référence. Ce peut être par exemple la droite des moindres carrés calculée sur les points d'étalonnage, ou la droite joignant les points extrêmes de l'étendue de mesure. Dans notre cas, on utilisera un gabarit et on tiendra compte de l'allure du diagramme d'étalonnage.

- Barrières B₁+B₂ :

On analysera l'allure du signal de chacune des deux barrières en procédant à un étalonnage de celles-ci. Pour cela, on place un gabarit entre les deux faisceaux laser et on mesure point par point les tensions de sortie (en volt) des faisceaux interceptés B₁(II) et B₂(II) au fur et à mesure que l'on déplace à tour de rôle les faisceaux incidents B₁(I) et B₂(I) par rapport à l'objet inerte fixe de 1 à 5V. On trace ainsi la relation de la largeur de faisceau interrompu en fonction de la tension de sortie (*Figure 2-I-11*).

$$B1'(mm) = a1.B1'(V) + b1$$

$$B2'(mm) = a2.B2'(V) + b2 \Rightarrow D(mm) = a1.B'1(V) + a2.B'2(V) + b1 + b2 + L$$

Résultat d'après les courbes tracées et leurs équations :

Il faut tenir compte d'un facteur de correction **a1 = 2.480** pour la barrière B1 et **a2 = 2.460** pour la barrière B2 quand on voudra convertir les signaux électriques (volts) en distance(mm) ; ces valeurs correspondent aux pentes de chacune des courbes d'étalonnage (*fig.2-I-11*).

$a1 = 2.480 \text{ mm/V}$ pour la barrière B1 $a2 = 2.460 \text{ mm/V}$ pour la barrière B2
--

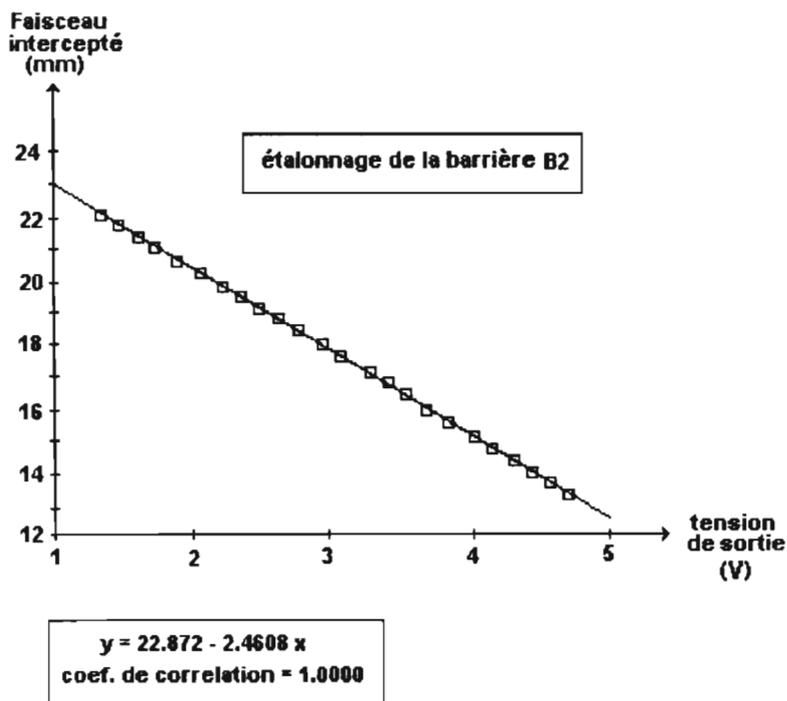
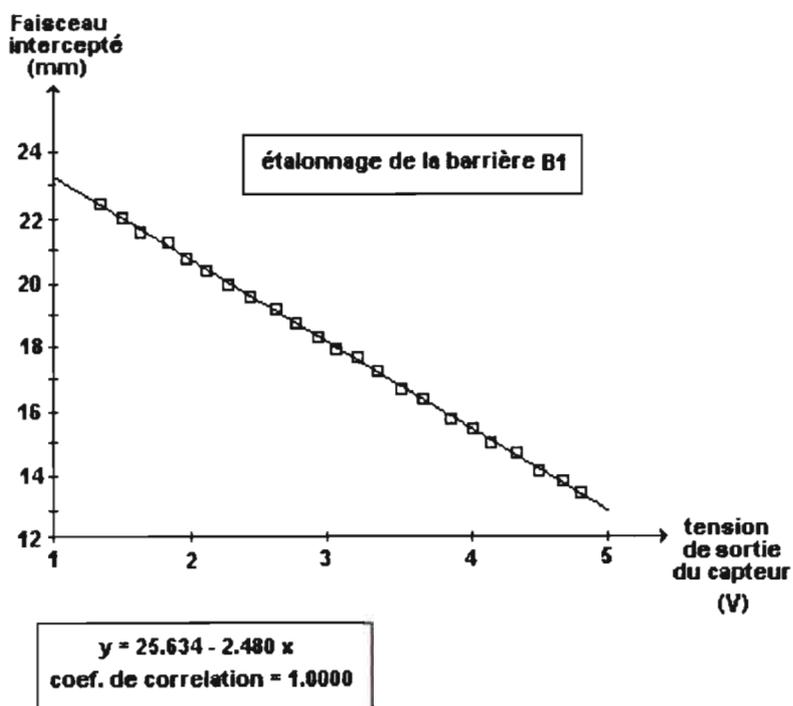


figure 2-I-11 : Relation entre la portion de faisceau des barrières laser interceptée par l'objet (mm) et la tension de sortie (V).

1.2.1.3/ La résolution :

Par définition, la résolution est la grandeur du pas de quantification dans la gamme. Elle correspond à la plus petite variation de la valeur de la grandeur que l'appareil peut détecter dans une gamme. Elle est donnée par le constructeur :

- 2 μ m pour le spot laser
- 2x10 μ m pour les deux barrières.

1.2.2/ Fidélité (ou répétabilité)

1.2.2.1/ Ecart-type de répétabilité :

Selon la norme NF X 06-044, c'est l'aptitude d'un instrument à donner, dans des conditions d'utilisation définies, des réponses très voisines lors de l'application répétée d'un même signal d'entrée. C'est en fait la marge de fluctuation de la grandeur de sortie lorsque la même valeur de la grandeur d'entrée est appliquée plusieurs fois successivement et dans le même sens. Elle peut être représentée par l'écart-type de répétabilité (σ_r) ou calculé sur une série d'environ 300 mêmes mesures sur le même objet à raison d'une mesure toute les deux minutes.

Les conditions d'utilisation définies sont habituellement les suivantes :

- . répétition sur une courte période de temps,
- . utilisation au même lieu dans des condition ambiantes constantes,
- . réduction au minimum des variations dues à l'observateur.

- Manipulation :

Pour analyser cette caractéristique, on se sert des mesures faites précédemment sur la pige de dimension : 42x42mm.

- Résultats (pige :42x42mm) :

	écart-type σ_r (V)	valeur moyenne (V)	valeur maxi (V)	valeur mini (V)	écart maxi (V)
B1+B2	0.005	0.085	0.099	0.072	0.027
SPOT	0.007	0.042	0.061	0.021	0.033

Tableau 2-I-c : Statistiques faites sur une série d'environ 300 mesures, en continu sur 10 heures (écart-type de répétabilité σ_r).

1.2.2.2/ La précision :

La précision d'un appareil dépend de sa fidélité et de sa **résolution**, mais il faut aussi faire intervenir la qualité de ses composants, la précision des références de tension et de temps, etc... Elle est généralement donnée en pourcentage de la lecture pour chaque gamme.

La résolution, c'est la valeur du pas de quantification dans la gamme. Elle correspond à la plus petite variation de la valeur de la grandeur que l'appareil peut détecter dans la gamme.

- D'après le constructeur :

	Spot laser (0.4 V/mm)	Barrières laser (B1+B2) (0.4 V/mm)
résolution (volt)	8.10^{-4}	8.10^{-3}
résolution (μm)	2	10

Tableau 2-I-d : Résolutions données par le constructeur.

- D'après l'expérience :

Expérimentalement, on peut avoir une idée comparative de l'écart moyen entre deux valeurs d'une série de mesures avec celle de la résolution donnée par le constructeur.

L'analyse expérimentale se fera cette fois-ci d'après les mesures de huit piges cylindriques- de tailles différentes (sauf pour les piges 3; 4 et 5) fixées sur le plateau tournant du rétractomètre.

La manipulation se déroule à raison d'une mesure toutes les six minutes pendant 48 heures. Les piges n°3; 4 et 5 sont choisies délibérément de même taille afin de pouvoir mieux analyser l'influence de leur taille (ou de l'échantillon) sur la précision de la mesure (voir fig.2-I-e).

Les conditions de mesure sont les mêmes que pour l'analyse précédente, on tiendra compte des éventuelles erreurs dues aux vibrations de l'objet à cause des impulsions pneumatiques quand le plateau est en mouvement.

Voici les valeurs des écarts maximums et moyens des valeurs d'une série données pour les mesures du diamètre et hauteur :

Pige n°	Taille (dxh) (mm)	$\Delta_{\max} H$ (V)	$\Delta_{\max} H$ (μm)	$\Delta_{\max} D$ (B1+B2) (V)	$\Delta_{\max} D$ (a1B1+a2B2) (μm)	écart moyen spot (μm)	écart moyen barrières (μm)
1	34x34	0.065	162.50	0.105	259.35	22.68	30.89
2	38x38	0.040	100	0.027	66.69	14.18	9.56
3	42x42	0.033	82.5	0.021	51.87	8.40	7.42
4	42x42	0.035	87.5	0.026	64.22	9.10	6.47
5	42x42	0.029	72.5	0.027	64.46	9.17	6.71
6	46x46	0.032	80	0.023	56.81	10.84	9.12
7	50x50	0.032	80	0.078	192.66	10.22	18.34
8	54x54	0.087	217.5	0.413	1020.11	23.43	198.86

Tableau 2-I-e : Valeurs des écarts maximums et moyens des valeurs d'une série de mesures.

Quelques caractéristiques d'une mesure des barrières laser :

- . largeur du faisceau : 10mm
- . gamme : 1V à 5V \Rightarrow 4V pour 10mm

exemple de la pige n°3 : $\Delta(B1+B2) = 0.021V$

La différence entre a1 et a2 est très petite devant $\Delta(B1+B2)$, on peut donc négliger cette différence et prendre la moyenne $(a1+a2)/2$ comme coefficient de $(B1+B2)$.

$$\Rightarrow (a1B1 + a2B2) \Leftrightarrow 0.021 * ((2.480+2.460)/2) \times 1000$$

$$= \underline{51.87\mu\text{m.}} \text{ après correction.}$$

• Résultats :

Le réglage initial des capteurs lasers s'est fait sur la pige n°3 ; c'est pourquoi l'on obtient pour ce cas le meilleur écart maximal. Plus on s'éloigne de la grandeur sur laquelle les capteurs sont réglés, plus l'écart maximal est grand : cela implique qu'il faudra si possible, pour chaque série d'analyse, travailler avec huit échantillons de même taille.

On peut également comparer la résolution des éléments de mesure donnée par le constructeur (en μm) à la moyenne des écarts entre deux points de mesure successifs calculée expérimentalement :

$$\sum_{i=1,n} (x_{i+1} + x_i)$$

D'après les données expérimentales moyennes des piges n°3;4;5 (voir annexe 1), les calculs donnent un écart moyen de :

8.89 μm pour le « spot » laser
6.87 μm pour les « barrières »

Le constructeur donne une résolution de:

2 μm pour le « spot » laser
10 μm pour les « barrières »

Ces différences pour le spot peuvent venir des erreurs possibles dues aux conditions expérimentales, malgré les précautions prises pour les éviter :

- problèmes de température et d'humidité
- vibrations de l'objet au moment du repositionnement
- présence de champs magnétiques ou électriques parasites
- défaut d'isolement des capteurs pouvant entraîner des interférences de l'un sur l'autre.
- phénomène d'hystérésis

Les valeurs expérimentales que nous obtenons sont très honorables sachant que celles données par le constructeur sont considérées comme idéales dans des conditions optimales.

Intervalle de confiance : (Exemple pour la pige n°3)

$$\bar{x} - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} * U\left(\frac{1+p}{2}\right) < m < \bar{x} + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} * U\left(\frac{1+p}{2}\right)$$

La distribution des résultats suivant une loi de type Normale, à la probabilité $P = 0.95$ et en fonction des données statistiques (voir annexe 1), nous pouvons donner le résultat des mesures de hauteur et diamètre de la pige n°3 suivants :

Barrières : $m \pm 1.10^{-3} \text{ mm}$
Spot : $m \pm 2.10^{-3} \text{ mm}$

I.2.3/ L'exactitude

C'est l'écart de l'accord entre le résultat d'un mesurage et la valeur (conventionnellement) vraie de la grandeur mesurée.

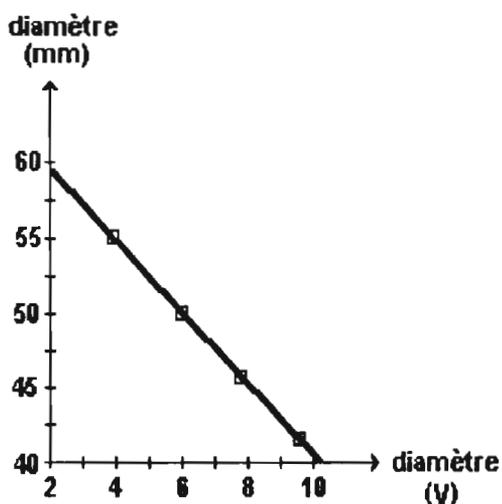
- Manipulation :

On fait une série de mesures en hauteur et en diamètre sur une pige cylindrique opaque de PVC dont on connaît parfaitement les dimensions (pige n°3).: **diamètre = 50mm et hauteur = 50mm**. On compare ensuite les dimensions calculées à partir des signaux lasers convertis en distances mesurées, d'après un étalonnage en cinq points, avec celles connues de l'étalon (*fig. 2-1-f*). La différence entre la valeur estimée par la droite d'étalonnage et la valeur mesurée de la pige n°3 marque l'exactitude de la mesure sur cette pige. Les courbes d'étalonnage sont réalisées d'après les mesures suivantes :

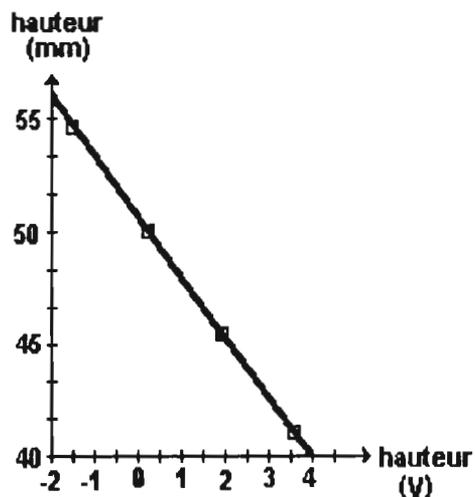
n°pige	dimension de la pige (mm)		signaux laser (V)	
	hauteur	diamètre	B1a1+B2a2	spot
1	42	42	9.282	3.240
2	46	46	7.689	1.810
3	50	50	5.981	0.296
4	54	54	4.289	-1.223

Tableau 2-1-f : Données permettant de tracer les droites d'étalonnage en cinq points.

Remarque : Chaque valeur de mesure du tableau ci-dessus correspond à la moyenne d'une série de 15 mesures, à raison d'une mesure toute les deux minutes.



équation de la droite : $y = -2.413x + 64.441$
 coef. de corrélation = 1.000



équation de la droite : $y = -2.688x + 50.786$
 coef. de corrélation = 1.000

Figure 2-I-12 : Droites d'étalonnage pour les mesures des diamètres et hauteurs d'une pige cylindrique de dimension : 50x50mm.

- Calcul d'après les courbes (fig.2-I-14):

$$5.981 (-2.413) + 64.441 = 50.009 \text{ mm} \Rightarrow \text{erreur de } 9\mu\text{m}$$

$$0.296 (-2.688) + 50.786 = 49.990 \text{ mm} \Rightarrow \text{erreur de } 10\mu\text{m}$$

L'exactitude est donc de :

$$(50.009/50 - 1) 100 = 0.018 \% \text{ pour les barrières}$$

$$(49.990/50 - 1) 100 = 0.020 \% \text{ pour le spot.}$$

Remarque : Il faudra tenir compte de la précision de l'appareillage utilisé lors de la fabrication des piges qui est de 0.01%.

I.2.4/ Qualité du signal de la balance

I.2.4.1/ Précision:

Le constructeur garantit une précision de 0.01g.

I.2.4.2/ Influence du mouvement du plateau de la balance :

Un certain mouvement du plateau de la balance se produit en fonction du poids de l'échantillon. En effet, lorsque la charge de la balance est moindre, le plateau « remonte ».

La *figure 2-I-13* montre la relation qui existe entre le poids mesuré et le déplacement du plateau.

La relation semble linéaire pour cette gamme de poids et montre une pente d'environ $-1.1 \cdot 10^{-4}$ mm/g (Grünberger, 1990).

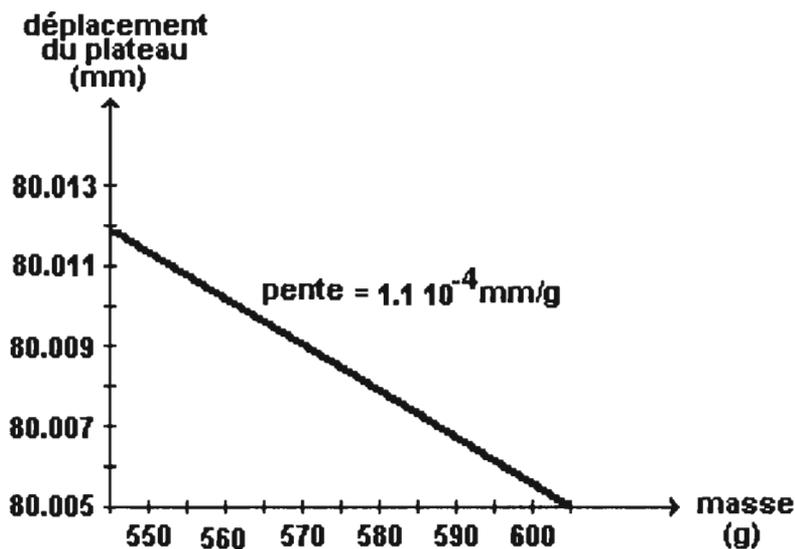


Figure 2-I-13 : Relation entre la charge appliquée et le déplacement du plateau de la balance (moyenne mobile sur 30 points)

- Résultat : Le déplacement du plateau est de $2\mu\text{m}$ pour une perte de 20g,

soit : 0.1 $\mu\text{m/g}$ d'eau évaporée

I.2.5/ Conclusion

Nous avons, dans ce chapitre, tout d'abord comparé expérimentalement certaines caractéristiques de mesurage de chacun des éléments de mesure du rétractomètre pris de façon isolée, aux valeurs des mêmes caractéristiques données par le constructeur.

Nous obtenons des résultats satisfaisants. Nous remarquons cependant un faible bruit de fond du signal spot laser légèrement supérieur à celui des barrières; nous expliquerons ce phénomène par la sensibilité du spot aux perturbations physiques du milieu plus grande que celle des barrières.

Nous avons par la suite « validé » (1) expérimentalement et statistiquement la méthode de mesurage du rétractomètre dans son ensemble, c'est à dire déterminé l'écart du signal à sa **linéarité** en calculant des coefficients de correction sur les mesures de diamètre et hauteur de l'objet à mesurer, et estimer expérimentalement sa **résolution** par le biais des écarts moyens. On a ainsi évalué les limitations techniques de l'appareil de mesure.

De plus, en analysant le bruit des signaux, nous avons caractérisé la mesure afin de mieux connaître la valeur des grandeurs mesurées.

Le rétractomètre laser mesure le retrait d'échantillons de sol à raison d'une série de trois mesures simultanées répétées (toutes les dix minutes par exemple) de l'état proche de la saturation en eau jusqu'à l'état de limite de retrait.

Nous obtenons une précision de **0.018%** (soit $9\mu\text{m}$) pour la mesure de dimension horizontale de l'échantillon de sol ($42\times 42\text{mm}$) d'environ 60 cm^3 et **0.020%** (soit $10\mu\text{m}$) pour celle de sa hauteur.

Le déplacement du plateau de la balance est négligeable par rapport à l'erreur donnée sur les capteurs. En effet, un échantillon de sol d'environ 100cm^3 analysé au rétractomètre perd au total 20 à 30g d'eau par évaporation au cours de la manipulation, ce qui correspond à un déplacement du plateau de 2 à 3 μm au total. Cette valeur est négligeable devant la résolution de l'appareil.

(1) : Une validation est un ensemble de test expérimentaux qui permet de prouver que l'appareil (ou la méthode) présente les conditions requises pour mesurer la grandeur recherchée entachée d'aucune cause de nullité. Dans le cas présent, nous avons surtout évalué les limitations techniques de l'appareil.

II./ METHODE DE L'ANALYSE RETRACTOMETRIQUE

II.1/ Préparation des échantillons à l'analyse rétractométrique (Protocoles expérimentaux)

Introduction

Les manipulations suivantes ont pour but de préparer des échantillons de sol en vue d'étudier leur comportement hydrostructural par rétractométrie laser. On fera varier certains paramètres comme leur taille, structure, et texture afin d'analyser leur influence respective sur le retrait. Afin d'ouvrir le plus possible l'étendue de notre domaine analytique, nous avons choisi de travailler sur quatre types de sol différents :

- Sol argileux (vertisol) de la moyenne vallée du fleuve Sénégal (Podor) : 60% d'argile à dominante sméctite : **AG**,
- sol ferrallitique jaune de Basse-Casamance (Sareyorobana), Sénégal: 45% d'argile à dominante kaolinite : **FA**,
- sol ferrugineux rouge de (Tyssée Kaymor), Sénégal : 20% d'argile à dominante kaolinite : **FU**,
- sol sablo-limoneux jaune peu évolué de berge du Doué, affluent du fleuve Sénégal : 13% d'argile à dominante sméctite : **LM**.

II.1.1/ Généralités

Selon que l'on souhaite faire de l'analyse rétractométrique sur des échantillons de sol non remanié (à structure naturelle intacte) ou à structure reconstituée, le prélèvement se pratiquera de façon différente. Dans les deux cas, le sol sera prélevé dans une fosse pédologique, sur un même profil, à une profondeur choisie pour que l'échantillon soit représentatif de l'horizon, lui-même étant typique et homogène.

- ex. Pour le sol ferrallitique à 45% d'argile (FA), le prélèvement s'est fait à une profondeur de 70 cm, dans l'horizon B (1) d'un sol de basse Casamance (Sénégal), (Niang, 1994).

(1) : L'horizon B est un horizon majeur, dans lequel la structure de la roche n'est plus visible. Il est donné par la disparition de toute la structure ou une partie importante de la structure de la roche originelle. Il est généralement enrichi par alluviation en éléments fins ou amorphes : argiles, oxydes de fer et d'aluminium parfois d'humus (Duchaufour, 1991 ; Lozet et Mathieu, 1990).

II.1.2/ Prélèvement du sol

A la profondeur choisie, dans une fosse pédologique (1) fraîchement creusée juste après la saison des pluies, des blocs cubiques encore humides, prétaillés d'arête d'environ 150 mm, (ceci pour faciliter leur découpe en cylindres de tailles voulues), sont découpés délicatement au couteau sans appliquer aucune contrainte mécanique au sol.

La technique de prélèvement pratiquée permet d'obtenir des échantillons de sol n'ayant pratiquement subi aucune modification de structure et de travailler ainsi en laboratoire sur un sol quasi identique à celui resté en place (*Fig. 2-II-1 et planche B p.103-104*). Leurs faces sont marquées de façon à repérer l'orientation du bloc dans le profil et ils sont immédiatement conditionnés dans des sacs de polyéthylène hermétiquement fermés, afin de les conserver à l'humidité du sol (condition indispensable surtout pour les sols très argileux du type "vertisols").

Juste autour de ces blocs, des mottes de terre et autres fragments de sol sont prélevés et conditionnés dans les mêmes conditions pour la fabrication d'échantillons de sol reconstitué.

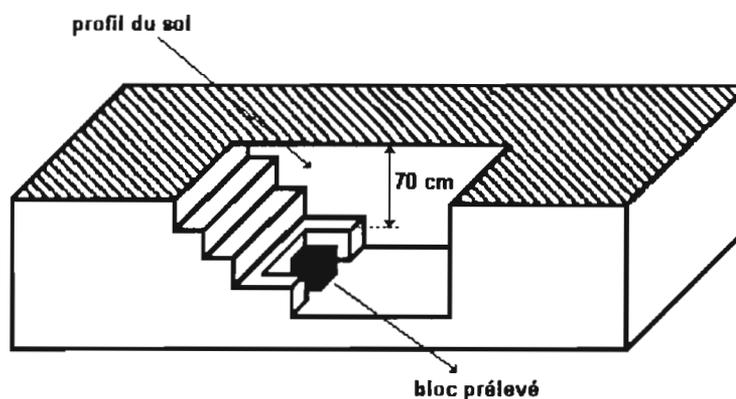


Fig. 2-II-1 : Schéma représentant le prélèvement « en marches d'escalier » d'échantillons d'un sol.

(1) : La Pédologie (du grec Pedon : "sol que l'on foule au pied", cultivé ou non) est la science qui étudie la formation des sols à partir de la décomposition de la zone superficielle de l'écorce terrestre (Soltner, 1991) ; elle étudie également les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques de conservation du sol, et leur évolution (Lozet et Mathieu, 1990).

II 1.3/ Préparation des échantillons

II.1.3.1/ Echantillons de sol à structure non remaniée

Au laboratoire, les blocs prélevés et conservés à l'humidité du sol sont taillés en cylindres de volume connu. Pour nos expériences, ils sont taillés aux mesures (diamètre x hauteur) suivantes: (34 x 30mm); (53 x 50mm); (71 x 70mm) pour les quatre types de sol : Ferrallitique (FA), Ferrugineux (FU), Sablo-limoneux (LM) et argileux vertique (AG).

Leurs caractéristiques granulométriques et chimiques sont données dans les *tableaux 2-II-a et 2-II-b*.

Des analyses physiques permettront, par la méthode du déplacement de liquide suivant le principe d'Archimède (voir *fig.2-II-2*), de déterminer leurs masses volumiques apparentes respectives ($M.V.app.$) ainsi que leurs masses volumiques réelles ($M.V.reelle$) par la technique au pycnomètre (Audry et al., 1973). Chaque valeur donnée dans le *tableau 2-II-a* représente la moyenne de 15 mesures par technique différente et par type de sol.

	AG (argileux)	FA (ferrallitique)	FU (ferrugineux)	LM (sablo-limoneux)
$\overline{\rho_{app.}}$ (g/cm ³)	1.796	1.522	1.416	1.571
écart type (s)	0.052	0.028	0.052	0.051
$\overline{\rho_{réel}}$ (g/cm ³)	2.690	2.565	2.585	2.612
écart-type (s)	0.010	0.001	0.008	0.005

Tab. 2-II-a : Masses volumiques apparente ($\overline{\rho_{app.}}$) et réelle ($\overline{\rho_{réel.}}$) pour chaque type de sol (valeur moyenne de 15 mesures).

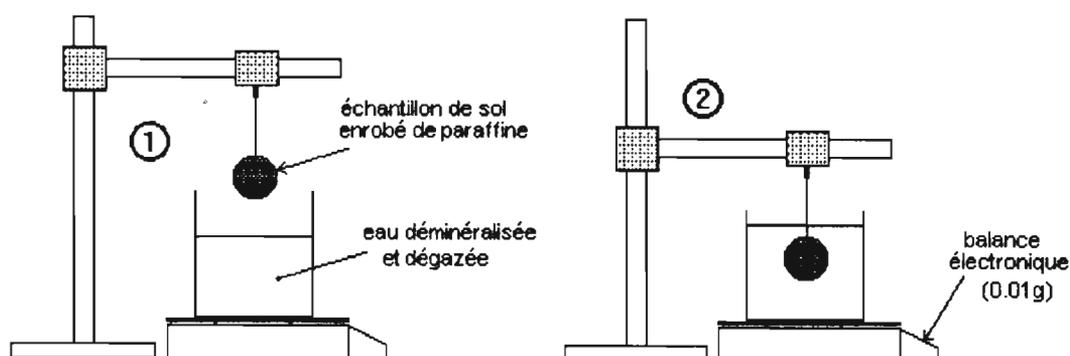


Fig.2-II-2 : Mesure de la masse volumique apparente d'un échantillon de sol par la méthode du déplacement d'eau suivant le principe d'Archimède.

Formules :

$$\rho_{\text{app.}} \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{M_s}{\left(A - \frac{M_p}{0.9}\right)}$$

$$V_{\text{ms}} \text{ (cm}^3\text{/g)} = \frac{1}{\rho_{\text{app.}}}$$

V_{ms} = volume massique du sol (cm³/g),

$\rho_{\text{app.}}$ = masse volumique apparente du sol (g/cm³),

A = poussée d'Archimède (cm³),

M_s = masse de sol sec (g),

M_p = masse de la paraffine qui enrobe l'échantillon (g),

$\rho_{\text{paraffine}} = 0.9 \text{ g/cm}^3$.

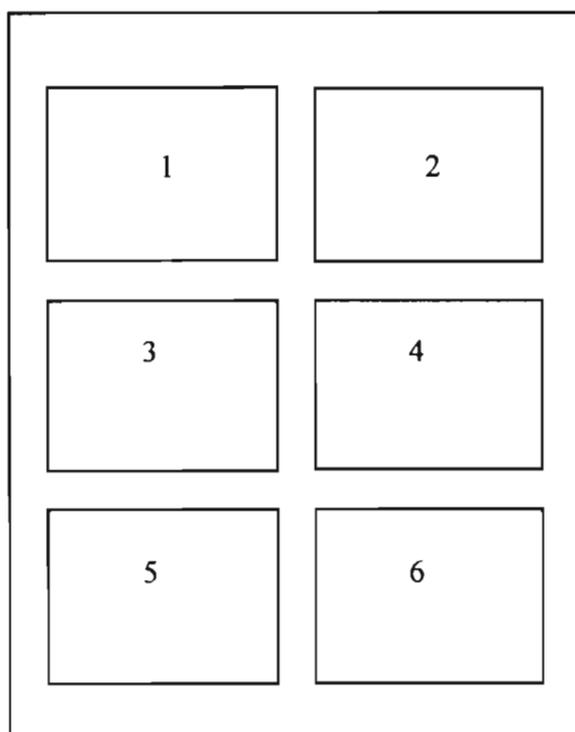
ANALYSES PHYSIQUE ET CHIMIQUE
DES SOLS ETUDIES :

TYPE DE SOL ANALYSE	FA (ferralitique)	FU (ferrugineux)	LM (sablo-limoneux)	AG (argileux)
Coefficient d'humidité (100/100-Hum%)	1.018	1.000	1.027	1.079
Analyse granulométrique				
Teneur en argile (%)	42.3	19.2	13.0	58.6
Teneur en limon fin (%)	7.6	5.4	6.1	24.1
Teneur en limon grossier (%)	8.1	13.5	21.5	15.4
Teneur en sable fin (%)	14.9	37.1	59.1	4.8
Teneur en sable grossier (%)	23.1	24.5	2.5	0.2
Masses volumiques				
Masse volumique apparente (g/cm ³)	1.52	1.42	1.57	1.80
Masse volumique réelle (g/cm ³)	2.57	2.59	2.61	2.69
Carbone organique (‰)	4.0	3.0	0.8	2.5
Cations échangeables				
Ca ²⁺ (meq./100g)	1.51	0.96	4.28	13.5
Mg ²⁺ (meq./100g)	0.48	0.41	1.51	8.25
K ⁺ (meq./100g)	0.00	0.00	0.00	0.51
Na ⁺ (meq./100g)	0.03	0.01	0.28	0.26

Tab.2-II-b : Caractéristiques physiques et physico-chimiques des quatres sols étudiés.

PLANCHE PHOTOGRAPHIQUE B :

**PRELEVEMENT ET CONDITIONNEMENT D'ECHANTILLONS NON REMANIES
D'UN SOL FERRALLITIQUE DE BASSE CASAMANCE (SENEGAL).**



- (1) (2) et (3) : Creusement d'une fosse en marches d'escalier après la saison des pluies.
- (4) : Découpage de cubes dans la marche de profondeur 70-90 cm (horizon B, à 45% d'argile).
- (5) : Conditionnement sur place des cubes humides dans des sacs de polyéthylène.
- (6) : Au laboratoire : taille des échantillons encore humides en cylindres.



Photo : J.M. Costantini



Photo : J.M. Costantini



Photo : G.Thierry



Photo : J.M. Costantini



Photo : G.Thierry

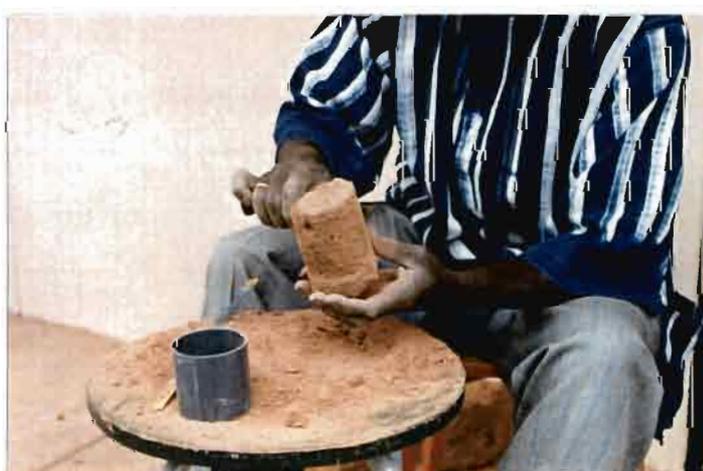


Photo : J.M. Costantini

II 1.3.2/ Fabrication d'échantillons de sol reconstitué à une masse volumique apparente (M.V.app.) donnée.

Nous avons reconstitué des échantillons de sol dans des cylindres de mêmes volumes que les blocs de sol non remanié taillés aux mêmes mesures et de mêmes M.V.app. que les mottes naturelles prélevées du même sol. Ceci afin de pouvoir analyser l'influence de la structure du sol (reconstituée ou naturelle non remaniée) sur le retrait d'un échantillon de sol sans que sa M.V.app. ne puisse intervenir dans l'interprétation comparatives des résultats.

- Première étape : Préparation du sol tamisé à 2 mm .

➤ Le sol prélevé sous forme de mottes et fragments est réparti dans des sacs de polyéthylène de 2 litres (cette opération se fait directement sur le terrain, quand le sol est encore humide). Au laboratoire il est séché à l'air, tamisé, et réparti par quantité de 300g dans des boîtes à l'abri de l'humidité ; ceci pour chaque sac, afin de respecter le plus possible la répartition granulométrique naturelle du sol en place et de la rendre le plus possible homogène et identique dans chaque échantillon reconstitué.

On notera que le sol sec n'est pas broyé mécaniquement mais simplement tamisé à 2mm ; les mottes les plus compactes seront légèrement écrasées à la main.

- Deuxième étape : Moulage du sol à saturation .

➤ On verse une quantité connue de matériau sol tamisé à 2mm dans un cylindre de PVC (tab.2-II-3) dont les parois intérieures sont préalablement enduites d'un léger film de Téflon, avant de les tapisser d'un film de polyéthylène pour éviter que le sol humide n'adhère aux parois du cylindre lors du démoulage.

Les cylindres sont posés sur une plaque poreuse trempée dans un bain d'eau déminéralisée (Fig.2-II-3).

D (mm) x H (mm)	AG (argileux)	FA (ferrallitique)	FU (ferrugineux)	LM (sablo-limoneux)
34*30	28g	34g	31g	38g
53*50	120g	140g	135g	170g
71*70	285g	330g	325g	380g

Tab. 2-II-c : Masse de sol pesée pour chaque cylindre de taille différente et pour chaque type de sol étudié.

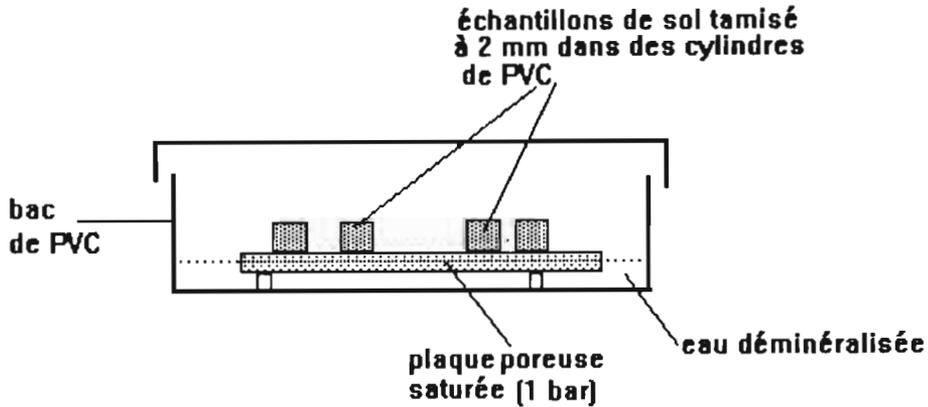


Fig. 2-II-3 : Préparation des échantillons de sol reconstitué.

- On place une masse d'environ 500g sur l'échantillon pour le presser pendant sa mise à saturation afin de chasser l'air des pores (fig. 2-II-5). Cette mise à saturation sous contrainte se fait durant 12 heures.

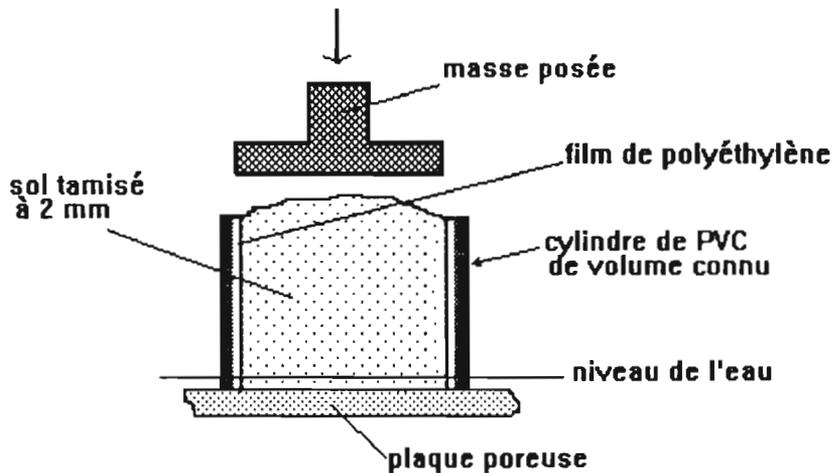


Fig. 2-II-4 : Préparation des échantillons de sol reconstitué : moulage d'un sol tamisé mis à saturation.

Troisième étape : Mise à $pF=3$ des échantillons saturés.

- On place la plaque poreuse saturée d'eau dans une chambre d'extraction (presse à membrane basse pression de 0 à 1 kg/cm²) sous $pF=3$ (100 kPa) jusqu'à l'équilibre (48 heures environ), (Fig. 2-II-5).

Principe de la technique :

- Les échantillons à étudier, préalablement saturés d'eau et disposés sur un support hémiper-méable (plaque de porcelaine poreuse saturée d'eau) sont soumis à une pression déterminée dans une presse à membrane de Richards (*fig. 2-II-5*). L'air comprimé pousse l'eau contenue dans les échantillons, qui traverse la plaque poreuse et passe dans une chambre délimitée par une membrane de caoutchouc qui communique avec l'extérieur. L'eau en excès est donc éliminée jusqu'à la réalisation d'un équilibre entre la pression d'air appliquée et la pression capillaire (ou suction) retenant l'eau dans le sol (1).

Explication :

Nos échantillons sont placés à un taux d'humidité correspondant à $pF=3$, pour les raisons suivantes :

- Afin d'établir un équilibre de potentiel en eau uniforme (pF) dans tout le cylindre et identique pour chaque échantillon.
- Pour leur donner une structure rigide compacte lors de leur tassement, sans écraser les agrégats.
- A $pF=3$, seule la microporosité est saturée d'eau ; c'est le point de friabilité du sol (2) (voir Colleuille et Braudeau, 1996).

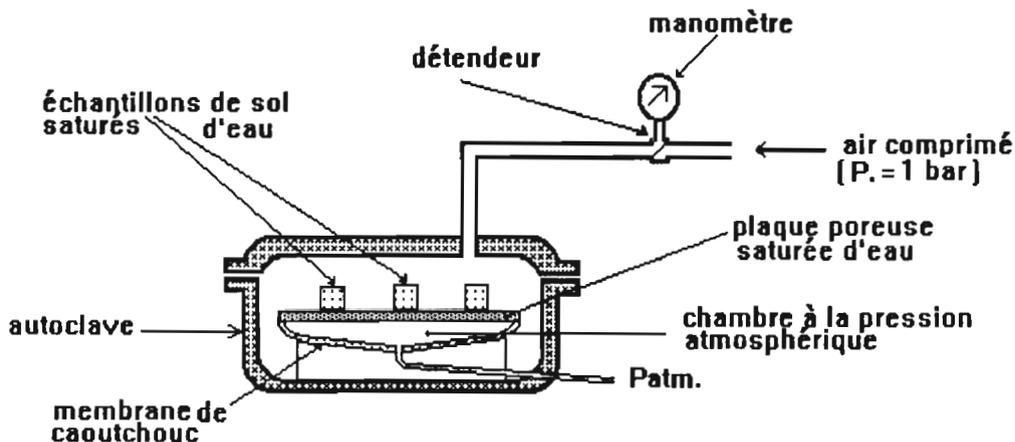


Fig. 2-II-5 : Presse à membrane basse pression (Richard, 1947 ; Daudet, 1970).

- (1) : Les valeurs de pF les plus couramment considérées sont : 4.2 ; 3.0 ; 2.5 ; 2.2 ; 1.9 correspondant respectivement à des pressions de 160 ; 100 ; 32 ; 16 et 8 kPa.
- (2) : Le point de friabilité est l'état d'humidité d'un sol tel que ses agrégats constitutifs peuvent être dissociés en unités structurales sous l'effet d'une faible pression (Lozet et Mathieu, 1990).

- Immédiatement après leur sortie de l'autoclave, on tasse les échantillons à l'aide de la presse mécanique à une pression adéquate pour obtenir la masse volumique apparente (M.V.app). désirée (Fig.2-II-6).
- Noter la masse appliquée.

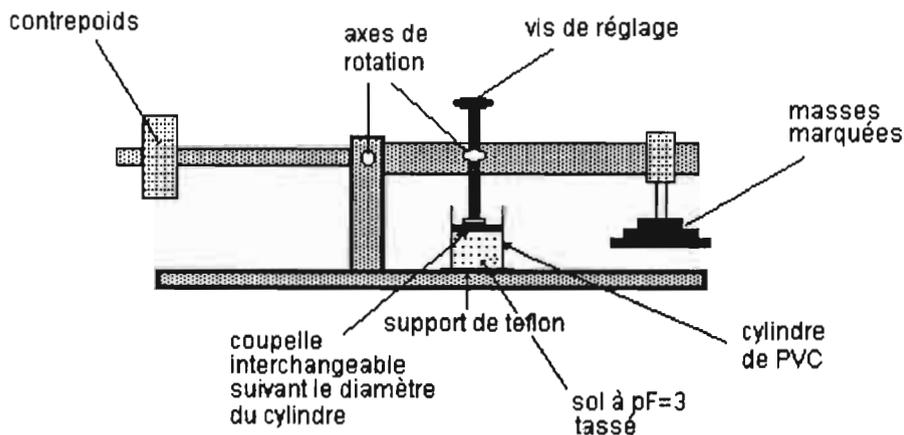


Fig. 2-II-6 : Presse mécanique pour le compactage d'un échantillon de sol cylindrique afin de faire varier sa masse volumique apparente. (modèle J.Feltens (ORSTOM) revu et amélioré pour la méthode).

Remarque : On fait d'abord des essais de pressions différentes sur les échantillons placés à $pF=3$, c'est à dire 100kPa (ex : 0kg ; 1kg ; 2kg ; 5kg ; 10kg ; 15kg) afin d'apprécier rapidement, dans un premier temps, la pression de tassement nécessaire pour amener l'échantillon à la M.V.app. désirée.

On trace : $P.appliquée = f(M.V.app.)$ (fig. 2-II-6).

La M.V.app. idéale serait celle d'une motte naturelle du même sol, prélevée dans le même profil à la même profondeur.

On fait trois répétitions pour chaque pression de tassement différente exercée.

- On démoule les échantillons de sol et on les conserve les au frais dans des boites hermétiquement fermées .

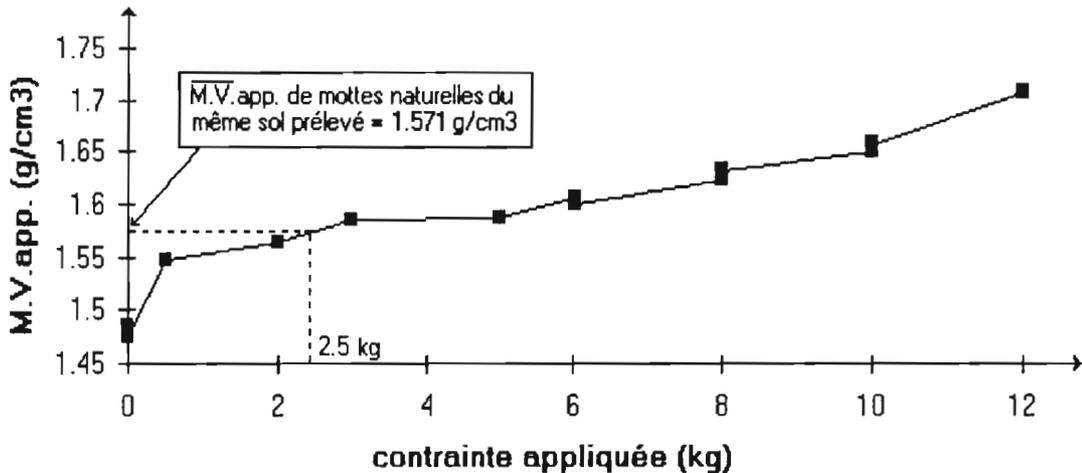


Fig. 2-II-7 : Variation de la masse volumique apparente d'un sol sablo-limoneux reconstitué en fonction de la pression de tassement appliquée. (Trois répétitions ont été réalisées pour chaque nouvelle contrainte appliquée)

II.1.4/ Mise à saturation et positionnement de l'échantillon sur le plateau du rétractomètre

On a vu précédemment que l'échantillon de sol peut être aussi bien un cylindre de sol non remanié prélevé par carottage qu'un cylindre de sol reconstitué à partir de terre tamisée à 2 mm, ou encore de pâte d'argile saturée.

La préparation de l'échantillon consiste à le porter lentement à saturation par ascension capillaire d'eau à travers une plaque poreuse saturée pendant 48, voire 72 heures, selon la taille de l'échantillon et la texture du sol (*fig. 2-II-8*).

La saturation doit se faire de manière la plus lente et la plus douce possible pour empêcher l'air d'être piégé dans les pores et pour éviter le phénomène d'éclatement de la structure dû à une sursaturation de l'échantillon qui entraîne la cassure des « ponts » inter-agrégats et fausserait l'allure de la courbe de retrait à cause d'un phénomène de précontrainte en début de retrait.

Le milieu de saturation est fermé par un couvercle de PVC pour empêcher toute évaporation pendant l'hydratation.

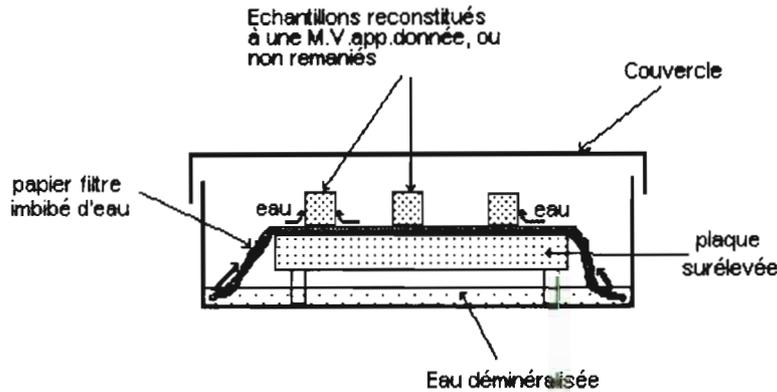


Fig. 2-II-8 : Saturation d'échantillons de sol avant l'analyse rétractométrique.

Les échantillons saturés sont ensuite positionnés sur le plateau du rétractomètre, posés sur leur support métallique comme le montre la *figure 2-II-9*.

Le support est préalablement recouvert d'un tulle de nylon très fin pour éviter que l'échantillon n'adhère à la surface métallique pendant son retrait.

La pointe de fixation inoxydable (haut. = 5 mm) empêche le cylindre de sol de se déplacer lors du mouvement du plateau, sans toutefois influencer son retrait.

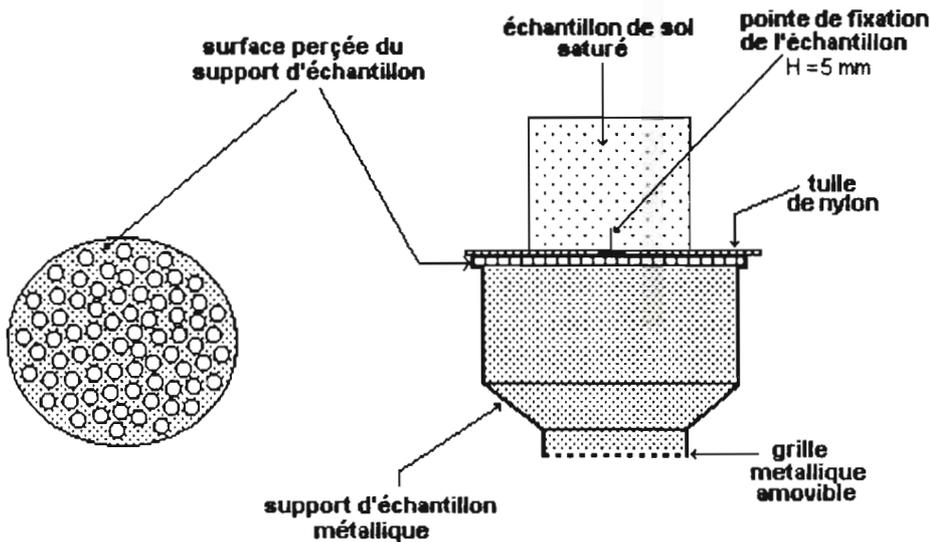


Fig. 2-II-9 : Position de l'échantillon saturé sur son support métallique avant l'analyse rétractométrique.

L'évaporation d'eau de l'échantillon durant le retrait se fait dans toutes les directions comme le montre la *figure 2-II-10*.

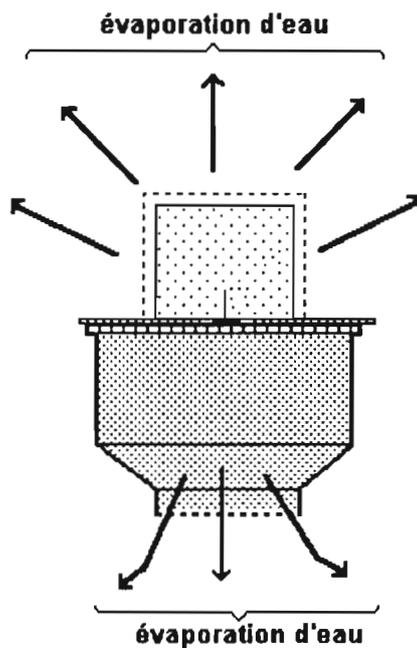


Fig. 2-II-10 : Evaporation d'eau lors du retrait de l'échantillon

La mesure du retrait et de la masse d'eau évaporée se fait automatiquement à intervalle régulier de cinq ou dix minutes tout au long du séchage de l'échantillon.

II.2/ Détermination de la courbe de retrait

II.2.1/ Expressions de la courbe de retrait

Nous avons vu dans la première partie de ce mémoire que l'exploitation d'une courbe de retrait obtenue automatiquement à partir de la mesure indirecte et continue du volume massique d'un échantillon de sol tout au long de son dessèchement était un bon moyen pour mesurer et décrire l'interaction entre l'eau et la structure du sol. La rétractométrie laser permet le calcul d'une telle courbe.

Suivant que l'on calcule la variation de volume de l'échantillon à partir de la mesure d'une de ses dimensions horizontale ou verticale, la courbe de retrait se présentera sous une expression différente.

II.2.1.1/ Expression de la courbe de retrait à partir de la hauteur (H) mesurée :

Le calcul de la courbe de retrait est alors exécutée à partir des points de la mesure verticale faite par le « spot » laser.

Etant admis que le retrait s'effectue de manière isotrope, le volume de l'échantillon cylindrique est alors calculé de la façon suivante :

$$\boxed{\frac{V}{V_0} = \left(\frac{H}{H_0} \right)^3} \quad (1) \quad (V \text{ en cm}^3/\text{g} \text{ et } H \text{ en mm})$$

(V_0 et H_0 sont respectivement le volume apparent et la hauteur de l'échantillon, mesurés en fin de retrait).

Connaissant la masse de solide de l'échantillon de sol séché à 105°C ainsi que son volume massique apparent en fin de manipulation, on peut tracer V_m en fonction de la teneur en eau θ de l'échantillon donnée par la formule suivante :

$$\boxed{\theta = \frac{(M - M_{105} - M_t)}{M_{105}}} \quad (2) \quad (\theta \text{ en g/g} \text{ et } M \text{ en g})$$

(M_{105} est la masse (en g) de l'échantillon séché à l'étuve (105°C), et M_t celle de la tare de l'échantillon).

II.2.1.2/ Expression de la courbe de retrait à partir du « diamètre »(D) (D) mesuré :

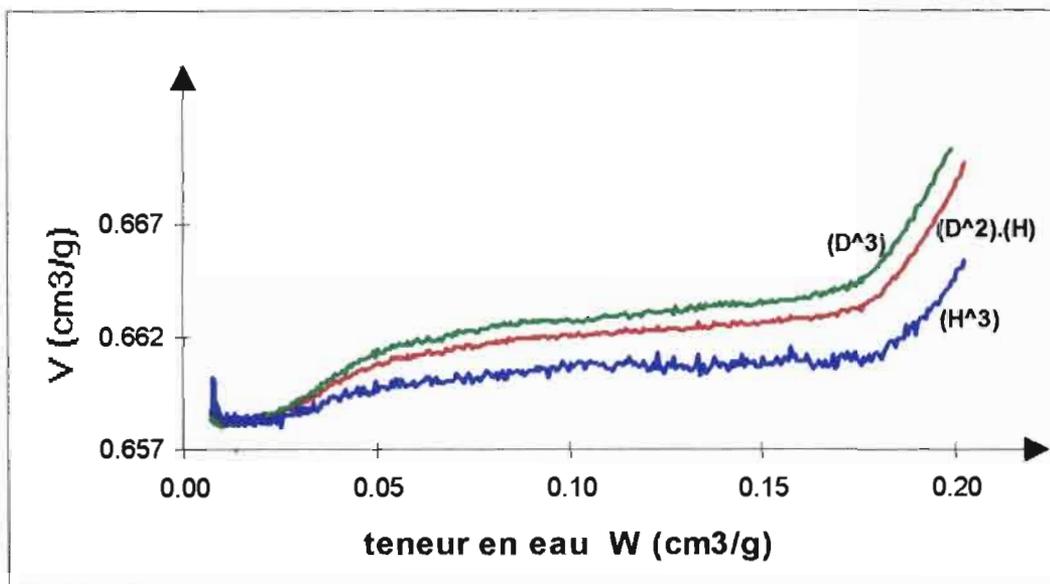
Le calcul de la courbe de retrait est alors réalisé à partir des points de la mesure horizontale faite par les « barrières » laser.

Faisant l'hypothèse d'isotropie du retrait, le volume est alors calculé de la façon suivante :

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{D}{D_0} \right)^3 \quad (3) \quad (V \text{ en cm}^3/\text{g} \text{ et } D \text{ en mm})$$

(V₀ et D₀ sont respectivement le volume apparent et le « diamètre » de l'échantillon mesurés en fin de retrait).

Le calcul de la teneur en eau est le même que pour la mesure précédente.
Un exemple de ce type de courbe est présenté ci-dessous, à la figure 2-II-10.



11
Fig.2-II-10 : Exemple d'une courbe de retrait expérimentale du même échantillon de sol (sablo-limoneux reconstitué), exprimée selon trois expressions différentes du volume calculé : d'après les mesures de la hauteur de l'échantillon (H³), de son « diamètre » (D³) en faisant l'hypothèse d'isotropie du retrait, et d'après le volume calculé (D².H).

II.2.1.3/ Expression de la courbe de retrait à partir de H et D mesurés :

Considérant une isotropie axiale du retrait, la variation volumique du retrait était jusqu'à présent représentée par l'expression suivante :

$$V = V_0 \cdot \left(\frac{D}{D_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{H}{H_0} \right) \quad (4)$$

(D_0 et H_0 représentant respectivement le « diamètre » et la hauteur de l'échantillon en fin de retrait)

Le calcul de la teneur en eau est le même que pour les mesures précédentes.

II.2.2/ Traitement de la courbe de retrait : modélisation

II.2.2.1/ Modélisation d'après la méthode d'ajustement des équations de type exponentielle (modèle MRS) :

Dans la première partie du mémoire au chapitre III.2 (p.58), nous avons expliqué l'intérêt d'un tel modèle et défini son principe.

Rappelons que la courbe de retrait est décrite en totalité par une équation paramétrique établit d'après deux hypothèses fondamentales du fonctionnement hydro-structural de l'échantillon de sol :

$$dV = K_{(C-B)} dV_{p,mi} + K_{(F-E)} d\theta_{ma}/\rho_w \quad (\text{en cm}^3/\text{g}) \quad (5),$$

avec $dV_{p,mi} = x d\theta/\rho_w$ (6),

et $d\theta_{ma}/\rho_w = (1-x) d\theta/\rho_w$ (7).

(x représente la fraction de l'eau s'évaporant de l'échantillon, provoquant le retrait de $V_{p,mi}$, $K_{(C-B)}$ et $K_{(F-E)}$ représentent respectivement les pentes des phases de retrait normal et structural, θ_{ma} la teneur en eau de la macroporosité, $V_{p,mi}$ le volume poral de la microporosité et ρ_w la masse volumique de l'eau).

Les différentes phases de retrait de la courbe délimitées par les points caractéristiques A, B, C et E (voir fig.1-III-7 en première partie) sont mises en équation d'après les valeurs de teneurs en eau suivantes :

Phase de retrait	F-E (structural)	E-C	C-B (normale)	B-A (résiduel)	A-A ₀ (non retrait)
Valeur de x	0	$\frac{(\exp^{w_n} - 1)}{(\exp - 1)}$	1	$\frac{(\exp^{w_n} - 1)}{(\exp - 1)}$	0
Valeur de w _n		$\frac{(w - w_E)}{(w_C - w_E)}$		$\frac{(w - w_A)}{(w_B - w_A)}$	

Tableau 2.II.a : Valeurs de x et w_n dans chaque phase de retrait.

En remplaçant les valeurs de x du tableau 2.II.a dans l'équation (6) tout en exprimant la teneur en eau en valeur massique, on obtient les relations suivantes :

- pour : $\theta_E < \theta < \theta_F$:

$$\frac{dv_{p,mi}}{d\theta} = 0$$

- pour : $\theta_C < \theta < \theta_E$:

$$\frac{dv_{p,mi}}{d\theta} = \left[\frac{\exp\left(\frac{(\theta - \theta_E)}{(\theta_C - \theta_E)}\right)}{(\exp 1 - 1)} \right]$$

- pour : $\theta_B < \theta < \theta_C$:

$$\frac{dv_{p,mi}}{d\theta} = 1$$

- pour : $\theta_A < \theta < \theta_B$:

$$\frac{dv_{p\ mi}}{d\theta} = \left[\frac{\exp\left(\frac{(\theta - \theta_A)}{(\theta_B - \theta_A)}\right)}{(\exp 1 - 1)} \right]$$

- pour : $\theta_{A_0} < \theta < \theta_A$:

$$\frac{dv_{p\ mi}}{d\theta} = 1$$

Sachant que $\theta_{ma} = \theta - (v_{p\ mi} \cdot \rho_w)$ au-dessus du point d'entrée d'air ($\theta > \theta_B$), que $\theta_{ma} = 0$ en dessous de celui-ci, et en intégrant les relations précédentes dans (5) pour chacune des phases de retrait, on obtient les équations de $v = f(\theta)$ suivantes qui sont ajustées à la courbe observée :

- pour : $\theta_E < \theta < \theta_F$:

$$v = v_E + K_{(E-C)} \left[\frac{(\theta - \theta_E)}{(\theta_{sat} - \theta_E)} \right]$$

- pour : $\theta_B > \theta > \theta_C$:

$$v = v_E - \left\{ (\theta_E - \theta_C) \cdot \left[\frac{(K_{(C-B)} \exp.\theta_n - \theta_n - 1) + K_{(F-E)}(\theta_n \cdot \exp.\theta_n + 1)}{(\exp.1 - 1)} \right] \right\}$$

$$\text{avec } \theta_n = \frac{(\theta - \theta_B)}{(\theta_A - \theta_B)}$$

- pour : $\theta_B < \theta < \theta_C$:

$$v = v_B + K_{(C-B)} \left[\frac{(\theta - \theta_B)}{(\theta_C - \theta_B)} \right]$$

- pour : $\theta_A < \theta < \theta_B$:

$$v = v_A + (\theta_E - \theta_C) \cdot \left[\frac{(K_{(C-B)} \exp.\theta_n - \theta_n - 1)}{\exp.1 - 1} \right]$$

avec $\theta_n = \frac{(\theta - \theta_C)}{(\theta_E - \theta_C)}$

- pour : $0 < \theta < \theta_A$:

$$v = v_A$$

Par l'ajustement de la courbe ainsi calculée (d'après l'équation paramétrique (5) p.121) sur la courbe expérimentale en utilisant une méthode d'optimisation (Simplex), on peut estimer les huit paramètres caractéristiques de l'état hydro-structural de l'échantillon de sol définis par Braudeau (1988a). Le résultat de cet ajustement permet de placer les points caractéristiques sur la courbe de retrait expérimentale

La figure 2-II-11 montre la qualité de l'ajustement des phases de retrait structural et résiduel évalué par la somme des carrés des écarts (S.C.E) à partir des données expérimentales :

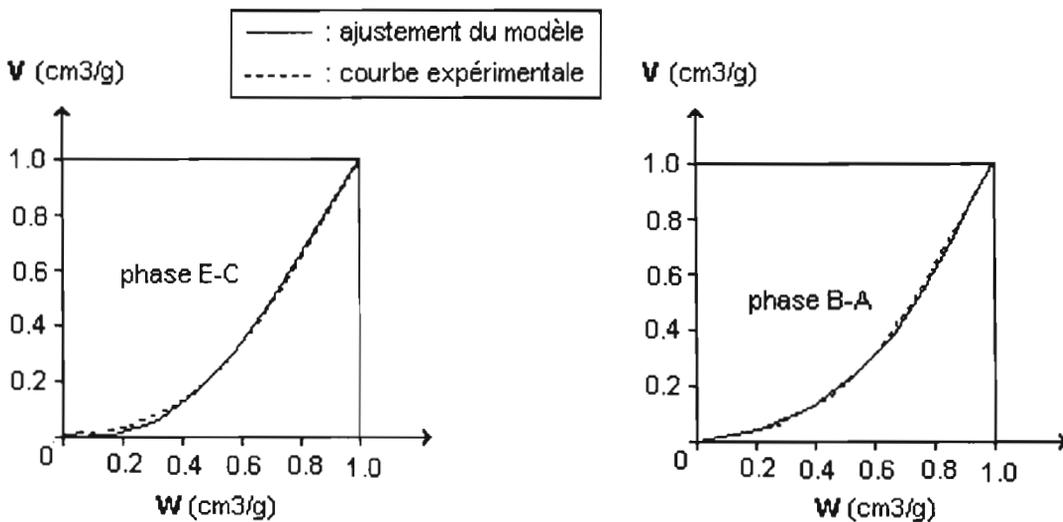


Fig.2-II-11 : Comparaison entre les courbes expérimentales observées $V = f(W)$ et l'ajustement du modèle MRS, d'après Braudeau (1988a).

METHODE DU SIMPLEX :

D'une manière générale, la méthode du simplexe est une méthode d'optimisation directe à variables multiples, qui consiste à incrémenter les valeurs des variables selon un plan, en cherchant à repérer le sens de l'évolution vers l'optimum. Le but est donc de chercher un point optimal dans un plan géométrique à partir des coordonnées d'un point de ce même plan, trouvé, soit par manipulation, soit d'après la bibliographie : c'est le point de base du simplexe (Delacroix et Porte, 1996).

Dans le cas présent, la méthode consiste à définir un critère de réponse ϕ qui, dans le cas de la méthode des moindres carrés, est la somme des carrés des écarts (SCE) entre les valeurs observées et calculées. La méthode d'estimation calcule le critère ϕ à partir de k paramètres initiaux, puis affine leur valeur par la méthode du simplexe jusqu'à ce que ϕ devienne optimal.

L'opérateur sélectionne au départ les points de base du simplexe initial d'après l'allure de la courbe de retrait (ce sont les points estimés A, B, C, etc... de la courbe expérimentale). On obtient alors un simplexe à $(k+1)$ sommets, chacun d'eux correspondant à un lots de k variables (k paramètres caractéristiques déterminants). Pour chacun de ces points, le critère ϕ (la SCE) est calculé. Le point caractérisé par le plus mauvais critère est sélectionné afin de calculer son symétrique par rapport au barycentre du simplexe. On trouve alors un nouveau point qui, s'il présente un meilleur critère de réponse que le précédent, est retenu. Dans le cas contraire, on pourra pratiquer suivant les règles de la méthode, toute une série de manipulations géométriques par rapport au point précédent, jusqu'à obtenir un second point ayant un meilleur critère ϕ que le précédent. Dans tous les cas, le point suivant est retenu au profit du précédent, de manière à ce que la figure ait toujours $(k+1)$ sommets. Le principe est donc de s'éloigner, par comparaison des réponses d'expériences successives, à chaque fois du plus mauvais point. Lorsqu'aucune amélioration ne peut être apportée sur le critère de réponse ϕ , l'optimisation est arrêtée et l'optimum est supposé atteint par la méthode.

Un logiciel créé pour traiter les courbes brutes permet l'optimisation de l'ajustement des équations paramétriques à ces courbes pour la détermination des paramètres caractéristiques. A partir de ces paramètres, on peut calculer toute variable descriptive du modèle fonctionnel et caractériser quantitativement les propriétés structurales du sol définies d'après le modèle MRS (états hydriques du sol, réserves en eau, etc...).

Une présentation des résultats d'une analyse de retrait réalisée en utilisant des *macro-commandes Excel* (Larvy Delarivière, 1997) pour l'exemple d'un échantillon de sol argileux AG (vertisol de Podor, Sénégal), est présentée ci-dessous (fig 2-II-12).

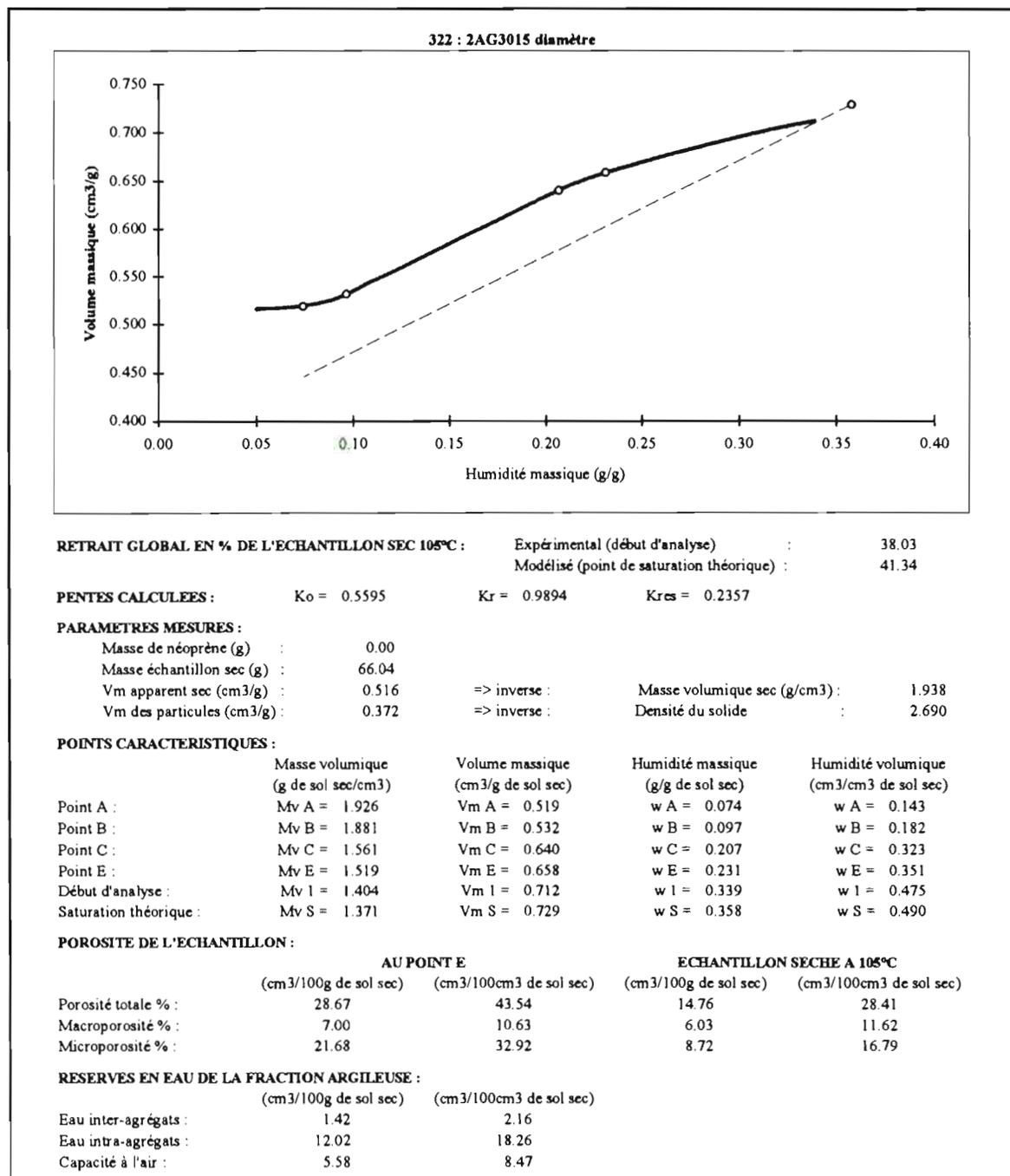


Fig. 2-II-12 : Présentation des résultats d'une analyse rétractométrique.

II.2.2.2/ Modélisation à partir de la méthode d'ajustement des droites (modèle des droites MD) :

Le modèle MD est inspiré de celui « en trois droites » de Mc Garry et Malafant (1987) qui ne pouvait prendre en compte, du fait du manque de données expérimentales, toutes les phases de retrait. Il a été présenté à la *figure 1-III-3* de la première partie.

Nous considérons cette fois-ci toutes les phases de retrait que présente la courbe (*fig.2-II-13*) (cinq phases pour le sol ferrallitique FA reconstitué).

- On trace les tangentes aux parties linéaires de la courbe par régression linéaires et on calcule leurs pentes. Les coordonnées des points d'intersection des tangentes ainsi que leurs pentes constitueront alors des paramètres caractéristiques déterminants pour la modélisation de la courbe de retrait.

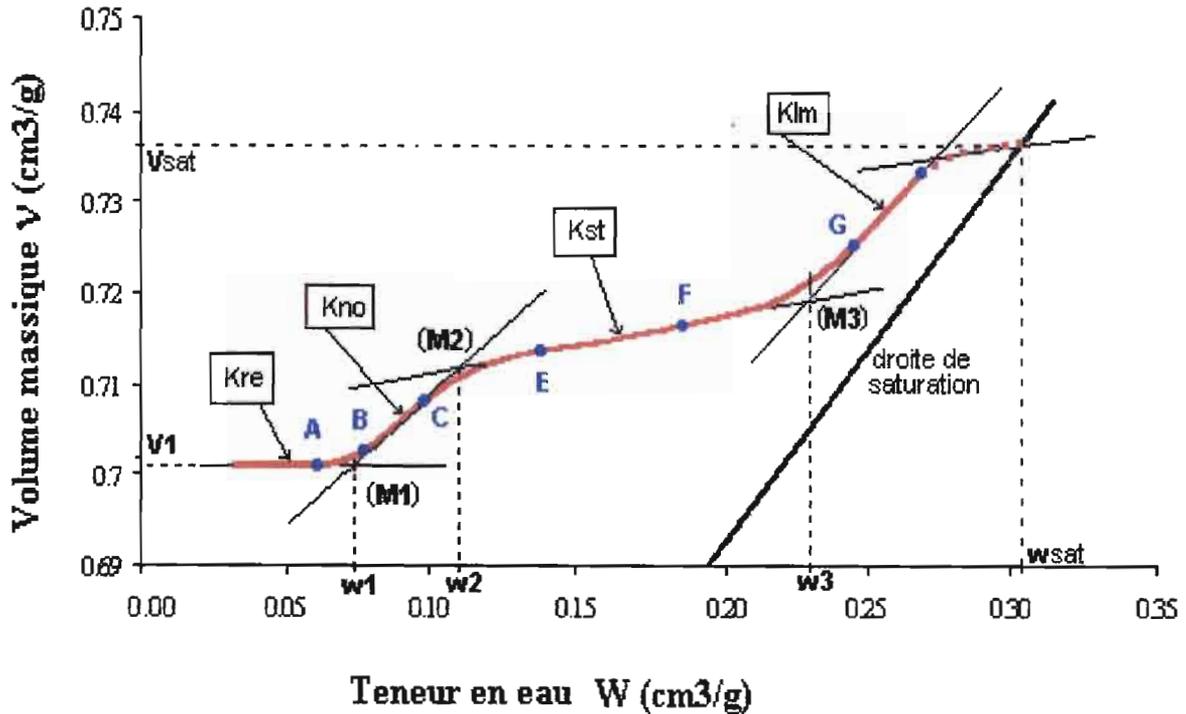


Fig. 2-II-13 : Courbe de retrait d'un échantillon de sol ferrallitique reconstitué, modélisée d'après le modèle en droites (Braudeau et al. 1996).

Remarque : La droite de saturation est celle qui exprime le retrait d'un échantillon de sol comme si tous les pores remplis d'eau se vidaient complètement par gravité sans entrée d'air.

L'équation de la droite de saturation est du type ($y = ax + b$) :

$$\boxed{V_{\text{sat}} = \frac{1}{\rho_{\text{eau}}} \cdot w_{\text{sat}} + v_{\text{s}}} \quad \frac{1}{\rho_{\text{eau}}} = 1 \text{ est la pente de la droite de saturation}$$

Calcul des points caractéristiques du modèle MD :

$1/\rho_{\text{eau}} = 1$ représente la pente de la droite de saturation, w_{sat} la teneur massique en eau (en cm^3/g), et v_{s} le volume massique de solide (c'est l'inverse de la masse volumique réelle du sol).

Calcul des points caractéristiques du modèle en droites (MD) :

- Calcul de V_1 et w_1 :

Ce sont les coordonnées du point (M1) correspondant à l'intersection des deux pentes K_{res} et K_{no} (fig.2-II-13) qui s'écrivent sous la forme :

$$K_{\text{res}} = \frac{y - y_A}{x - x_A} \quad \text{et} \quad K_{\text{no}} = \frac{y - y_B}{x - x_B} \quad (\text{les pentes étant calculées par régression linéaire}).$$

$$\Rightarrow \begin{cases} y = K_{\text{res}} \cdot x - K_{\text{res}} \cdot x_A = y_A \\ y = K_{\text{no}} \cdot x - K_{\text{no}} \cdot x_B = y_B \end{cases}$$

(x représentant ici le volume massique (V) et y la teneur volumique en eau (w)).

$$\Rightarrow \begin{cases} x_1 = \frac{K_{\text{no}} \cdot x_B - y_B - K_{\text{res}} \cdot x_A + y_A}{K_{\text{no}} - K_{\text{res}}} = w_1 \\ y_1 = K_{\text{no}} \cdot x_1 - K_{\text{no}} \cdot x_B + y_B = V_1 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \boxed{\begin{cases} w_1 = \frac{K_{\text{no}} \cdot w_B - V_B - K_{\text{res}} \cdot w_A + V_A}{K_{\text{no}} - K_{\text{res}}} \\ V_1 = K_{\text{no}} \cdot (w_1 - w_B) + V_B \end{cases}}$$

• Calcul de V2 et w2 :

Ce sont les coordonnées du point (M2) correspondant à l'intersection des deux pentes K_{no} et K_{st} (fig.2-II-13) qui s'écrivent sous la forme :

$$K_{no} = \frac{y - y_C}{x - x_C} \quad \text{et} \quad K_{st} = \frac{y - y_E}{x - x_E} \quad (\text{les pentes étant calculées par régression linéaire}).$$

$$\Rightarrow \begin{cases} x_2 = \frac{K_{st} \cdot x_E - y_E - K_{no} \cdot x_C + y_C}{K_{st} - K_{no}} = w_2 \\ y_2 = K_{st} \cdot x_2 - K_{st} \cdot x_E + y_E = V_2 \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} w_2 = \frac{K_{st} \cdot w_E - V_E - K_{no} \cdot w_C + V_C}{K_{st} - K_{no}} \\ V_2 = K_{st} \cdot (w_2 - w_E) + V_E \end{cases}$$

• Calcul de V3 et w3 :

Ce sont les coordonnées du point (M3) correspondant à l'intersection des deux pentes K_{st} et K_{lm} (fig.2-II-13) qui s'écrivent sous la forme :

$$K_{st} = \frac{y - y_E}{x - x_E} \quad \text{et} \quad K_{lm} \text{ est calculée par régression linéaire.}$$

$$\begin{cases} y = K_{lm} \cdot x + k \\ y = K_{st} \cdot x - K_{st} \cdot x_E + y_E \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} x_3 = \frac{y_E - K_{st} \cdot x_E - k}{K_{lm} - K_{st}} \\ y_3 = K_{st} \cdot x_3 - K_{st} \cdot x_E + y_E \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} w_3 = \frac{V_E - K_{st} \cdot w_E - V_E - k}{K_{lm} - K_{st}} \\ V_3 = K_{st} \cdot (w_3 - w_E) + V_E \end{cases}$$

II.2.2.3/ Mesure de l'anisotropie du retrait :

Nous observons également sur la figure 2-II-11 (p.120) un décalage très net entre la courbe calculée d'après le retrait horizontal et celle calculée d'après le retrait vertical de l'échantillon de sol étudié (LM), en fonction de sa perte en eau. Il révèle bien un phénomène d'anisotropie du retrait dans ce cas.

Les travaux de Bellier et Larvy Delarivière (1993) sur la mise en évidence de l'anisotropie et conséquence de la cohésion des agrégats du sol sur le retrait confirment bien cette observation. En considérant le retrait comme axialement isotrope, la variation volumique du retrait était jusqu'à présent représentée par l'expression (4) donnée dans le paragraphe 2-II-1-3/ précédent (p.121).

Tenant compte du phénomène d'anisotropie, les deux mesures simultanées du diamètre et de la hauteur permettent de calculer un **coefficient d'isotropie (Cis)** qui servira à établir une nouvelle expression plus juste du volume. En effet, pour assurer une meilleure modélisation de la courbe de retrait et une meilleure définition des points de transition des différentes phases, la courbe de retrait peut être calculée en fonction uniquement du diamètre, en adoptant un exposant β moyen dans l'expression du volume calculé.

• Calcul du coefficient d'isotropie Cis :

Selon Towner (1986), $\frac{dV}{V} = \alpha \frac{dH}{H} = \beta \frac{dD}{D}$ (1) et $Cis = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{dD/D}{dH/H}$ (2)

Quand on intègre (1), $\ln\left(\frac{V}{V_0}\right) = \beta \ln\left(\frac{D}{D_0}\right) = \alpha \ln\left(\frac{H}{H_0}\right)$ (3)

$$\Rightarrow \left(\frac{V}{V_0}\right) = \left(\frac{D}{D_0}\right)^\beta \Rightarrow \boxed{V = V_0 \left(\frac{D}{D_0}\right)^\beta} \quad (4)$$

(V_0 , H_0 , et D_0 représentent les mesures en fin de retrait).

Il faut calculer l'exposant β en fonction du coefficient d'anisotropie (Cis) :

$$(3) \Rightarrow \frac{\alpha}{\beta} = \frac{\ln(D/D_0)}{\ln(H/H_0)} = \frac{\ln\left(1 + \frac{D-D_0}{D_0}\right)}{\ln\left(1 + \frac{H-H_0}{H_0}\right)}$$

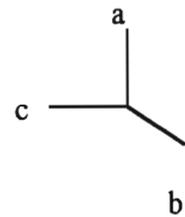
Par approximation (en utilisant les développements limités), et comme $\Delta H / H_0$ et $\Delta D / D_0$ sont négligeables devant 1, l'expression du Cis devient alors :

$$\text{Cis} = \frac{(D - D_0 / D_0)}{(H - H_0 / H_0)} \quad (5)$$

Les Cis est calculé expérimentalement d'après les valeurs de H et D données par le rétractomètre durant la mesure du retrait de l'échantillon de sol.

- Relation entre Cis, α , et β :

L'échantillon cylindrique se déforme dans un plan à trois dimensions :



D'après la théorie des faibles déformations : $\frac{dV}{V} = \frac{da}{a} + \frac{db}{b} + \frac{dc}{c}$

En faisant l'hypothèse d'isotropie axiale du retrait : $\frac{db}{b} = \frac{dc}{c} = \frac{dD}{D}$ par exemple,

$$\Rightarrow \frac{dV}{V} = \frac{da}{a} + 2\frac{db}{b} \Rightarrow \frac{dV}{V} = \frac{dH}{H} + 2\frac{dD}{D} \quad (6)$$

(6) et (1) \Rightarrow : système d'équations :
$$\begin{cases} \frac{dV}{V} = \frac{dH}{H} + 2\frac{dD}{D} \\ \frac{dV}{V} = \alpha \frac{dH}{H} = \beta \frac{dD}{D} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \frac{dV}{V} = \frac{2}{\beta} \cdot \left(\frac{dV}{V}\right) + \frac{1}{\alpha} \left(\frac{dV}{V}\right) \Rightarrow 1 = \frac{1}{\alpha} + \frac{2}{\beta}$$

$$\text{Cis} = \frac{\alpha}{\beta} \Rightarrow \beta = 2 + \frac{1}{\text{Cis}} \quad (7)$$

En ne considérant que la mesure en D (voir (4)), on a :

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{D}{D_0}\right)^{2 + \frac{1}{\text{Cis}}} \quad (8)$$

Le C_{is} sera donc calculé d'après les données expérimentales acquises par le rétractomètre laser lors d'une analyse de retrait (D expérimentale et H expérimentale).

En tenant compte du phénomène d'anisotropie du retrait (en appliquant l'exposant β au calcul du volume massique de l'échantillon des sols), les deux mesures simultanées du « diamètre » et de la hauteur de l'échantillon en fonction de sa perte en eau tout au long du retrait permettent alors de déterminer une expression de la courbe de retrait dont la nouvelle expression est donnée par la formule (4).

III / CONCLUSION

Nous venons de présenter un nouvel appareil de mesure du retrait d'échantillons de sol : **le rétractomètre laser**, nous avons testé ses performances et évalué ses limitations techniques. Il permet en effet de mesurer automatiquement et en continu, les variations tridimensionnelles du volume d'échantillon de sol en fonction de sa perte en eau, et ainsi de prendre en compte son anisotropie relative. De plus, il a l'avantage de pouvoir traiter huit échantillons en une seule manipulation, ce qui ouvre considérablement le champ des possibilités de traitements analytiques (statistiques et autres...) et permet ainsi une interprétation de la courbe de retrait et du comportement hydro-structural de l'échantillon de sol qu'elle décrit, plus rigoureuse. Nous répondons ainsi à une partie des problèmes posés en fin de première partie de ce mémoire.

Nous avons établi un protocole opératoire de l'analyse rétractométrique, de la technique de prélèvement de l'échantillon de sol, jusqu'à son positionnement sur le plateau du rétractomètre laser.

Nous avons également décrit les méthodes de traitement de la courbe de retrait expérimentale, quels que soient son expression et le mouvement de son retrait (isotrope ou anisotrope), en la modélisant par ajustement dichotomique en utilisant une technique d'optimisation (MRS) ou par ajustement graphique (MD) des différentes phases linéaires ou incurvées.

Néanmoins, il reste à savoir si cette méthode rétractométrique peut s'adapter à tous types de sol avec la même précision, et quels sont les effets de l'influence de ses conditions opératoires sur la caractérisation de la courbe de retrait.

TROISIEME PARTIE

RESULTATS ET DISCUSSION

I./ ETUDE DES COURBES DE RETRAIT EXPERIMENTALES

I.1/ Qualité des mesures horizontale et verticale

Au paragraphe II.2/ de la deuxième partie, nous avons vu que la méthode de mesure du retrait au rétractomètre laser permettait de tracer des courbes de retrait caractéristiques du comportement hydrostructural d'un échantillon de sol.

La *fig.3-I-1* nous présente des courbes expérimentales tracées d'après les données brutes acquises par l'appareil tout au long du retrait, et ce pour les quatre types de sol reconstitués étudiés. Chaque signal correspondant à une mesure du retrait dans une direction déterminée :

- courbe en **H** qui représente la mesure du retrait en hauteur,
- courbe en **D** qui représente la mesure du retrait en « diamètre ».

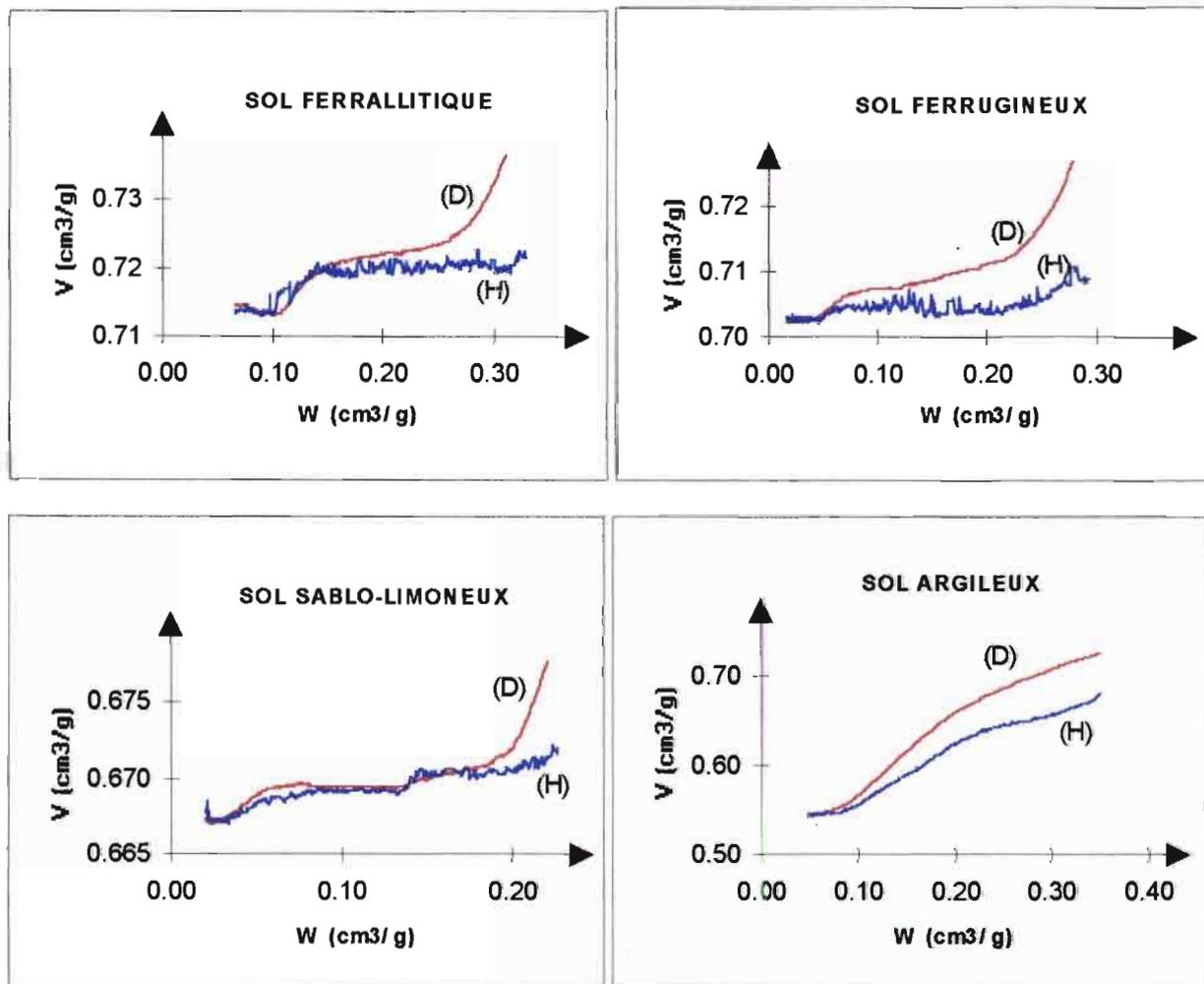


Fig. 3-I-1 : Courbes de retrait volumique expérimentales calculées d'après les mesures de la hauteur et du « diamètre de l'échantillon » pour les quatre types de sol étudiés.

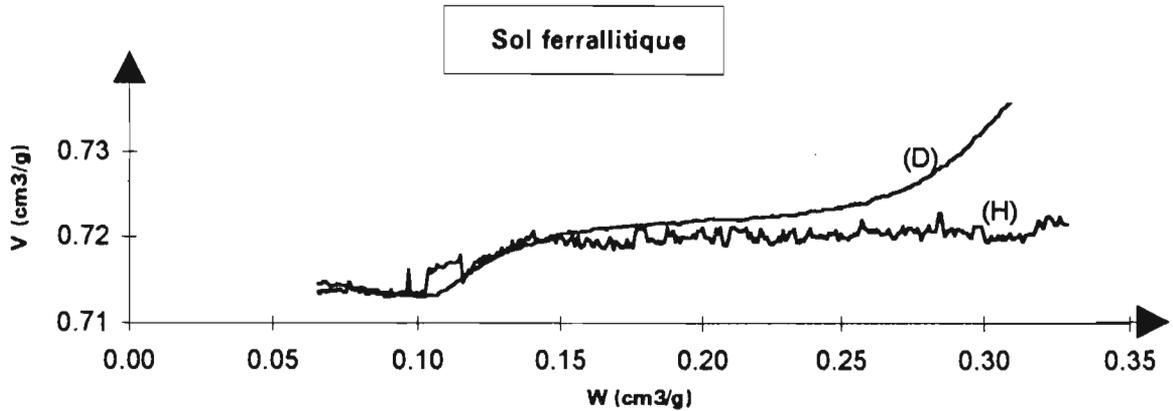


Fig. 3-I-2 : Le bruit du signal est plus important pour la courbe (H) que pour la courbe (D).

Nous constatons un bruit de fond plus important sur la mesure de la hauteur par rapport à celle du diamètre qui donne des résultats plus précis (*fig.3-I-1 et 3-I-2*). En effet, la mesure du retrait en hauteur présente un signal irrégulier qui proviendrait probablement de la sensibilité intrinsèque du « spot » laser aux perturbations et aux interférences environnantes (voir chapitre 1.2.1/ de la deuxième partie du mémoire).

C'est la raison pour laquelle on ne pourra utiliser les valeurs de ces deux mesures différentes dans une même formule pour calculer le volume de l'échantillon.

I.2/ Calcul de la courbe de retrait tenant compte de son anisotropie

Nous observons sur la *figure 3-I-1* un décalage plus ou moins marqué suivant les types de sol, entre la courbe de retrait calculée d'après la mesure de la hauteur et celle calculée d'après la mesure du diamètre. Ce décalage révèle bien un phénomène d'anisotropie du retrait, assez net pour les sols ferrugineux et argileux (type vertisols), et relativement faible voire inexistant pour les sols ferrallitiques et sablo-limoneux (1).

Nous avons vu que l'on pouvait tenir compte du phénomène d'anisotropie en mesurant simultanément le « diamètre » et la hauteur de l'échantillon, permettant ainsi de calculer le **coefficient d'isotropie (Cis)** du retrait qui servira à établir une nouvelle expression du volume de l'échantillon :

$$V = V_0 \cdot \left(\frac{D}{D_0} \right)^\beta$$

L'exposant β est calculé en fonction du coefficient d'isotropie (Cis)
(voir chapitre II.2.2.3/ de la deuxième partie).

Ces courbes sont comparées à celles calculées avec le volume de l'échantillon (en faisant l'hypothèse d'isotropie du retrait), d'après la mesure de son « diamètre », suivant l'expression suivante (*fig. 3-I-3(c) et 3-I-4(c)*) :

$$V = V_0 \cdot \left(\frac{D}{D_0} \right)^3$$

Les courbes représentées en *fig. 3-I-3 et 3-I-4* nous montrent, sur des échantillons de dimensions (53x30mm), pour les quatre types de sol étudiés :

- (a) : les courbes brutes des mesures de hauteur et « diamètre » en fonction du temps.
- (b) : les courbes représentant l'évolution du Cis « expérimental » et « modélisé », ainsi que celles représentant l'exposant β en fonction du temps.
- (c) : les courbes de retrait d'après le volume calculé en considérant le retrait comme isotrope : $V = V_0 \cdot (D/D_0)^3$, et en faisant intervenir un coefficient d'anisotropie Cis pour le calcul de β : $V = V_0 \cdot (D/D_0)^\beta$ en fonction du temps.

Remarque : (V_0 et D_0 sont respectivement le volume apparent et le « diamètre » de l'échantillon, mesurés en fin de retrait).

(1) : Il est à rappeler que ces observations sont faites à l'échelle d'échantillons prélevés, de sol reconstitué ou non remanié.

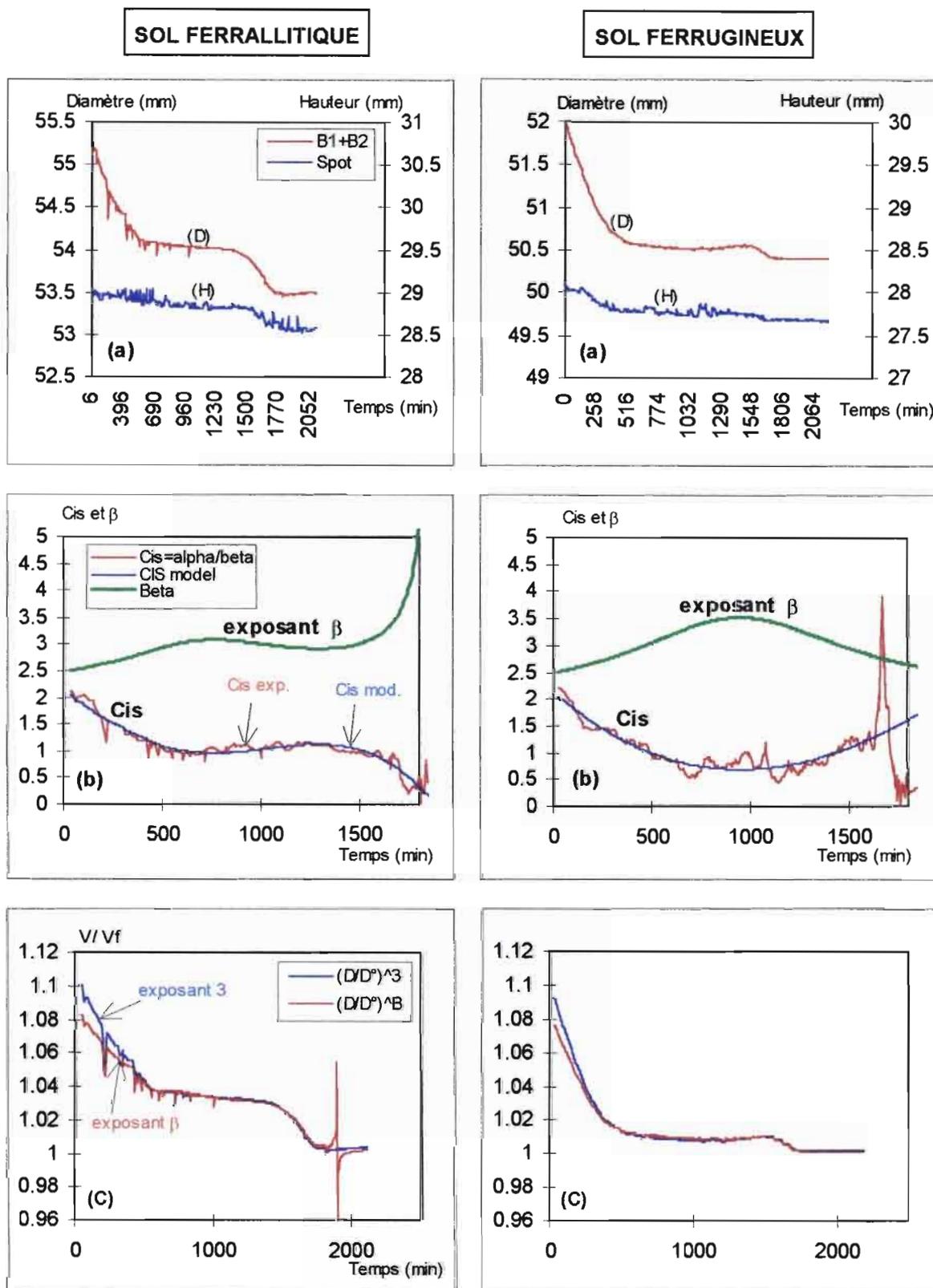


Fig. 3-I-3 : Exemples de courbes de retrait brutes en H et D (a), de l'évolution de β et Cis (b), et retrait calculé d'après D^3 et D^β (c), en fonction du temps pour FA et FU.

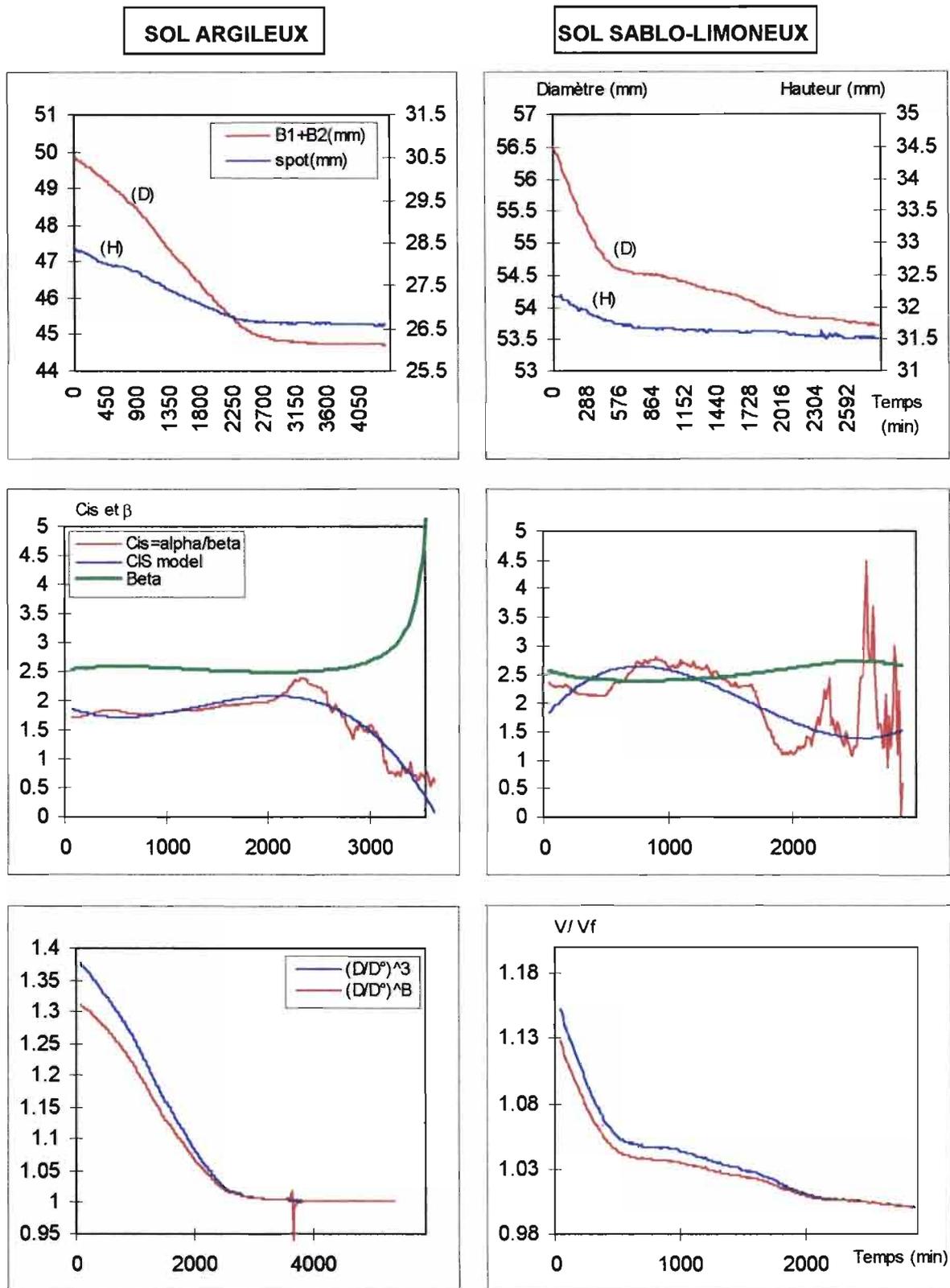


Fig. 3-I-4 : Exemples de courbes de retrait brutes en H et D (a), de l'évolution de β et Cis (b), et retrait calculé d'après D^3 et D^β (c), en fonction du temps pour AG et LM.

D'après ces figures 3-I-3(a) et 3-I-4(a), nous pouvons tout d'abord apprécier la qualité des courbes brutes et faire à nouveau le constat d'un signal (H) moins précis que le signal (D), surtout pour FA et FU. Dans certains cas, l'analyse de l'anisotropie du retrait durant sa première phase révèle un comportement du sol légèrement différent suivant que l'on calcule son retrait d'après la mesure du « diamètre » ou d'après celle de la hauteur de l'échantillon. Ce décalage pourrait venir d'un phénomène de *précontrainte* lié à la gravité de l'échantillon de sol saturé analysé :

Lorsqu'on humecte un échantillon de sol au delà d'une certaine teneur en eau, dans ce cas proche de la limite de liquidité, il ne gonfle pratiquement pas en hauteur à cause de l'effet de la gravité sous son propre poids et peut légèrement s'affaisser à sa base en fin de saturation (Fig. 3-I-5). En début de séchage, le retrait vertical de l'échantillon peut être très inférieur voire quasiment nul par rapport au retrait horizontal, d'où une anisotropie du retrait durant cette première phase. Ce phénomène est lié au manque de cohésion des grains de l'échantillon de sol saturé : par exemple, certains sols limoneux dont les agrégats sont de la taille des limons ont en effet une faible cohésion entre eux. Lors d'une saturation brutale, les ponts interagrégats éclatent sous la pression de gonflement et les grains du squelette se séparent. En début de retrait, ceux-ci se resserrent entre eux et une première phase de retrait très importante, caractéristique de ces types de sol, apparaît ; elle est plus pentue pour le retrait en diamètre que pour le retrait en hauteur (voir fig.3-I-2). L'anisotropie du retrait vient alors de cette réorganisation structurale.

Ce phénomène disparaît si la saturation est réalisée le plus doucement possible, en deçà de la limite de liquidité : en créant par exemple une dépression capillaire de 10 cm de colonne d'eau (10 mbar) en surélevant l'échantillon par rapport au niveau de l'eau (Delarivière, 1996).

En suivant l'évolution du coefficient « Cis » sur les courbes présentées en figures 3-I-3(b) et 3-I-4(b), nous pouvons également évaluer l'isotropie du retrait en fonction du temps. Il est possible ainsi de l'étudier durant chaque phase de retrait et d'en tirer des conséquences quant au modèle géométrique de la variation volumique de l'échantillon de sol et quant au comportement de sa structure, aussi bien au niveau macroporal que microporal.

Les figures 3-I-3(c) et 3-I-4(c) nous montrent que les courbes de retrait $V=V_0(H/H_0)^\beta$ sont confondues avec les courbes $V=V_0(D)^3$, en fonction du temps. Cela prouve que la mesure du retrait d'après les variations du « diamètre » de l'échantillon est représentative du retrait tridimensionnel calculé en tenant compte de l'anisotropie relative du retrait, et ce constat est valable pour les quatre types de sol étudiés.

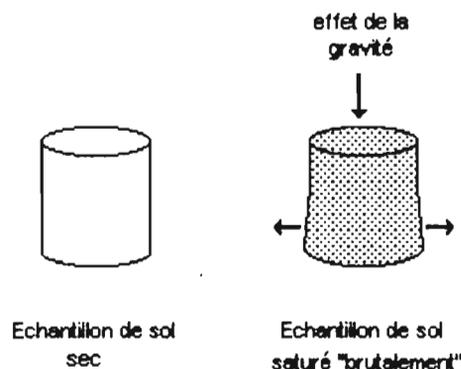


Fig. 3-I-5 : Effet de précontrainte d'un sol ferrallitique après saturation trop « brutale », la gravité imposant une contrainte verticale à l'échantillon.

I.3/ Courbes de retrait de sol de types différents

Les courbes de retrait expérimentales suivantes (*fig. 3-I-5*) sont celles d'échantillons de sol non remanié de même taille (53x30mm), de quatre types de sol différents (ferrallitique, ferrugineux, sablo-limoneux et argileux).

Suivant la texture et la structure du sol, l'allure de la courbe est différente : les sols qui semblent rigides (à faible taux d'argile, ou à argile peu gonflante) comme les sols tropicaux à kaolinite ont une courbe de retrait de forme sigmoïdale tout à fait nette (*fig. 1-III-7 et 2-II-12*) (Braudeau 1988, Bruand et al.1990, Boivin 1991, Mapangui 1992, Colleuille 1993). En effet, certains sols (ferrallitiques et ferrugineux par exemple) présentent en général une courbe d'allure sigmoïdale avec, dans certains cas, la présence d'une ou deux phases de retrait supplémentaires dans les fortes teneurs en eau (exemple *figure 2-II-13* : la phase F-G) ou au contraire dans les plus basses. Elles sont relativement faibles et négligées par la suite dans l'interprétation de la courbe de retrait qui vise surtout à différencier l'eau contenue dans le plasma argileux déformable de celle présente dans la porosité macroscopique inter-agrégat.

La courbe de retrait peut présenter d'autres formes qu'une allure sigmoïdale, cela dépend de la composition et de l'organisation texturale de l'échantillon : c'est le cas par exemple des sols argileux (vertisols) non remaniés dont la courbe de retrait a une forme pratiquement linéaire ou légèrement incurvée (*fig. 2-II-12*) qui peut présenter d'autres phases de retrait que celles classiquement reconnues. En effet, on peut remarquer sur cette courbe des phases de retrait supplémentaires pour les fortes teneurs en eau qui n'apparaissent pas sur les autres courbes. On a vu que ce phénomène serait probablement dû à l'évaporation de l'eau durant la phase de retrait des limons, liée au manque de cohésion entre les agrégats limoneux de cet échantillon de sol lors de sa réhumectation à une teneur en eau proche de la limite de liquidité.

Ce type de courbe qui prouverait l'existence de plusieurs organisations de la structure emboîtées les unes dans les autres est encore actuellement source d'investigations.

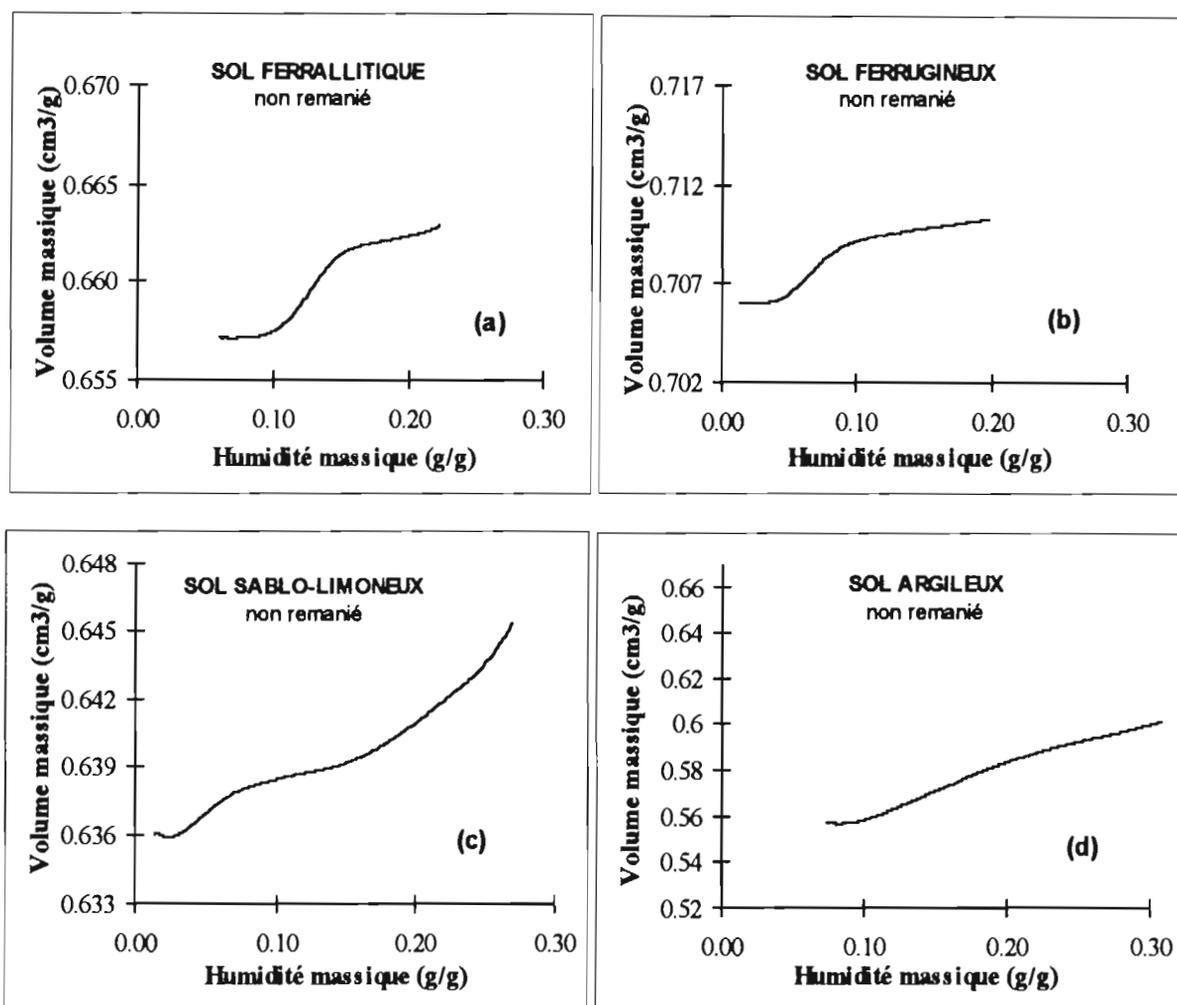


Fig. 3-I-5 : Exemples d'allures de courbes de retrait de quatre échantillons de sol non remaniés de types différents : (a) ferrallitique, (b) ferrugineux, (c) sablo-limoneux et (d) argileux

Remarque : Les courbes (a), (b) et (c) sont représentées à la même échelle.

II./ INFLUENCE DES CONDITIONS OPERATOIRES SUR LES POINTS CARACTERISTIQUES DE LA COURBE DE RETRAIT

II.1./ Choix du modèle approprié

Comme nous l'avons énoncé dans la première partie de ce mémoire, il existe au moins cinq types de modélisations paramétriques différentes de la courbe de retrait.

Nous allons comparer deux d'entre eux : Le « Modèle en droites » (MD) inspiré du modèle « **Three Straight Lines Model** » de Mc Garry et Malafant (1987), et le « Modèle exponentiel » du « **Modèle de Retrait Structural** » (MRS) de Braudeau (1988a et b), en les utilisant avec des données expérimentales sur les quatre types de sol étudiés : FA, FU, LM et AG.

Pour cela, une étude statistique des paramètres caractéristiques, donnés par les courbes de retrait calculées d'après les mesures de l'échantillon suivant un axe horizontale et suivant l'axe vertical, sera réalisée.

II.1.1/ Analyse statistique des données rétractométriques calculées d'après la mesure horizontale du retrait

L'analyse rétractométrique se fera sur des échantillons de sol reconstitué, de quatre textures différentes, de taille standard 53x30mm, et à raison de huit essais par échantillon. Le retrait est calculé d'après la mesure en continu du diamètre de l'échantillon tout au long de son dessèchement.

L'étude statistique portera sur les paramètres caractéristiques déterminants de la courbe de retrait suivant chacun des deux modèles MRS et MD.

II.1.1.1/ Analyse de variances

- Modèle de Retrait Structural (MRS) :

Nous avons vu, lors de la description du modèle mathématique de la courbe de retrait, que les paramètres utilisés pour la modélisation en cinq phases (Braudeau, 1988) sont les coordonnées des points de transition des phases de retrait :

$$V_{sat}, V_E, V_C, V_B, V_A, \text{ et } \theta_{sat}, \theta_E, \theta_C, \theta_B, \theta_A. \quad (\text{voir fig. 1-III-8, p.64})$$

- Les sept paramètres déterminants choisis pour caractériser la courbe de retrait sont les suivants :

$$w_A ; w_B ; w_C ; w_E ; V_A ; V_{sat} ; K_{no}$$

K_{no} étant la pente de la phase de retrait normale ou « basic » (Mitchel, 1992).

- Test de Fisher-Snedecor :

Nous allons analyser, deux par deux (une pour chaque modèle), les variances de chaque série de paramètres caractéristiques comparables, mesurés sur la courbe de retrait, pour les deux modèles étudiés.

Pour cela, le test de *Fisher-Snedecor* est tout à fait indiqué, à partir du moment où la distribution des résultats suit une loi de type Normale :

C'est la loi de probabilité de la quantité $F(v_1; v_2) = [(x_1^2/v_1) / (x_2^2/v_2)]$, dans laquelle x_1^2 et x_2^2 sont des variables indépendantes à v_1 et v_2 degrés de liberté, qui définissent une loi de Snedecor (Neuilly et CETAMA, 1993).

$$F_{\text{calculé.}} = \frac{(s_1)^2}{(s_2)^2}$$

s_1^2 et s_2^2 sont des estimations de variance

F étant la fonction discriminante du test.

A la probabilité P, $F_{\text{fisher}}(1) = F_{\left(\frac{1+P}{2}\right)}(v_1, v_2)$, et $F_{\text{fisher}}(2) = \frac{1}{F_{\left(\frac{1+P}{2}\right)}(v_2, v_1)}$

- Hypothèse de Fisher-Snedecor :

« *Il n'y a pas de différence significative entre les deux variances* »

Si $\frac{1}{F_{\left(\frac{1+P}{2}\right)}(v_2, v_1)} < F_{\text{calculé}} < F_{\left(\frac{1+P}{2}\right)}(v_1, v_2)$.

Si non la valeur la plus faible des deux correspondra à la mesure la plus reproductible.

- Exemple d'application pour la série de mesures de wA (MSR) comparée à w1 (MD) pour l'échantillon FA (53x30mm), dont le retrait a été calculé d'après la mesure de son diamètre pour P = 0.95 :

- $F_{\text{calc.}} = \frac{(1.30)^2}{(0.46)^2} = 7.99$ (s_1^2 pour wA et s_2^2 pour w1)
- $F_{\text{fisher}}(1) = 3.79$ (pour n = 8) (voir annexe 8)
- $F_{\text{fisher}}(2) = 0.26$ (pour n = 8)

Résultat : $F_{\text{calculé}}$ est supérieur à $F_{\text{fisher}}(1)$, cela signifie que l'hypothèse de Fisher-Snedecor n'est pas vérifiée (les deux variables sont significativement différentes, et le modèle MD donne des mesures plus reproductibles que le modèle MRS).

- Modèle en Droites (MD)

- ☛ Les 9 paramètres caractéristiques déterminants pour le « Modèle en Droite » (MD) choisis sont les suivants :

w1 ; w2 ; w3 ; V1 ; Vsat ; Kre ; Kno ; Kst ; Klm.

- Tableau des résultats pour P = 0.95 :

Stat.	Sol	wA (MRS)	w1 (MD)	wC (MRS)	w2 (MD)	wE (MRS)	w3 (MD)	VA (MRS)	V1 (MD)
moyenne	FA	0.0940	0.1126	0.1276	0.1321	0.1616	0.2727	0.7047	0.7075
variance 10 ⁻⁴	FA	1.30	0.46	0.79	0.69	0.75	1.50	0.43	0.44
Hypot.de Fisher	FA	non		oui		oui		oui	
moyenne	FU	0.0277	0.0446	0.0675	0.0698	0.0946	0.2381	0.6924	0.6945
variance 10 ⁻⁴	FU	0.91	0.47	0.50	0.27	0.89	0.18	0.20	0.12
Hypot.de Fisher	FU	oui		oui		non		oui	
moyenne	LM	0.0185	0.0344	0.0526	0.0561	0.0766	0.1865	0.6308	0.6327
variance 10 ⁻⁴	LM	0.18	0.78	0.32	0.50	2.20	1.10	1.70	1.80
Hypot.de Fisher	LM	non		oui		oui		oui	
moyenne	AG	0.0755	0.0971	0.1979	0.2125	0.2512	0.2920	0.5303	0.6288
variance 10 ⁻⁴	AG	0.50	0.95	4.50	0.99	0.53	10.00	2.10	4.70
Hypot.de Fisher	AG	oui		non		non		non	

Tab. 3-II-a : Tableau de comparaison des variances et moyennes calculées pour 8 mesures de quelques paramètres caractéristiques déterminants de la courbe de retrait, pour 4 types de sol, suivant les modèles MRS et MD.

*D'après la mesure horizontale (diamètre) du retrait de l'échantillon
(Quand l'hypothèse de Fisher-Snedecor est vérifiée, la réponse est « oui »).*

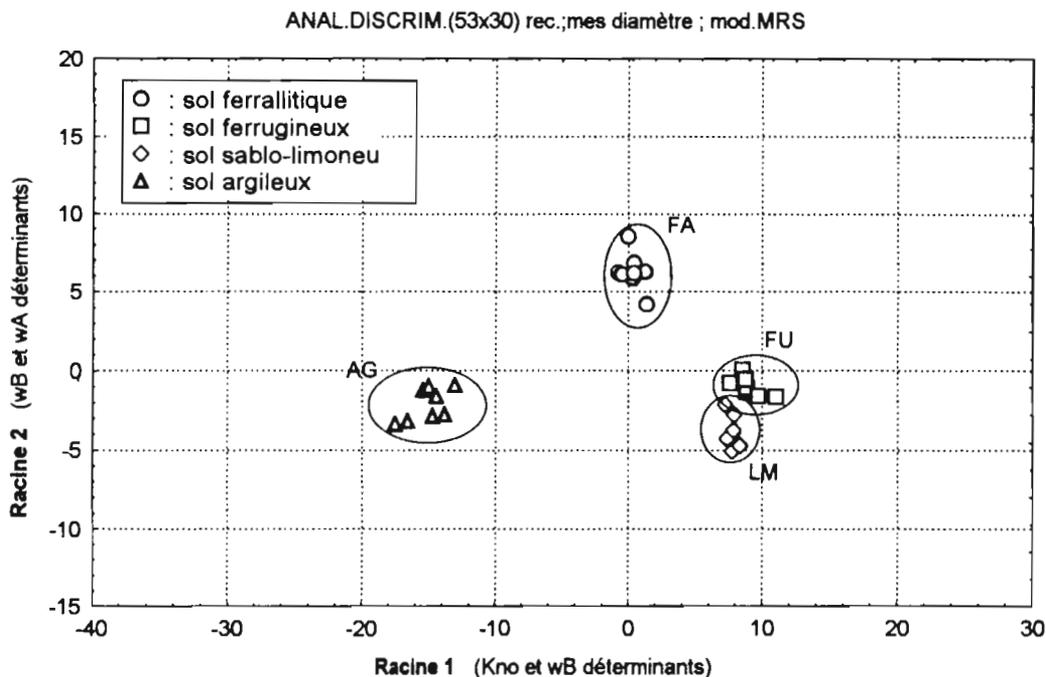
II.1.1.2/ Analyse du pouvoir discriminant des deux modèles par rapport à la texture du sol pour la mesure horizontale.

Cette analyse permettra dans un premier temps, de tester le pouvoir discriminant de la méthode de caractérisation hydro-structurale par rétractométrie en fonction de la texture des échantillons de sol.

Dans un deuxième temps, elle donnera une indication supplémentaire sur la reproductibilité des deux modèles.

Les descripteurs utilisés sont les mêmes paramètres caractéristiques de la courbe de retrait que ceux cités précédemment pour chacun des deux modèles (sauf Klm de AG).

- Modèle de Retrait Structural (MRS) :



- Modèle en droites (MD) :

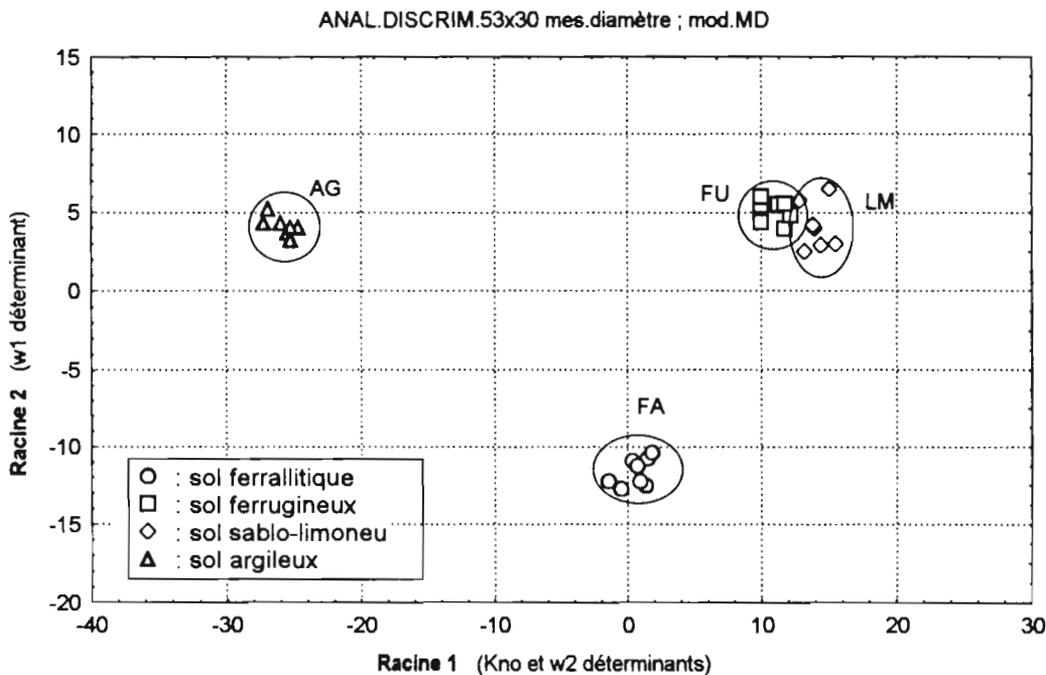


Fig. 3-II-1 : Analyse discriminante des paramètres du Modèle deRetrait Structural (MRS), et du modèle en droites (MD) en fonction de la texture du sol, pour des calculs de volume d'après la mesure du diamètre de l'échantillon.

II.1.2/ Analyse statistique des données rétractométriques calculées d'après la mesure verticale du retrait

Le retrait est calculé d'après la mesure en continu de la hauteur de l'échantillon tout au long de son dessèchement.

Les paramètres de la courbe de retrait, calculés suivant les modèles (MRS) et (MD), sont les mêmes que ceux calculés précédemment, d'après la mesure horizontale du retrait.

II.1.2.1/ Analyse des variances.

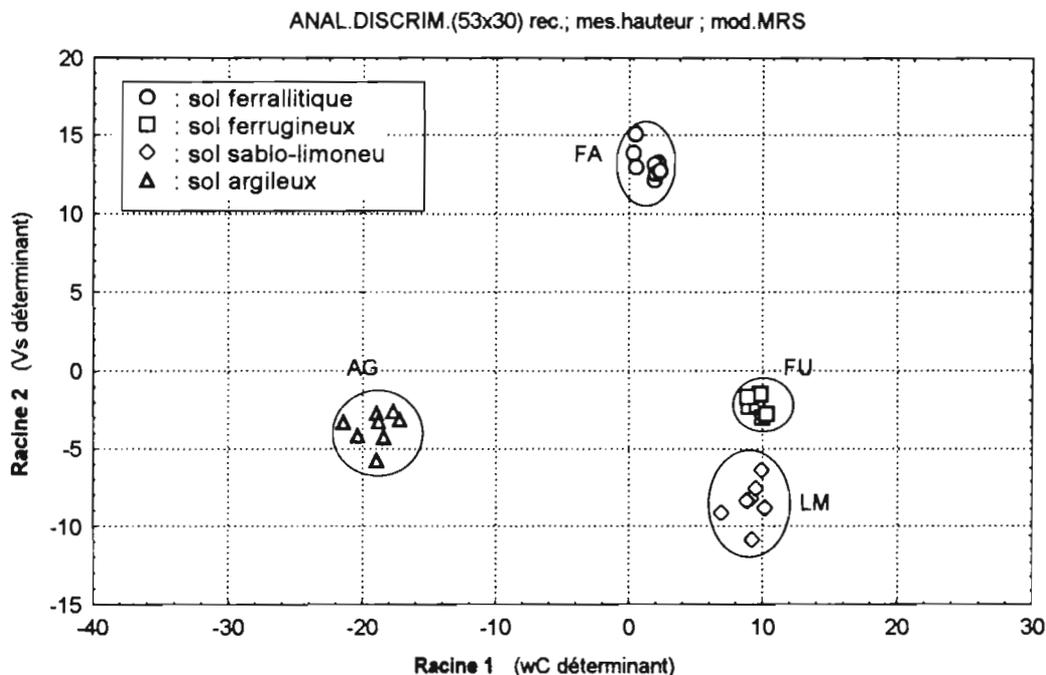
- Tableau des résultats pour P = 0.95 :

Stat.	Sol	wA (MRS)	w1 (MD)	wC (MRS)	w2 (MD)	wE (MRS)	w3 (MD)	VA (MRS)	V1 (MD)
moyenne	FA	0.0926	0.1072	0.1334	0.1367	0.1662	0.0234	0.7055	0.7062
variance 10 ⁻⁴	FA	1.30	0.83	1.10	1.04	1.40	2.40	0.58	0.60
Hypot.de Fisher	FA	oui		oui		oui		oui	
moyenne	FU	0.0347	0.0500	0.0709	0.0705	0.1183	0.0266	0.6917	0.6919
variance 10 ⁻⁴	FU	2.70	2.30	0.53	0.89	3.60	3.00	0.15	0.14
Hypot.de Fisher	FU	oui		oui		oui		oui	
moyenne	LM	0.116	0.0196	0.0303	0.0340	0.0557	0.0614	0.6361	0.6363
variance 10 ⁻⁴	LM	0.28	0.32	1.80	1.60	2.60	2.00	0.75	0.75
Hypot.de Fisher	LM	oui		oui		oui		oui	
moyenne	AG	0.0819 ^a	0.0960	0.2006	0.2243	0.2556	0.1673	0.5419	0.5435
variance 10 ⁻⁴	AG	0.69	0.49	0.57	0.13	0.57	20.00	3.10	3.10
Hypot.de Fisher	AG	oui		non		non		oui	

Tab. 3-II-b : Tableau de comparaison des variances et moyennes calculées pour 8 mesures de quelques paramètres caractéristiques déterminants de la courbe de retrait, pour 4 types de sol, suivant les modèles MRS et MD.
D'après la mesure verticale (hauteur) du retrait de l'échantillon.
(Quand l'hypothèse de Fisher-Snedecor est vérifiée, la réponse est « oui »).

II.1.2.2/. Analyse du pouvoir discriminant des deux modèles par rapport à la texture du sol.

• **Modèle de Retrait Structural (MRS) :**



• **Modèle en droites (MD) :**

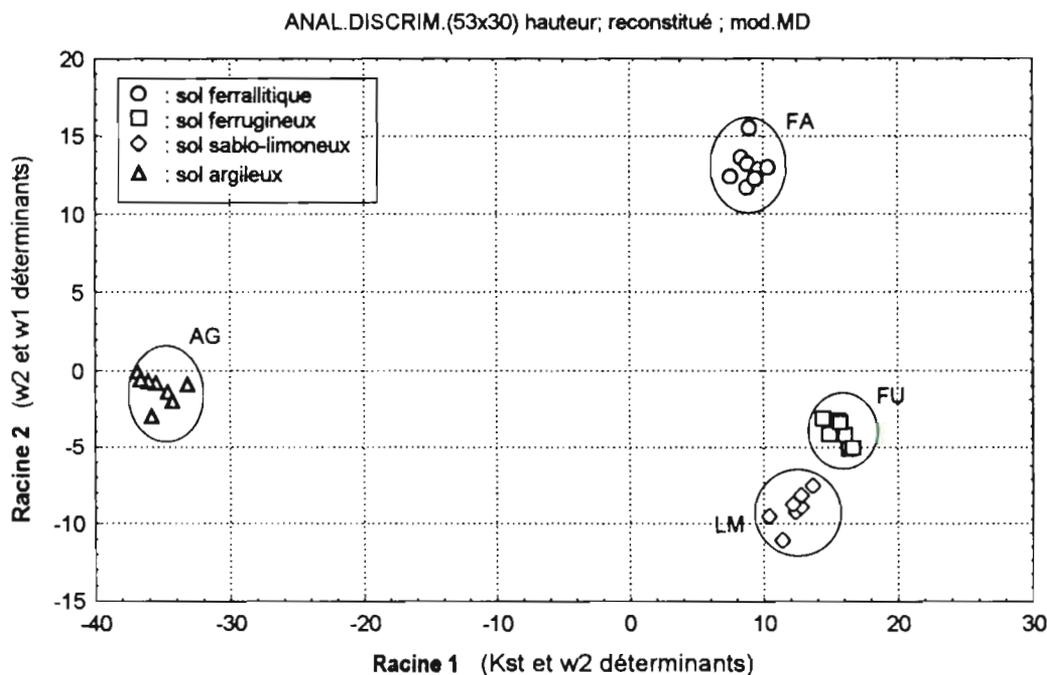


Fig. 3-II-2 : Analyse discriminante des paramètres du Modèle de Retrait Structural (MRS), et du modèle en droites (MD) en fonction de la texture du sol, pour des calculs de volume d'après la mesure de la hauteur de l'échantillon.

II.1.2.3/ Résultats

La plupart des variances des paramètres caractéristiques ne sont pas significativement différentes du modèle MRS à MD.

Mise à part la mesure de w_3 qui n'a pas de paramètre proche équivalent au modèle MRS, dans les quelques cas où les variances sont significativement différentes, le modèle MD s'avère donner des résultats de mesures plus reproductibles que le modèle MRS ; et ce, aussi bien pour les mesures en fonction du diamètre que pour celles en fonction de la hauteur.

D'après les analyses discriminantes, les deux modèles comparés reconnaissent très bien les différents types de sol par rapport à leur comportement au retrait.

Dans le cas où la courbe de retrait est une sigmoïde « typique » (1), les points caractéristiques estimés sont invariants, quand on reproduit l'optimisation du même ajustement plusieurs fois. C'est le cas pour les échantillons FU et LM qui ont un comportement au retrait assez proche l'un de l'autre, quel que soit le modèle utilisé. Cela est dû à la teneur en sable relativement importante des échantillons ferrugineux FU, dont la texture se rapproche en fait de celle des échantillons sablo-limoneux LM. La même remarque sur le comportement au retrait est faite pour les échantillons de sol ferrallitique.

Par contre, pour les échantillons argileux AG, on remarque un étalement des points caractéristiques légèrement plus important pour le modèle MRS que pour le modèle MD. Il s'agit, entre autre, d'un problème de non unicité de la solution des points optimaux estimés lors de l'optimisation des courbes de retrait d'allure « atypique » (ce phénomène intervient fréquemment lorsque les modèles comportent un trop grand nombre de paramètres). En voici une explication succincte :

Le modèle mathématique (MRS) est ajusté à la courbe de retrait expérimentale par estimation en utilisant la méthode d'optimisation du simplexe (voir chapitre II.2.2.1 de la deuxième partie). Le résultat de cet ajustement permet de placer les points caractéristiques déterminants sur la courbe expérimentale, et dans ce cas, la position des points sélectionnés dépend beaucoup de son allure. En effet, si la courbe de retrait possède une allure très différente de la sigmoïde classique, il est très difficile d'y placer de façon précise les points de départ du simplexe initial (points d'intersection de la courbe de retrait avec ses tangentes).

Cette précision dépend en fait de l'appréciation et du « coup d'oeil » de l'opérateur. Même si l'on obtient une courbe de retrait simulée voisine de la courbe expérimentale, il est possible de trouver des points caractéristiques différents à chaque fois que l'on répètera la même opération sur la même courbe. Ce problème de non unicité de la solution pour les courbes de retrait d'allure « atypique » serait alors d'autant plus important que la même optimisation de la même courbe serait réalisée plusieurs fois par des opérateurs différents.

Le modèle mathématique en droites (MD) d'expression mathématique plus simple, est quant à lui plus facile d'utilisation. Il est basé sur le calcul par régressions linéaires (suivant la méthode des moindres carrés) des pentes des tangentes à la courbe de retrait, et s'adapte ainsi très bien aux courbes d'allure atypique.

(1) : Le modèle conceptuel de base du retrait a été initialement conçu d'après un schéma du retrait caractéristique des sols ferrallitiques du Congo (Braudeau, 1987); c'est à dire sur des courbes de retrait d'allure sigmoïdale typique de ces sols. On différenciera alors les courbes d'allure « typique » correspondant au modèle de base, des courbes d'allure « atypique », qui doivent alors être modélisées mathématiquement d'une façon différente (MD).

Il peut donc se traiter graphiquement en donnant des mesures de paramètres caractéristiques plus reproductibles que celles obtenues par le modèle MRS, surtout en début de retrait. De plus, ce dernier prend en compte toutes les phases de retrait possibles de la courbe, ce qui n'est pas le cas du modèle MRS.

Il est cependant tout à fait possible de retrouver par calcul les points caractéristiques du modèle MRS à partir de la courbe de retrait modélisée suivant le modèle MD (Braudeau et al., 1996). Les deux modèles sont liés puisqu'ils ont le même nombre de paramètres pour décrire une phase de retrait.

Pour ces différentes raisons, nous choisirons d'adopter à l'avenir, pour toutes les expériences de modélisation mathématique de la courbe de retrait et pour le calcul de ses paramètres caractéristiques des propriétés hydro-structurales du sol, le modèle en droites MD.

Le modèle fonctionnel de la structure du sol d'après MRS n'est donc pas remis en cause; c'est la méthode d'ajustement du modèle MRS par estimation en utilisant la méthode du simplex, conçue d'après un schéma du retrait caractéristique des sols ferrallitiques, qui n'est pas adaptée à l'étude des courbes de retrait d'allure atypique.

I.1.4/ Conclusion

En tenant compte du phénomène d'anisotropie du retrait (plus ou moins marqué suivant la texture des échantillons de sol reconstitués et moulés) dans le calcul du volume corrigé ($V = V_0 (D/D_0)^\beta$), et en appliquant un modèle mathématique basé sur un traitement graphique simple de la courbe de retrait, une nouvelle méthode de traitement des courbes brutes est ainsi proposée (Braudeau et al. 1996).

Toutefois, ces analyses ont été exécutées sur des échantillons standards de sol reconstitués, de tailles identiques (53x30mm) ; l'influence de la taille et de la structure de tels échantillons peut avoir un effet non négligeable sur le retrait. Les manipulations ultérieures feront l'objet d'une étude visant à le prouver.

II.2/ Etude de l'influence de la taille de l'échantillon

II.2.1/ Analyse des courbes expérimentales

Nous avons choisi d'étudier l'effet de variation de la taille des échantillons de sol reconstitués sur leur retrait, pour les quatre types de textures étudiées précédemment.

Quelle que soit leur hauteur, les échantillons seront reconstitués à des masses volumiques apparentes ($M.V.app.$) identiques à celles des mottes naturelles du même prélèvement, selon la technique exposée au chapitre II.1/ de la deuxième partie de ce mémoire.

Les hauteurs choisies sont : 30, 40, et 50mm pour un même diamètre standard de 53mm. L'analyse rétractométrique sera réalisée de la même façon que pour l'étude des courbes brutes, en mesurant le retrait volumique de l'échantillon d'après son diamètre, et en utilisant le modèle en droites (MD) (voir *fig.3-II-3*).

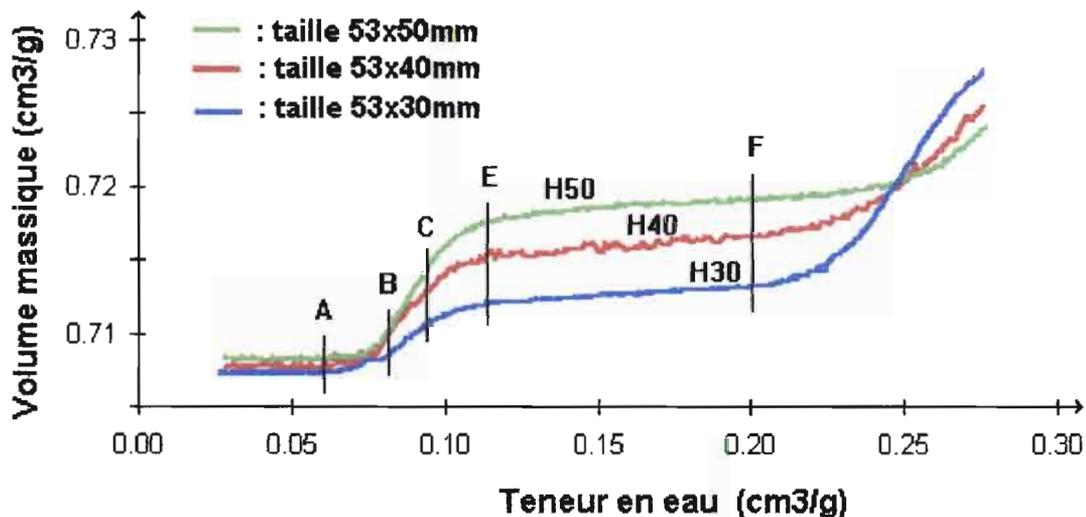


Fig.3-II-3 : Effet de la taille de l'échantillon reconstitué sur son comportement au retrait.

II.2.2/ Etude statistique

Elle est réalisée suivant l'analyse de variances des mesures des paramètres caractéristiques déterminants du comportement hydro-structural du sol (suivant le test de Hartley dont les conditions d'application sont données ci-dessous), et suivant une analyse discriminante des échantillons, sur les mêmes points caractéristiques, et suivant leur hauteur et texture, elle même liée à la teneur en argile gonflant du sol.

Cette étude fournira des indications précises sur la reproductibilité des mesures de paramètres caractéristiques déterminants de la courbe de retrait, selon la hauteur de l'échantillon et la texture du sol reconstitué. Elle permettra ainsi de différencier et comprendre le comportement du retrait dans de telles conditions de manipulation, et savoir quels sont les paramètres déterminants qui influent prioritairement sur ce comportement.

II.2.2.1/ Analyse des variances :

- Test de Hartley :

Le nombre de variances analysées étant cette fois-ci de 3 par texture, tous les nombres de degrés de liberté égaux entre eux, et la distribution suivant la Loi Normale, un test de *Hartley* est justifié (Neuilly et CETAMA, 1993).

A la probabilité P, on calcule :

$$\Gamma_{\text{calculé}} = \frac{(S^2_{\text{maximum}})}{(S^2_{\text{minimum}})}$$

puis on compare $\Gamma_{\text{calculé}}$ avec Γ_{Hartley} , en fonction de la probabilité choisie ($P = 0.95$), du nombre d'échantillons mesurés ($n = 7$), et du nombre de degrés de liberté ($\nu = 6$) associé à chaque échantillon.

Dans le cas présent, $\Gamma_{\text{Hartley}} = 15$ (voir table de Hartley en annexe 8)

➤ Hypothèse de Hartley :

- Si $\Gamma_{\text{calculé}} < \Gamma_{\text{Hartley}}$, alors on peut estimer que les variances ne sont pas significativement différentes ; dans le cas contraire, la variance la plus faible correspondra à la mesure la plus reproductible.

- Tableau des variances (var.) et des moyennes (moy.) pour 7 répétitions par échantillon pour P = 0.95 :

dimension (mm) et stat.	sol	w1 (10⁻⁴)	w2 (10⁻⁴)	w3 (10⁻⁴)	V1 (10⁻⁴)	Vs (10⁻⁴)	Kre (10⁻⁴)	Kno (10⁻⁴)	Kst (10⁻⁴)	Klm (10⁻⁴)
(53x30) var.	FA	0.46	0.69	1.50	0.44	0.40	3.00	13.00	3.00	19.00
(53x30)moy.	FA	0.1126	0.1321	0.2727	0.7075	0.7171	0.0179	0.6189	0.0257	0.3338
(53x40) var.	FA	2.40	6.0	17.20	0.98	12.10	0.70	0.50	5.70	32.40
(53x40)moy.	FA	0.1031	0.1602	0.2836	0.6977	0.7293	0.0088	0.6830	0.0424	0.7451
(53x50) var.	FA	0.02	0.08	0.27	0.29	0.23	2.74	6.71	0.33	51.84
(53x50)moy.	FA	0.1117	0.1287	0.2596	0.6971	0.7070	0.0116	0.7415	0.0162	0.3085
Hyp.Hartley	FA	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	non
(53x30) var.	FU	0.47	0.27	0.18	0.12	0.25	10.00	4.00	1.80	0.01
(53x30)moy.	FU	0.0446	0.0698	0.2381	0.6945	0.7007	0.0383	0.3516	0.0240	0.0366
(53x40) var.	FU	0.14	0.65	0.16	0.89	0.81	0.70	0.58	0.19	0.16
(53x40)moy.	FU	0.0398	0.0659	0.2121	0.6885	0.6904	0.0106	0.2519	0.0044	0.0248
(53x50) var.	FU	0.16	0.07	3.10	0.91	1.10	0.48	1.89	2.61	44.11
(53x50)moy.	FU	0.0439	0.0536	0.2079	0.6995	0.7071	0.0041	0.3867	0.0177	0.1139
Hyp.Hartley	FU	non	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui
(53x30) var.	LM	0.78	0.50	11.00	1.80	1.90	20.00	3.00	0.91	85.00
(53x30)moy.	LM	0.0344	0.0561	0.1865	0.6327	0.6376	0.0463	0.3419	0.0189	0.3708
(53x40) var.	LM	0.33	1.18	0.54	0.29	0.27	9.00	6.11	0.50	24.00
(53x40)moy.	LM	0.0319	0.0867	0.2016	0.6633	0.6681	0.0338	0.3235	0.0154	0.4891
(53x50) var.	LM	0.41	0.68	1.67	0.33	1.29	18.00	12.90	5.30	11.00
(53x50)moy.	LM	0.0322	0.0467	0.1874	0.6417	0.6498	0.0380	0.3698	0.0230	0.4756
Hyp.Hartley	LM	non	non	oui	oui	oui	non	non	oui	oui
(53x30) var.	AG	0.95	0.99	10.00	4.70	29.00	46.00	10.00	48.00	120.00
(53x30)moy.	AG	0.0979	0.2125	0.2920	0.6288	0.6851	0.3508	0.9873	0.5849	0.5058
(53x40) var.	AG	0.88	2.55		9.60	16.10	40.00	73.60	62.30	
(53x40)moy.	AG	0.0906	0.2130		0.6290	0.7224	0.4285	1.2081	0.6501	
(53x50) var.	AG	2.96	5.34	8.06	0.22	4.04	13.47	72.53	5.16	34.72
(53x50)moy.	AG	0.1106	0.2128	0.3264	0.5691	0.7693	0.5049	1.0246	0.4893	0.6135
Hyp.Hartley	AG	non	oui	non	oui	oui	non	oui	oui	non

Tab. 3-II-c : Variances et moyennes calculées pour 7 mesures de chaque paramètre caractéristique déterminant de la courbe de retrait suivant le modèle MD, en fonction de la hauteur de l'échantillon, pour 4 types de textures différentes.

(Quand l'hypothèse de Hartley est vérifiée, la réponse est « oui »).

II.2.2.2/ Analyse discriminante en fonction de la hauteur de l'échantillon :

Elle portera sur les points caractéristiques de la courbe de retrait suivant le modèle en droites (MD), selon la texture des échantillons de sol reconstitué, en fonction de leur hauteur.

Les paramètres prioritairement déterminants dans la discrimination des groupes d'échantillons sont précisés sur les axes des graphiques (voir fig.3-II-4).

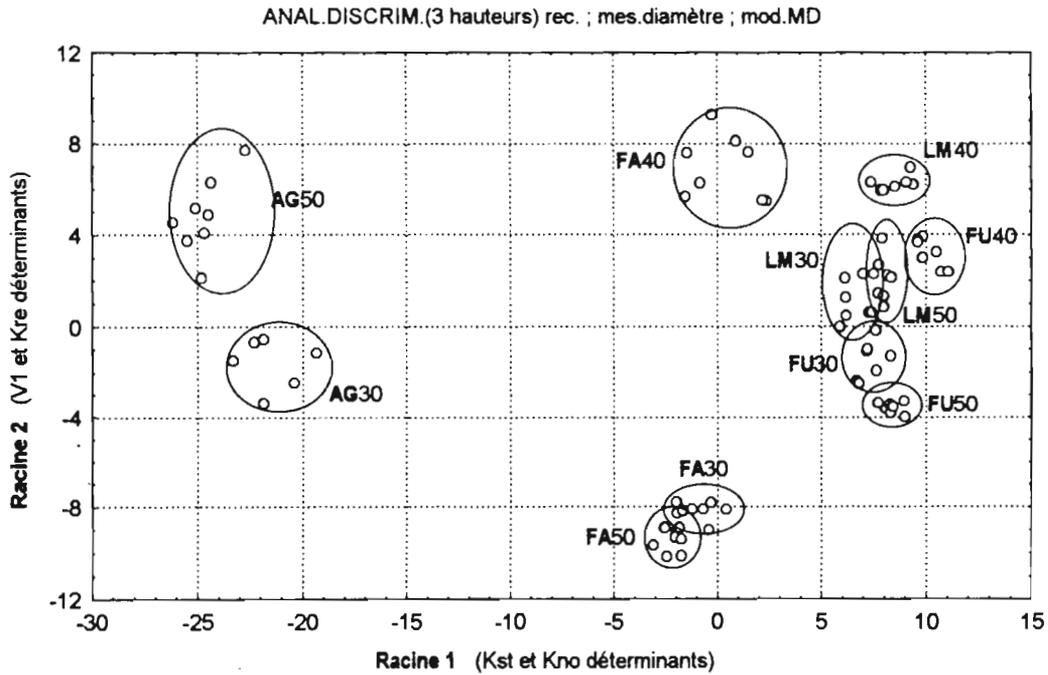


Fig. 3-II-4 : Analyse discriminante des paramètres caractéristiques de la courbe de retrait suivant le modèle MD, en fonction de la hauteur de l'échantillon et pour quatre types de textures différentes.

II.2.2.3/ Résultats :

D'après l'analyse des variances, il semble que la mesure des paramètres caractéristiques au fonctionnement hydro-structural du sol, par l'intermédiaire de la courbe de retrait, est en général plus reproductible sur les échantillons de taille (53x50mm).

Ce constat est très net pour les échantillons FA et AG, en ce qui concerne la mesure des pentes des différentes phases de retrait.

Par contre, pour les teneurs en eau, tout au long du retrait, la plupart des variances ne sont pas significativement différentes ; cela prouve que celles-ci ne varient pas beaucoup (en %), en fonction de la hauteur de l'échantillon.

Les pentes des phases de retrait structural et normal sont déterminantes pour différencier le comportement du retrait par le type de texture du sol reconstitué ; particulièrement pour les échantillons FA et AG. La discrimination est moins nette pour les échantillons FU et LM.

Le volume en limite de retrait (V_1) sépare entre autres les échantillons de hauteur 40mm de ceux de hauteurs 30 et 50mm. Ce paramètre est directement lié à la masse volumique apparente de l'échantillon. Cela veut dire qu'en début de retrait et jusqu'au point d'entrée d'air dans la micro-porosité, les sols se distinguent les uns des autres par leur texture: FA, AG et FU/LM (leur teneur en argile).

II.2.3/ Conclusion

La hauteur de l'échantillon de sol reconstitué a un effet non négligeable sur son comportement au retrait. En effet, l'effet « taille » est différent suivant la texture du sol, et plus particulièrement suivant la teneur en argile de l'échantillon.

L'effet « taille » sur le comportement hydro-structural de l'échantillon de sol au retrait varie en fonction de la texture du sol (selon sa teneur en argile). Il est important sur la variation de volume en début de retrait jusqu'au point d'entrée d'air (d'après les pentes de la phase de retrait normal de la courbe), mais en fin de retrait, la taille n'a plus aucun effet sur le comportement du sol au retrait. Cet effet n'a aucune influence sur les teneurs en eau aux points caractéristiques de la courbe de retrait, ceux-ci étant bien superposés sur la *figure 3-II-3*.

II 3/ Effet de la structure sur le retrait

II.3.1/ Manipulation

Nous tâcherons cette fois-ci d'étudier l'effet de la structure d'un échantillon de sol, qu'elle soit naturelle non remaniée ou reconstituée (suivant la technique décrite au chapitre II.1.3.2/ de la deuxième partie de ce mémoire).

L'analyse se fera ainsi sur des échantillons de deux types de structure différents, de taille standard (53x50mm), à raison de huit répétitions par type de structure (reconstituée ou non remaniée) et texture (FA, FU, LM et AG) du sol.

La figure 3-II-5 suivante nous présente une analyse comparative entre des courbes de retrait d'échantillons de sol non remaniés et des courbes des mêmes sols reconstitués à la même masse volumique apparente, à raison d'un exemple par type de sol étudié.

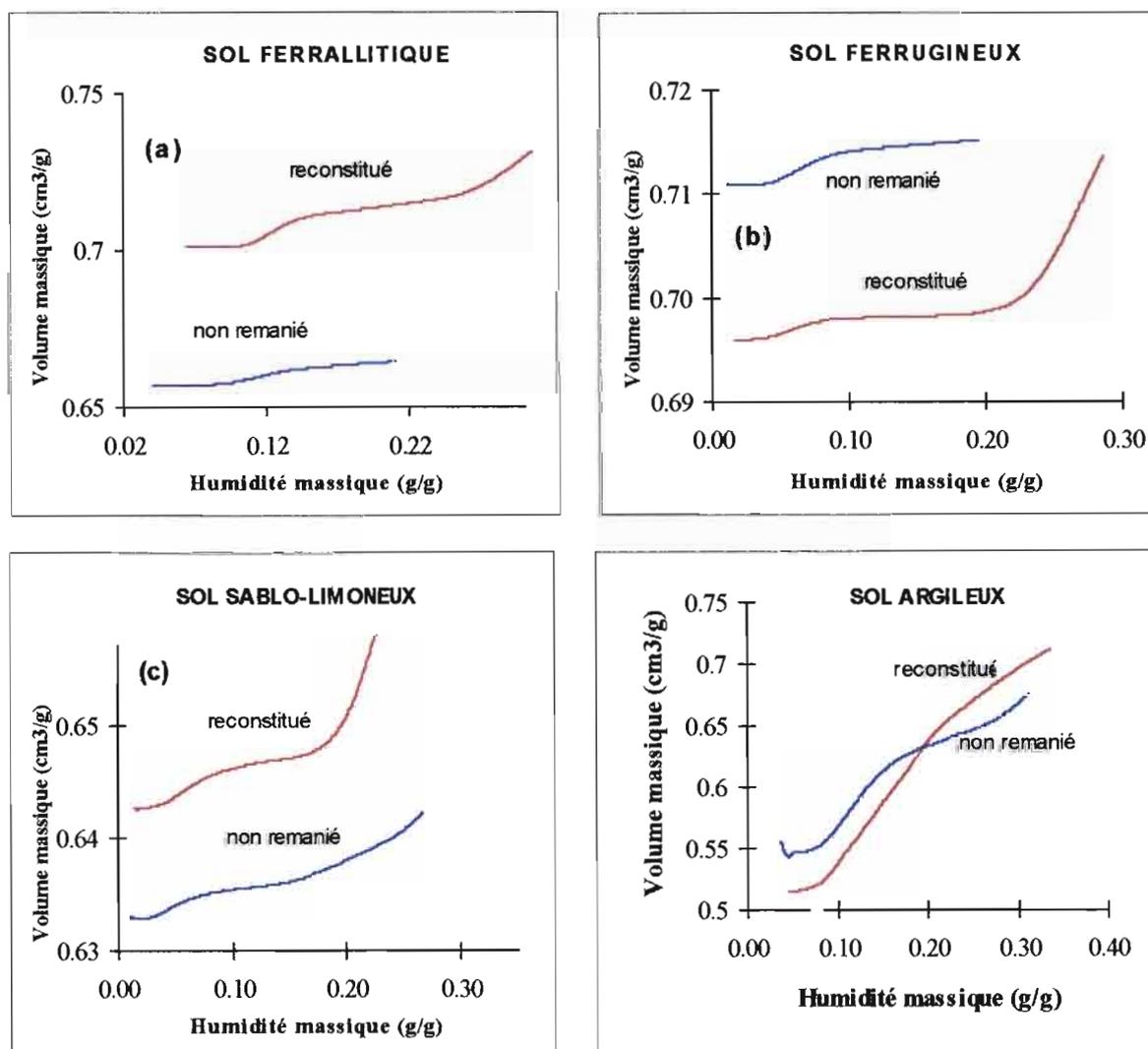


Fig. 3-II-5 : Courbes de retrait d'échantillons de sol non remanié comparées à celles d'échantillons du même sol reconstitué, pour les quatre types de sol étudiés.

II.3.2/ Etude statistique

Elle est identique à celle réalisée dans le paragraphe I.3/ pour l'étude du choix du modèle approprié.; c'est à dire un test de Fisher pour comparer, deux à deux, les séries de variances liées à la mesure des paramètres caractéristiques de la courbe de retrait, concernant les deux types de structure étudiées. Les conditions de départ de l'analyse statistique sont les mêmes que celles du précédent test de Fisher :

II.3.2.1/ Analyse des moyennes et variances :

- Tableau des résultats :

	sol.	w1 (10 ⁻⁴)	w2 (10 ⁻⁴)	w3 (10 ⁻⁴)	V1 (10 ⁻⁴)	Vs (10 ⁻⁴)	Kre (10 ⁻⁴)	Kno (10 ⁻⁴)	Kst (10 ⁻⁴)	Klm (10 ⁻⁴)
MOYENNE n.rem	FA	0.127	0.134	0.193	0.662	0.663	0.007	0.466	0.005	0.003
MOYENNE rec.	FA	0.112	0.129	0.260	0.697	0.707	0.012	0.741	0.016	0.309
VARIANCE n.rem	FA	0.39	0.38	9.50	0.03	0.03	0.38	34.10	0.45	1.20
VARIANCE rec.	FA	0.02	0.08	0.27	0.29	0.23	3.00	7.00	0.33	52.00
Hypo.Fisher	FA	non	non	non	non	non	non	non	oui	non
MOYENNE n.rem	FU	0.056	0.064	0.165	0.711	0.713	0.016	0.306	0.008	0.028
MOYENNE rec.	FU	0.044	0.054	0.208	0.699	0.707	0.004	0.387	0.018	0.114
VARIANCE n.rem	FU	0.38	0.47	24.00	0.01	0.01	2.00	3.20	0.50	2.00
VARIANCE rec.	FU	0.16	0.07	3.10	0.91	1.10	0.05	1.90	2.60	44.00
Hypo.Fisher	FU	non	non	non	non	non	non	oui	non	non
MOYENNE n.rem	LM	0.044	0.051	0.204	0.640	0.645	0.014	0.318	0.027	0.401
MOYENNE rec.	LM	0.032	0.047	0.187	0.642	0.650	0.038	0.370	0.023	0.475
VARIANCE n.rem	LM	0.23	0.18	0.30	0.02	0.01	1.00	3.20	1.00	7.00
VARIANCE rec.	LM	0.41	0.67	1.70	0.33	1.30	20.00	13.00	5.30	11.00
Hypo.Fisher	LM	oui	non	non	non	non	non	non	non	oui
MOYENNE n.rem	AG	0.092	0.158	0.346	0.573	0.692	0.245	1.116	0.330	0.742
MOYENNE rec.	AG	0.111	0.213	0.326	0.569	0.769	0.505	1.025	0.489	0.613
VARIANCE n.rem	AG	1.10	3.10	43.00	0.61	33.00	8.20	45.00	50.00	9.70
VARIANCE rec.	AG	3.00	5.30	8.10	0.22	4.00	10.00	73.00	5.20	35.00
Hypo.Fisher	AG	non	oui	non	non	oui	non	oui	non	non

Tab. 3-II-d : Moyennes et variances calculées pour 7 mesures par paramètre, pour deux types de structures : n.rem. (non remaniée) et rec. (reconstituée).

II.3.2.2/ Analyse discriminante en fonction de la structure de l'échantillon :

C'est l'analyse du comportement physique des deux types d'échantillons de sol par l'analyse statistique discriminante des points caractéristiques de la courbe de retrait, sur des échantillons de sol reconstitué, en fonction de leur type de structure. Et ceci pour les quatre types de sol de texture différente étudiés (fig.3-II-6).

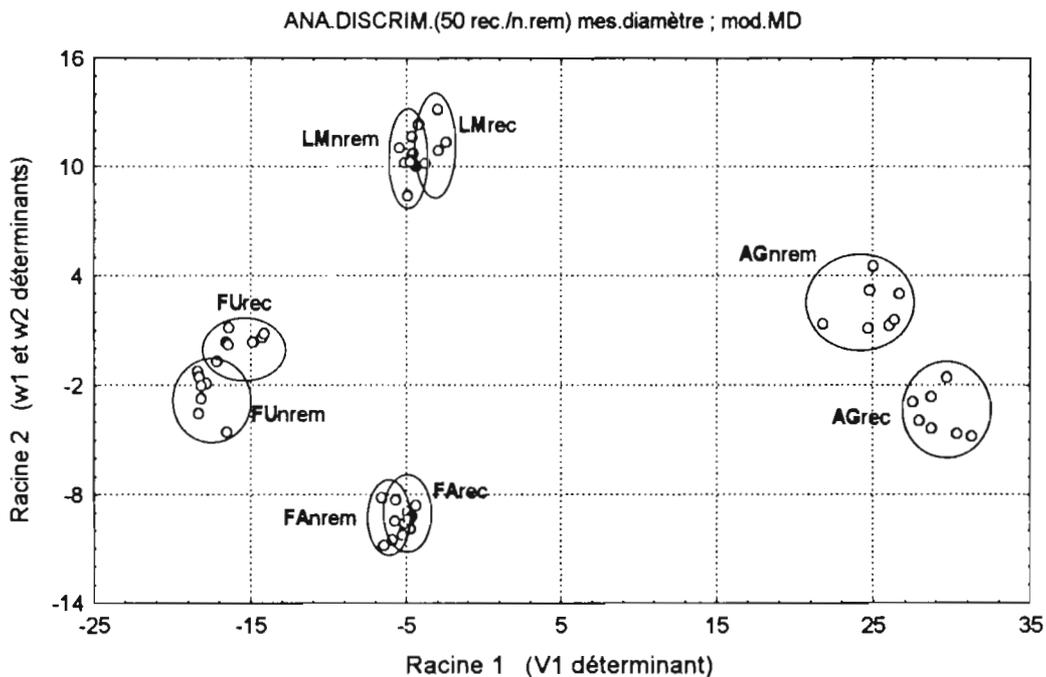


Fig. 3-II-6 : Analyse discriminante des paramètres de la courbe de retrait suivant le modèle MD, en fonction du type de structure de l'échantillon, pour quatre textures de sol différentes.

Remarque : Cette analyse ne tient pas compte de la pente Klm de la phase de « retrait des limons ».

II.3.2.3/ Résultats :

D'après l'analyse des variances (tableau 3-II-d), l'hypothèse de Fisher-Snedecor n'est dans la grande majorité des cas pas vérifiée ; c'est à dire que les variances des mesures des points caractéristiques de la courbe de retrait sur des échantillons de deux types de structures (reconstituée et non remaniée) sont significativement différentes.

La mesure des teneurs en eau des échantillons de sol reconstitué est plus reproductible que celle des échantillons non remaniés. Par contre, la mesure des pentes des différentes phases est plus reproductible pour les échantillons non remaniés.

D'après l'analyse discriminante (*Figure 3-II-6*), ni les teneurs en eau (suivant l'axe des ordonnées), ni le volume à la limite de retrait et les pentes des phases de retrait (suivant l'axe des abscisses) ne peuvent différencier le comportement au retrait d'un sol reconstitué d'un même sol non remanié. Néanmoins, une légère discrimination déterminée prioritairement par les teneurs en eau est constatée pour les échantillons argileux.

La différence de comportement entre les échantillons de sol non remanié et reconstitué est déterminée par le paramètre w_2 (proche de w_C). En effet, c'est le degré de gonflement de l'argile qui est moins important dans la structure de l'échantillon reconstitué que dans celle de l'échantillon non remanié ; ceci est dû à la pression qu'il subit lors de sa reconstitution.

II.3.3/ Conclusion

La mesure des teneurs en eau caractéristiques du fonctionnement hydro-structural du sol est plus reproductible pour les échantillons de sol reconstitués que pour les non remaniés.

En outre, l'analyse discriminante révèle un comportement au retrait similaire pour ces deux types d'échantillon du même sol (sauf peut-être pour AG). La structure n'a donc pas d'effet sur le retrait pour ces deux cas de figure.

Cela prouve aussi que la méthode de reconstitution du sol appliquée pour cette étude permet de fabriquer des échantillons qui auront des propriétés hydro-structurales comparables à celles des échantillons naturels prélevés. Le remaniement de la structure ne modifie donc pratiquement pas les paramètres caractéristiques analysés. Durant la reconstitution, les agrégats n'ont pas été détruits, et leur assemblage est resté intact dans la structure de l'échantillon remanié.

II.4/ Influence de la masse volumique apparente du sol sur le retrait

En faisant varier la masse volumique apparente d'un échantillon de sol reconstitué (rapport de la masse du sol à son volume apparent : $\rho_s = M / V_{app}$), et en étudiant à chaque fois son retrait par l'analyse de ses propriétés hydro-structurales, on pourra ainsi définir l'effet de tassement d'un sol sur son retrait.

II.4.1/ Manipulation

Elle consiste à étudier par rétractométrie, le retrait d'échantillons de sol reconstitués à des masses volumiques apparentes croissantes.

L'analyse se fera donc sur des sols de textures différentes, de la limite de plasticité, à la limite de retrait (Atterberg, 1911). En effet, en tassant les échantillons reconstitués (selon la technique du paragraphe II.1/ de la deuxième partie de ce mémoire) de 0 à 12 kg, on les « amène » à des masses volumiques apparentes croissantes.

Ces échantillons sont alors analysés par le rétractomètre laser, puis séchés à 105°C avant d'en calculer leur masse volumique apparente par mesure directe du volume d'eau déplacée suivant le principe d'Archimède.

On trace ainsi des courbes de retrait pour chaque échantillon analysé :

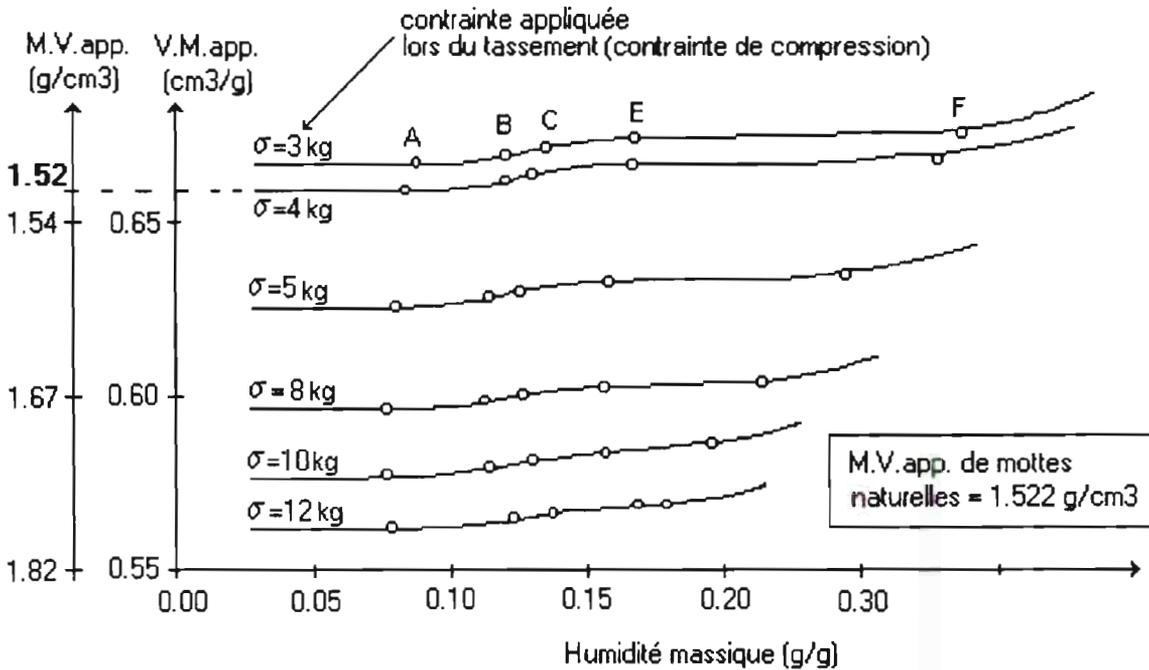


Fig. 3-II-7 : Courbes de retrait d'un échantillon de sol ferrallitique reconstitué à des masses volumiques apparentes (M.V.app.) croissantes.

Remarque : Chaque point de la courbe représente la moyenne de troismesures répétées.

II.4.2/ Résultats

Nous constatons (*en fig.3-II-7*) que sur les deux types de textures étudiées, les courbes ont la même allure, et les points caractéristiques assez bien ajustés aux faibles teneurs en eau.

On remarque également que les phases de retrait structural augmentent en teneurs en eau d'autant moins que le sol est tassé. La macroporosité diminue alors que la phase de retrait microporal reste intacte et conserve ses propriétés. C'est la preuve que ces premiers points sont caractéristiques des propriétés de l'argile (en accord avec le modèle fonctionnel MRS).

Grimaldi et Tessier (1986) ainsi que Robain et Curmi (1987) avaient tracé des courbes de retrait en y plaçant tout au long les pF correspondant à la teneur en eau de l'échantillon de sol, on avait ainsi la valeur de son pF à chaque point caractéristique de la courbe. Etant donné qu'il existe, en géotechnique par exemple, une relation directe entre les pF et les limites d'Atterberg, il est alors possible de placer celles-ci sur une courbe de retrait comme l'avaient pratiqué Sibley et Williams (1989), et de les quantifier et interpréter, suivant le modèle fonctionnel de Braudeau (1988a et b).

Des études plus poussées sur des sols non remaniés pourraient être envisagées afin de compléter l'étude de l'effet de la texture du sol sur la cohésion du matériau.

II.5/ Effet de l'enrobage de l'échantillon de sol sur son retrait

Les premières analyses rétractométriques (Braudeau 1987 ; Mapangui 1992 ; Colleuille 1993 ; Coquet 1995) ont été réalisées à l'aide de capteurs de déplacement de type « palpeur », en contact avec l'échantillon de sol. Celui-ci était enrobé d'un léger film de néoprène dilué ($\approx 0.5 \text{ g/échantillon de } 53 \times 20 \text{ mm}$) afin qu'il puisse conserver une bonne cohésion lors de sa saturation en eau. Il permettait également de faciliter le contact palpeur-sol tout au long du retrait.

Nous allons étudier l'effet de l'enrobage d'un échantillon de sol ferrallitique gonflant (à 40% d'argile) sur son retrait volumique, mesuré dans deux directions (horizontale et verticale), afin d'en apprécier l'anisotropie conséquente.

II.5.1/ Manipulation

Deux mêmes échantillons cylindriques reconstitués à la même masse volumique apparente et de même taille, l'un enrobé de néoprène, l'autre non (*figure 3-II.8*), sont analysés par rétractométrie laser.

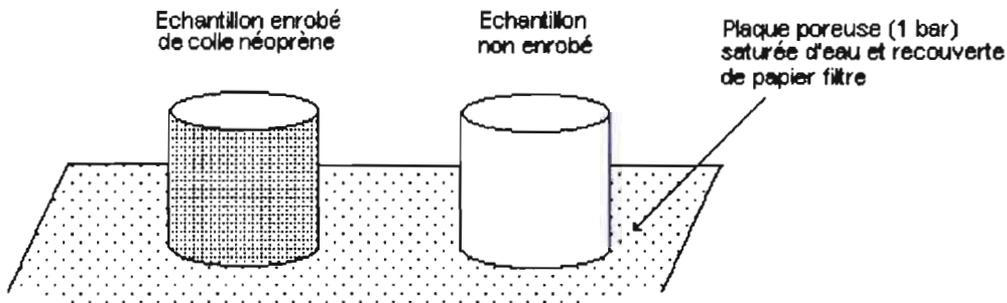


Fig. : 3-II-8 Saturation en eau de deux échantillons du même sol, l'un enrobé et l'autre non.

Les courbes de retrait correspondantes de ces deux échantillons sont tracées et étudiées (voir Fig. 3-II-9) :

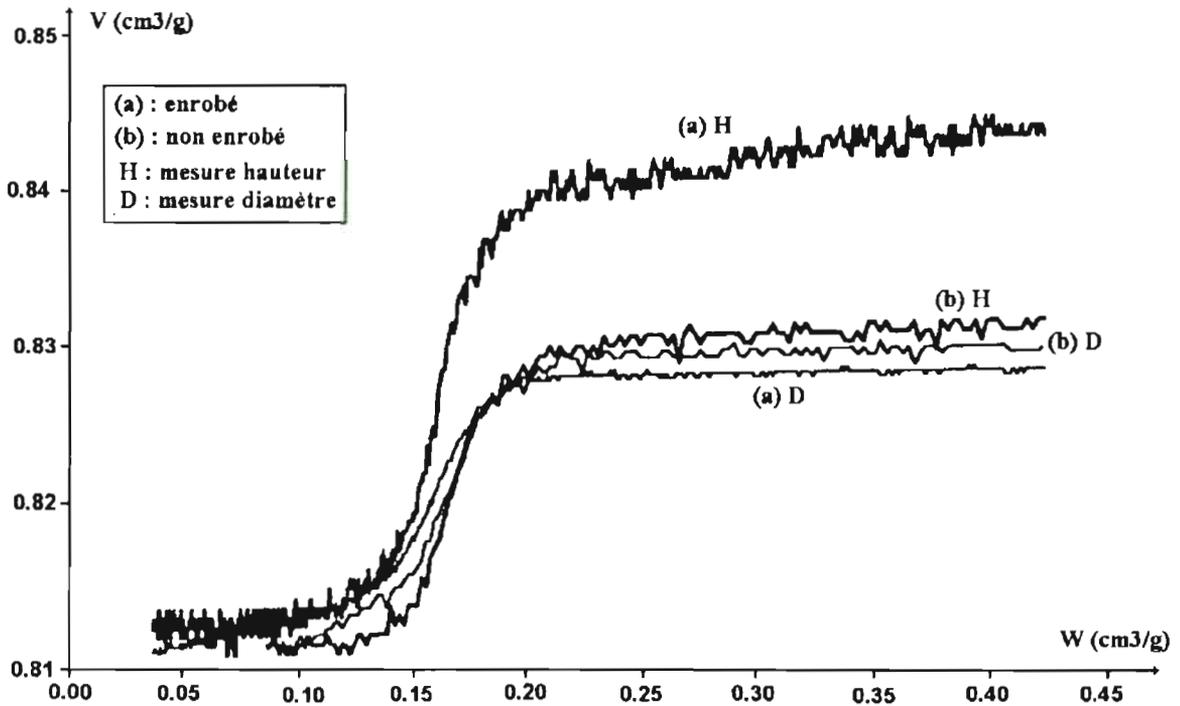


Fig. 3-II-9 : Courbes de retrait calculée d'après les mesures de la hauteur (H) et du « diamètre » (D) de deux mêmes échantillons de sol ferrallitique, l'un enrobé (a) l'autre non (b).

II.5.2/ Résultats

On constate une anisotropie du retrait beaucoup plus marquée pour l'échantillon enrobé, en fait une exagération de celui-ci sur le plan vertical (mesure suivant la hauteur) par rapport au retrait horizontal. Ce phénomène pourrait être expliqué par le fait que la couche de néoprène s'oppose au gonflement horizontal de l'échantillon lors de sa saturation en eau avant l'analyse, et on assiste alors à un « surgonflement » vertical de compensation. Durant le dessèchement de l'échantillon analysé, le retrait vertical serait alors d'autant plus fort (fig.3-II-9).

En fait, un échantillon de sol enrobé d'un film de néoprène ne gonfle pas de la même façon, lors de sa saturation, que le même sol non enrobé. Dans ces conditions, son retrait en est alors influencé.

Parmi les paramètres caractéristiques de la courbe de retrait, seule la pente du retrait normal, et surtout le coefficient d'isotropie est modifié ; les teneurs en eau ne varient pas.

L'enrobage de l'échantillon, pour l'analyse des paramètres caractéristiques du comportement hydro-structural des sols, est donc à éviter.

Une des solutions pour remédier au problème d'effondrement éventuel de la structure des sols à faible cohésion durant leur saturation en eau, consiste à lui faire subir un ou plusieurs cycles de dessiccation-rehumectation avant l'analyse.

Pour les échantillons à faible cohésion, et d'une façon générale pour éviter un gonflement trop brutal, il peut être également conseillé de saturer les échantillons de manière la plus douce possible (voir chapitre II.2.2/, deuxième partie).

III./ CONCLUSION

Dans cette troisième partie, nous avons étudié les courbes de retrait expérimentales tracées d'après les grandeurs mesurées par le rétractomètre laser et constaté divers phénomènes :

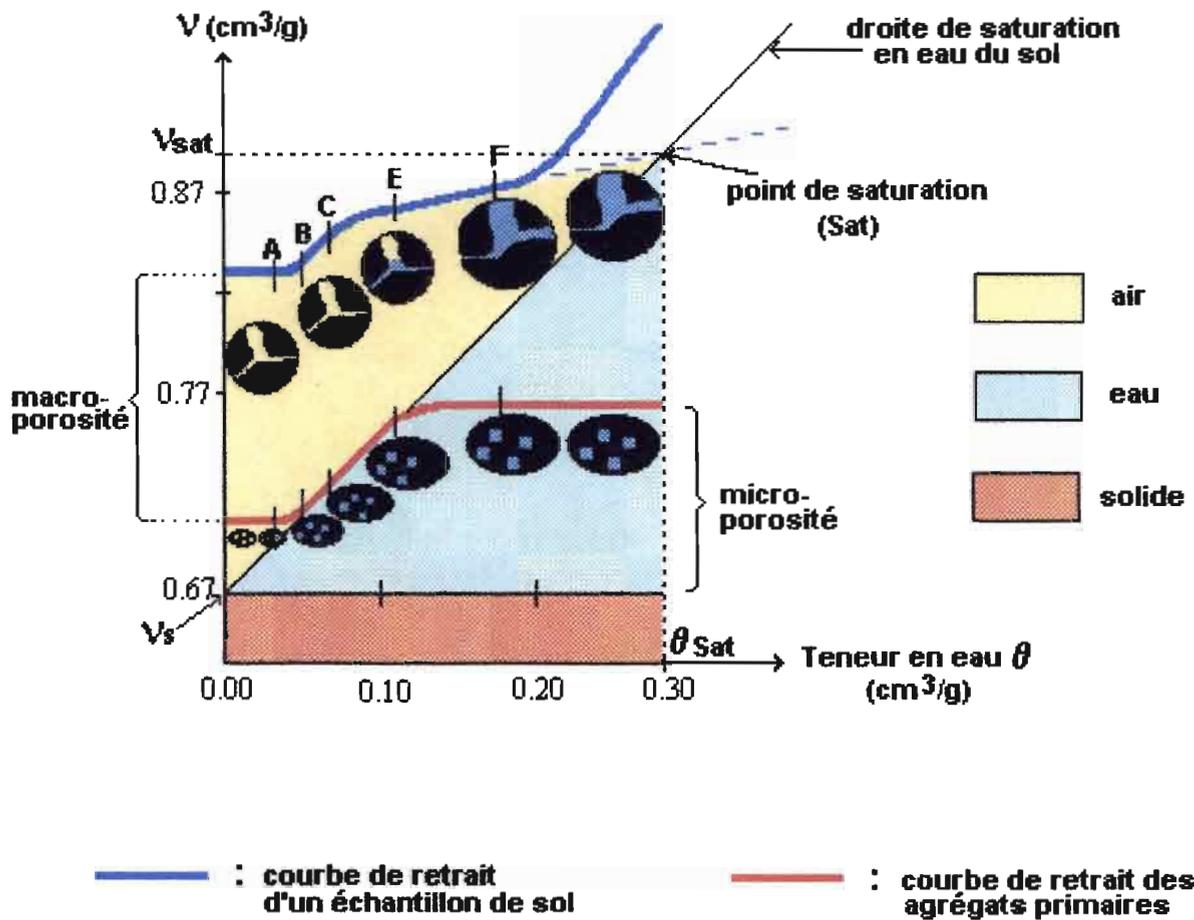
- Le signal donné par le « spot » laser, correspondant à la mesure verticale du retrait, est moins précis que celui donné par les « barrières » laser, correspondant à la mesure horizontale du retrait. Deux raisons purement techniques ont été données pour expliquer ce phénomène, l'une étant liée aux qualités intrinsèques des capteurs laser, l'autre à la mécanique du passeur d'échantillons.
- Une anisotropie relative du retrait en fonction du type de sol analysé est constatée, ceci est dû à un phénomène lié aux conditions expérimentales de préparation de l'échantillon à l'analyse rétractométrique (précontrainte verticale sur les échantillons de sol à faible cohésion lorsqu'ils sont saturés d'eau), et également à la texture propre du sol prélevé.
- Des phases de retrait supplémentaires de celles jusqu'à présent connues en science du sol peuvent apparaître suivant le type de sol analysé.

Pour ces raisons qui rendent difficile le calcul du retrait volumique tridimensionnel de l'échantillon tenant compte de la variation de ses dimensions verticale et horizontale, il a été proposé une nouvelle méthode de traitement des courbes expérimentales qui s'adapte parfaitement bien aux quatre types de sol étudiés : C'est la modélisation de la courbe de retrait par ajustement graphique de toutes les parties droites observées, celle-ci étant calculée en tenant compte de l'anisotropie du retrait ; c'est à dire en utilisant un coefficient d'isotropie dans l'expression du volume de l'échantillon de sol analysé. Nous nous sommes alors aperçus que la courbe de retrait calculée d'après les mesures horizontales du retrait (en « diamètre ») était tout à fait représentative du retrait tridimensionnel anisotrope de l'échantillon de sol. Cette nouvelle méthode de calcul du volume permet, en outre, de suivre l'évolution du coefficient d'isotropie tout au long du retrait de l'échantillon.

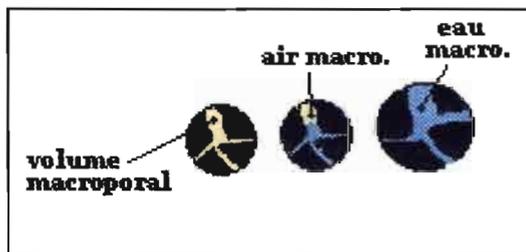
Enfin, une étude de l'influence des conditions opératoires de l'analyse rétractométrique (aussi bien qualitative que quantitative) sur les points caractéristiques de la courbe de retrait a été réalisée, permettant ainsi de préciser les possibilités analytiques de cette technique comme par exemple la caractérisation de la texture et de la structure d'un échantillon de sol, et ainsi de mieux comprendre les mécanismes de retrait-gonflement à l'échelle des agrégats ou des argiles d'après un modèle fonctionnel (MRS) de la courbe de retrait.

QUATRIEME PARTIE

LES APPLICATIONS POSSIBLES



Evolution de la macroporosité :



Evolution des agrégats primaires :

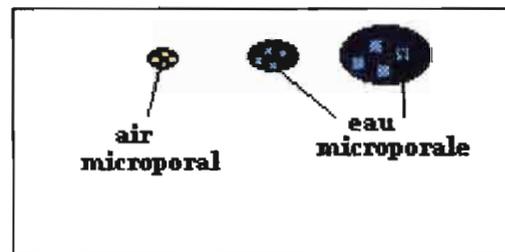


Fig. 4-I-1 (a):

Représentation graphique du fonctionnement hydrostructural du sol suivant le modèle MRS :
 La courbe de retrait représente la variation du volume massique en fonction de sa teneur en eau.

I./ DEFINITION D'UN MODELE FONCTIONNEL DE LA STRUCTURE DU SOL

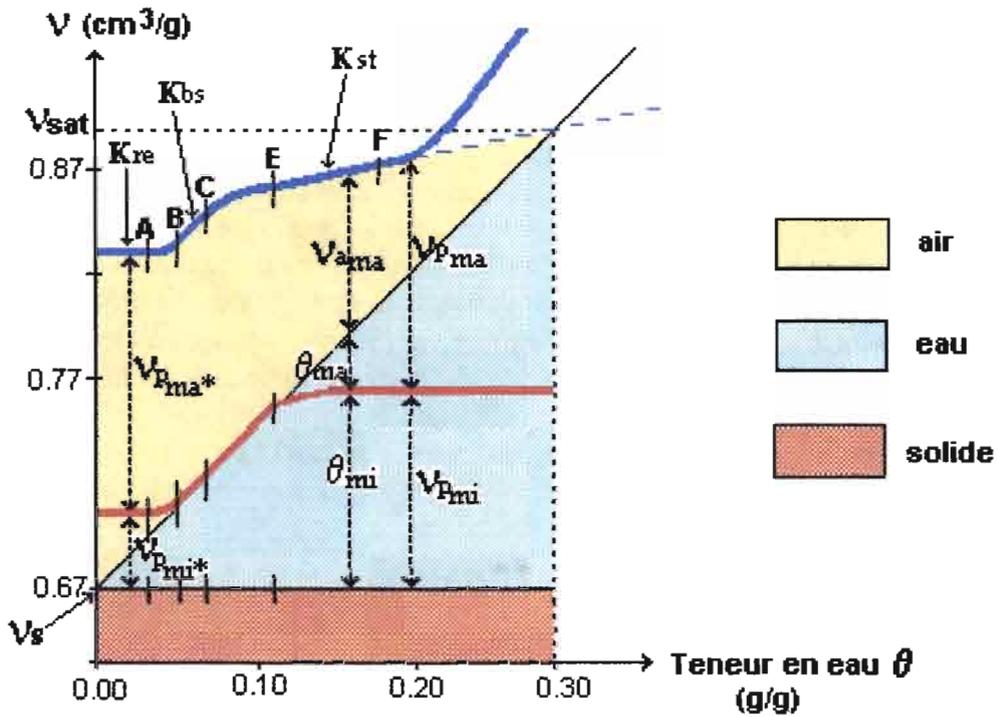
Dans le chapitre III.2.1/ de la première partie, nous avons défini (selon Braudeau, 1988a et b), le **modèle fonctionnel** comme une formalisation simplificatrice de la réalité, basée sur des observations expérimentales.

Reposant sur un modèle morphologique de la structure du sol, il en détermine toutes ses variables descriptives et son fonctionnement.

Une représentation graphique du fonctionnement hydrostructural du sol est présentée aux *figures 4-I-1 (a) et 4-I-1 (b)* :

- La série de dessins placée en dessous de la courbe de retrait d'un échantillon de sol (en bleu sur la *figure. 4-I-1 (a)*) représente l'évolution de la macroporosité (ronds) tout au long du retrait, de l'état saturé jusqu'à la limite de retrait. Les macropores sont d'abord remplis d'eau jusqu'au point F, puis réduisent de volume à partir du point E avec pénétration d'air. A partir du point B et jusqu'à la fin du retrait, les macropores sont remplis d'air et toute l'eau est évaporée.
- Les dessins placés sous la courbe des agrégats primaires (ovoïdes) représentent l'évolution de la micro-porosité tout au long du retrait. Leur retrait commence au point E et la pénétration d'air dans les agrégats qui remplace en partie l'eau micro-porale se fait à partir du point B jusqu'à la limite de retrait ; les pores (carrés bleus) n'y sont remplis plus que par de l'air.

Remarque : Le modèle MRS ne prend pas en compte la partie de la courbe de retrait au delà du point F. C'est la raison pour laquelle le point de saturation est repéré en prolongeant la partie droite E-F de la courbe jusqu'à la droite de saturation tracée.



<u>VOLUMES SPECIFIQUES :</u>	<u>TENEURS EN EAU :</u>
. v : volume spécifique de l'échantillon de sol (cm^3/g)	. θ : teneur en eau massique de l'échantillon de sol (g/g)
. v_{pma} : volume poral de la macroporosité (cm^3/g)	. θ_{ma} : teneur en eau massique de la macroporosité du sol (g/g)
. v_{pmi} : volume poral de la microporosité (cm^3/g)	. θ_{mi} : teneur en eau massique de la microporosité du sol (g/g)
. $v_{pmi}^* = v_{pma}$ à $\theta < \theta_B$ (cm^3/g)	. θ_{sat} : teneur en eau massique à saturation (g/g)
. $v_{pma}^* = v_{pma}$ à $\theta < \theta_B$ (cm^3/g)	
. v_{ama} : volume d'air dans la macroporosité (cm^3/g)	<u>PENTES DES PHASES :</u>
. v_s : volume spécifique du solide (« densité réelle ») (cm^3/g)	K_{re}, K_{bs}, K_{st} : pentes des phases linéaires de retrait.
. v_{sat} : volume du sol à saturation (cm^3/g)	

fig. 4-I-1 (b) : Représentation graphique du fonctionnement hydrostructural du sol suivant le modèle MRS : Définition et nomenclature des variables descriptives du modèle.

II./ DETERMINATION DES PROPRIETES HYDRO-STRUCTURALES DU SOL EN AGRICULTURE

Dans la recherche d'une utilisation efficace de l'eau en culture irriguée, il s'avère de plus en plus indispensable d'améliorer la gestion de l'eau à l'échelle de la parcelle cultivée. Cela demande une bonne connaissance, non seulement de la plante et de ses besoins en eau, mais aussi des propriétés du sol, notamment celles liées à sa structure comme les réserves en eau, l'aération, l'agrégation, les qualités de support stable et favorable au développement des racines etc.... Cependant, les techniques de mesure couramment utilisées en physique du sol et notamment dans le domaine d'étude de ses propriétés hydro-structurale, sont peu nombreuses et conceptuellement dispersées ; elles ne donnent qu'une appréciation empirique et subjective des qualités structurales du sol. C'est le cas des réserves en eau et en air (REU, RFU, Capacité à l'air), qui sont généralement évaluées par des tests dont les normes sont fixées de manière standard, indépendamment de la texture du sol.

En utilisant son modèle fonctionnel MRS, Braudeau (1988b) utilise la rétractométrie pour définir quantitativement et significativement un ensemble de propriétés hydro-structurales du sol dont les réserves en eau (humidité à la capacité de rétention, au point de friabilité, au point de flétrissement etc...) qui se trouvent dans des états différents.

II.1/ Les états pédo-hydriques particuliers du sol

La distinction entre l'eau microporale (dans les agrégats primaires) et l'eau macroporale (ou inter agrégats) implique la reconnaissance d'états hydro-structuraux spécifiques de chaque phase de retrait correspondants aux différents modes de répartition de l'eau et de l'air dans chacune d'elles.

De même les points de transition entre deux phases de retrait sont des états d'humidité particuliers que l'on peut facilement mettre en correspondance avec les états d'humidité connus et définis empiriquement d'après le comportement particulier du sol en ces points :

II.1.1/ La capacité de rétention

C'est une mesure de laboratoire qui correspondrait à la *capacité au champs*, notion bien connue des agronomes, mais qui demeure d'un point de vue pratique difficilement mesurable sur le terrain. Elle est fondée sur l'existence supposée d'un seuil à partir duquel on observe une diminution brusque de la vitesse de drainage, ou bien une montée rapide du potentiel de l'eau au moment du ressuyage (Féodoroff, 1962). Si ce seuil existe, il correspondrait « mécaniquement » au **point E** de la courbe de retrait qui représente, selon le modèle fonctionnel posé, le *début du retrait des agrégats primaires*.

C'est à partir de ce point, en effet, que l'eau qui s'évapore de l'échantillon provient de manière croissante du plasma argileux, concurrençant en cela l'eau de la macroporosité. Ce départ d'eau de la microporosité s'accompagne d'un retrait et par conséquent aussi d'une diminution accrue du potentiel chimique de l'eau du sol.

De plus, au cours de la phase E-C, l'eau qui se trouve en continuité capillaire dans la macroporosité inter-agrégats devient discontinue dans cette même macroporosité, jusqu'à disparaître complètement de la macroporosité au point C.

On conçoit bien que la vitesse de drainage s'en trouve ralentie, l'eau transitant de plus en plus par la microporosité plasmique à partir du point E.

Voilà deux raisons qui justifient le fait de considérer le point E de la courbe de retrait comme étant celui correspondant à la capacité de rétention :

$$\theta_{\text{rétention}} = \theta_E$$

II.1.2/ Le point de friabilité

Il a été défini par Braudeau (1988). C'est le point théorique du modèle fonctionnel à partir duquel l'eau en drainage n'occuperait plus que la microporosité plasmique du sol. Ainsi les agrégats primaires, toujours saturés, se trouvent « physiquement » individualisés et délimités par la macroporosité remplie d'air. Ce point est situé au **point C** de la courbe de retrait, au début de la phase de retrait normal (basique).

D'après les résultats obtenus sur une série de sols ferrallitiques, argileux, et alluviaux peu évolués du Sénégal (Boivin 1990 ; Colleuille 1994), ce point apparaît aux environs de $pF=3$ (100kPa.) sur la courbe du *potentiel en fonction de la teneur en eau*, avec lequel il est très bien corrélé. Notons, d'autre part, que le $pF = 3$ est connu pour correspondre à un état hydro-mécanique particulier du sol : *l'état de friabilité maximum* du sol selon Utomo et Dexter (1981), *l'indice de plasticité*, ou encore le *maximum de sensibilité au compactage* (Guerif, 1987 ; Sala et Tessier, 1993).

Il représente aussi ce que l'on dit par abus de langage, le point de transition du passage entre une pression de l'eau « positive » à une pression de l'eau « négative » dans les pores du sol.

$$\theta_{\text{friabilité}} = \theta_C$$

II.1.3/ Le point de flétrissement

C'est l'état hydrique du sol à partir duquel l'eau qui y est retenue n'est plus extractible par la plante.

Bien que cette notion soit très contestée, en ce sens qu'elle ne peut être une caractéristique spécifique du sol seul (Boedt et Verheye, 1985), il est bien admis chez les praticiens du sol que ce point correspond à un potentiel de l'eau de 15 à 16 bars ($pF = 4.2$), et qu'il représente assez bien ce qui se passe dans la nature (Miller et Mazurak, 1955).

Cependant, il est à remarquer, comme l'ont noté plusieurs auteurs (Lauritzen, 1941 ; Reeve et Hall, 1978 ; Lawrence et al., 1979), qu'il est situé dans la phase de retrait normal entre les points B et C.

On peut dès lors l'identifier au point B, le point d'entrée d'air dans la microporosité, lui donnant ainsi une explication plausible :

- L'entrée d'air dans la phase argileuse constitue une rupture de continuité dans la capillarité microscopique assurée par l'argile, et l'eau n'a plus la possibilité de circuler à l'état liquide et d'accéder ainsi aux racines, quel que soit le pouvoir d'extraction de l'eau liquide de la plante.

En identifiant le point de flétrissement au point d'entrée d'air microporal (point B), on ramène un indice agronomique défini de façon empirique à une caractéristique pédologique spécifique du sol, et plus particulièrement de sa phase argileuse. Ceci explique par ailleurs la corrélation étroite bien connue entre la teneur en eau au point de flétrissement ($\theta_{\text{flétrissement}}$) et le taux d'argile (ou d'argile + limon fins).

$$\theta_{\text{flétrissement}} = \theta_B$$

II.1.4/ La teneur en eau à saturation

C'est par définition, le point de rencontre entre la courbe de retrait $v = f(\theta)$ et la droite de saturation d'équation (voir *fig.2-II-12 et 2-II-13*) :

$$v = \theta/\rho_w + 1/\rho_s$$

où ρ_w est la masse volumique de l'eau et ρ_s celle de la phase solide (« densité réelle »).

Cependant, dans le cas des sols présentant une courbe de retrait d'allure sigmoïdale nette, on choisit de négliger la phase de retrait G-F qui pourrait dépendre des conditions de laboratoire, car située dans une gamme de teneur en eau où l'échantillon prélevé (non confiné) est très fragile et sensible à la pression externe.

Le point de la teneur en eau à saturation est alors placé au point de rencontre de la droite de saturation et du prolongement de la phase de retrait structurale calculée par l'équation :

$$\theta_{\text{saturation}} = \frac{(vE - 1/\rho_s - K_{st} \cdot \theta E)}{(1/\rho_w - K_s)}$$

II.2/ Les réserves en eau du sol

Ces réserves en eau du sol se déterminent d'après la courbe de retrait.
La réserve utile RU, la réserve facilement utilisable RFU et l'eau résiduelle ER sont des notions agronomiques qui se déduisent ainsi des définitions précédentes.

II.2.1/ La réserve en eau utile (RU)

C'est la quantité d'eau retenue par le sol et disponible pour la plante, dans une épaisseur de sol donnée entre la capacité au champ et le point de flétrissement. Elle correspond donc à l'eau que cède le sol en passant du point E au point B sur sa courbe de retrait.

Calculée pour une épaisseur de sol ΔZ donnée et exprimée en hauteur d'eau, elle a pour expression :

$$\boxed{RU = \frac{(\theta_E - \theta_B) \cdot \Delta Z}{(v_E \cdot \rho_w)}} \quad \text{ou} \quad \boxed{RU = \frac{(\theta_{vE} - \theta_{vB}) \Delta Z}{\rho_w}} \quad \text{avec :}$$

- . θ la teneur en eau gravimétrique en (g/g)
- . θ_v la teneur en eau volumique en (cm^3/cm^3)
- . v_E le volume massique apparent à la capacité de rétention, en (cm^3/g)
- . ρ_w la masse volumique de l'eau en ($\approx 1\text{g}/\text{cm}^3$)
- . ΔZ l'épaisseur de la couche de sol, en (mm) pour obtenir la RU en (mm).

II.2.2/ La réserve facilement utilisable (RFU)

Elle est une fraction de l'eau utile que les agronomes reconnaissent plus facilement accessible à la plante sans que celle-ci ne donne de signe de stress.

Certains attribuent au sol un point de flétrissement temporaire, autre état hydrique particulier du sol situé en deçà du point de flétrissement permanent (Henin et al., 1969 ; Musy et Soutter, 1991), et à partir duquel la plante montre les premiers signes de stress ; la RFU est alors l'eau disponible entre la capacité de rétention et ce point de flétrissement temporaire.

Cependant les avis sont très partagés sur l'existence d'un tel point, et avancent que d'autres facteurs comme la demande en évaporation, le type de culture etc... doivent intervenir dans la définition de la RFU, et donc de sa détermination (Boedt et Verheye, 1985) qui dès lors ne peut se faire que dans les conditions in-situ.

De nombreuses déterminations sur les sols africains donnent en moyenne un rapport RFU/REU entre 60 et 80% (Dancette, 1973).

S'il est permis de ramener cette dernière notion aux caractéristiques du sol uniquement, ou simplement de définir la composante sol de la RFU (RFU₁), celle-ci pourrait alors correspondre à l'eau capillaire qui se trouve dans la macro-porosité quand le sol est à la capacité de rétention (point E) ; cette eau se trouve en effet hors de la phase argileuse, directement accessible aux racines.

D'après les équations de la courbe de retrait selon Braudeau (1988), cette quantité d'eau est égale à :

$$\theta_{mE} = \frac{(\theta_E - \theta_C)}{(\exp.1 - 1)} = 0.58.(\theta_E - \theta_C)$$

d'où cette première définition de la RFU :

$$RFU_1 = 0.58. \left(\frac{(\theta_E - \theta_B). \Delta Z}{(v_E. \rho_w)} \right)$$

Cependant, si l'on reprend la notion de point de flétrissement temporaire, la RFU pourrait correspondre à la quantité d'eau micro. et macroporale cédée par le sol entre les poits E et C (« point sec macro »).

En effet, si la demande évaporatoire est peu intense, l'eau microporale contenue dans la phase argileuse à la possibilité de passer dans le système macroporal où elle reste facilement disponible ; et ceci jusqu'au point C, avec une cinétique qui est fonction des propriétés de déformation de l'argile. Le point C est, dans ce cas, considéré comme le point donné dans la première définition.

$$RFU_2 = \frac{(\theta_E - \theta_C). \Delta Z}{(v_E. \rho_w)} \quad \text{avec } \Delta Z \text{ et RFU en (mm).}$$

Notons ici que :

$$RFU_1 = 1.7.RFU_2$$

et que la partie de la réserve en eau qui réside dans l'argile a pour expression :

$$RU_{argile} = RU - RFU_1$$

II.2.3/ L'eau résiduelle (ER)

L'eau résiduelle est l'eau restant dans l'échantillon de sol au point de flétrissement en B.

$$ER = \frac{\theta_B}{(v_B \cdot \rho_w) \cdot \Delta Z} \quad \text{avec } \Delta Z \text{ et RFU en (mm)}$$

II.2.4/ L'eau gravitaire (EG)

C'est la portion d'eau non retenue par le sol et qui est rapidement drainée par gravité après saturation complète de celui-ci.

$$EG = \frac{(\theta_{\text{saturation}} - \theta_E)}{(v_{\text{saturation}} - \rho_w) \cdot \Delta Z}$$

II.3/ Tableau récapitulatif des propriétés hydrostructurales

Teneurs en eau (g/g)	à saturation	au point E	au point C	au point B	au point A
totale (θ)	θ_{sat}	θ_E	θ_C	θ_B	θ_A
microscopique (θ_{mi})	θ_{miE}	$\frac{\theta_E - (\theta_E - \theta_C)}{1.72}$	θ_C	θ_B	θ_A
macroscopique (θ_{ma})	$(\theta_{sat} - \theta_{miE})$	$(\theta_E - \theta_C)/1.72$	0	0	0

Volume poral (cm ³ /g)					
total (v_p)	θ_{sat}	$(v_E - v_S)$	$(v_C - v_S)$	$(v_B - v_S)$	$(v_A - v_S)$
microporal ($v_{p_{mi}}$)	θ_{miE}	θ_{miE}	θ_C	θ_C	$\frac{\theta_A + (\theta_B - \theta_A)}{1.72}$
macroporal ($v_{p_{ma}}$)	$(v_{pE} - \theta_{miE})$	$(v_{pE} - \theta_{miE})$	$(v_{pC} - \theta_C)$	$(v_{pB} - \theta_B)$	$(v_{pA} - v_{p_{mi}A})$

Volume d'air (cm ³ /g)					
total (v_{air})	0	$(v_{pE} - \theta_E)$	$(v_{pC} - \theta_C)$	$(v_{pB} - \theta_B)$	$(v_{pA} - \theta_A)$
micro. ($v_{air_{mi}}$)	0	0	0	0	$\frac{(\theta_B - \theta_A)}{1.72}$
macro. ($v_{air_{ma}}$)	0	$(v_{pE} - \theta_E)$	$v_{p_{ma}C}$	$v_{p_{ma}B}$	$v_{p_{ma}A}$

Réserves en eau (mm d'eau/100)	$(x100/v_{sat})$	$(x100/v_E)$	$(x100/v_C)$	$(x100/v_B)$	-
gravitaire (EG)	$(\theta_{sat} - \theta_E)$	0	0	0	-
Facil. util. (RFU ₁)	$(\theta_E - \theta_C)/1.72$	$(\theta_E - \theta_C)/1.72$	0	0	-
Facil. util. (RFU ₂)	$(\theta_E - \theta_C)$	$(\theta_E - \theta_C)$	0	0	-
utile (REU)	$(\theta_E - \theta_B)$	$(\theta_E - \theta_B)$	$(\theta_C - \theta_B)$	0	-
REU argile	$(\theta_{miE} - \theta_B)$	$(\theta_{miE} - \theta_B)$	$(\theta_C - \theta_B)$	0	-
résiduelle (ER)	θ_B	θ_B	θ_B	θ_B	-

III./ APPLICATIONS GEOTECHNIQUES

III.1/ Importance de la mesure du retrait

Nous avons vu au chapitre IV/ de la première partie de ce mémoire, l'importance que peuvent avoir les effets du retrait et gonflement des sols dans les travaux d'ingénierie du bâtiment vu les dommages qu'ils créent sur les constructions. Les mouvements de fondation entraînent ainsi des désordres graves, nécessitant des réparations très coûteuses. Dans la plupart des cas, les risques ne sont pas pris en compte par les documents normatifs existants. Un journal spécialisé (Sycodés info., 1991), dénonçait le manque de moyen mis à disposition par les instances compétentes pour :

- « Mettre en chantier des spécifications de conception et de mise en oeuvre afin d'analyser ces dégats ».
- « Définir l'importance des risques en fonction du type de sol afin de limiter les coûts ».
- « Etablir des spécifications destinées à prévenir ces désordres, y compris celles qui concernent la végétation avoisinante ».
- « Prendre en compte ces phénomènes dans les techniques de réparation afin d'éviter de nouveaux désordres lorsque le sol reprendra de l'eau ».

Des méthodes d'analyse de ces phénomènes existent déjà : mesure in-situ à l'oedomètre (voir définition p.62), (Flavigny 1991, Mariotti 1988, Ofer 1981), par immersion d'un échantillon prélevé dans du mercure dans différents intervalles de temps, jusqu'à son desèchement total. Cette dernière méthode de mesure indirecte est limitée (voir chapitre II.2/, première partie), peu fiable (Philipponnat, 1990), voire dangereuse quant à la manipulation du mercure.

Casagrande améliorait le procédé de mesure de la limite de retrait et avouait que celui-ci demeurait peu rigoureux et peu précis (Holtz et Kovacs, 1991).

A son tour, Atlan (1991) signalait qu'il était difficile dans la pratique d'aller plus loin et de quantifier les variations de volume et qu'il n'existait d'essai normalisé de retrait dont le mécanisme est beaucoup moins étudié que le gonflement.

III.2/ La rétractométrie en géotechnique

On a vu que les phénomènes de retrait-gonflement des sols naturels sont principalement liés aux variations de leurs teneurs en eau. En géotechnique, celles-ci sont définies conventionnellement par les limites d'Atterberg (Terzaghi, 1967), qui définissent une transition de comportement du sol, et l'ordre de grandeur de chacune d'elle s'avère caractéristique de telle ou telle famille d'argile. (Atterberg mesurait la teneur en eau correspondant à un changement de couleur du sol au fur et à mesure de son retrait). Ces limites d'Atterberg sont des réels indicateurs du comportement des sols (argiles et autres) en fonction de leur teneurs en eau. Par exemple, un sol argileux qui in-situ, présenterait en permanence ou cycliquement une teneur en eau supérieure à la limite de liquidité (WL), aurait un comportement mécanique extrêmement médiocre et serait peu apte aux fondations (Mouroux et al., 1988).

De plus, par la multitude de corrélations existant entre ces limites ou des grandeurs tirées de celles-ci, et divers paramètres du gonflement, tel que la pression de gonflement, le potentiel chimique lors du gonflement etc..., elles doivent être considérées comme des paramètres d'identification fondamentaux lors de l'étude de fondation.

Sachant que la courbe de retrait décrit des états hydro-structuraux du sol, correspondant aux différents modes de répartition de l'eau et de l'air dans les deux systèmes poraux relatifs à chaque phase de retrait, on peut envisager d'utiliser les points de transition entre les phases de retrait pour déterminer les limites d'Atterberg :

- Le point A = W_r (limite de retrait),
- le point B = point d'entrée d'air microporal,
- le point E = W_p (limite de plasticité),
- le point F = W_L (limite de liquidité).

La rétractométrie a l'avantage de décrire certains comportements de la structure du sol durant son retrait en continu, en calculant de façon précise les teneurs en eau en tout point de sa courbe.

Des études plus poussées seraient à envisager pour donner une interprétation géotechnique précise à ces paramètres caractéristiques de la courbe de retrait, en vue d'étudier plus précisément le retrait d'un terrain constructible ou celui des matériaux routiers sous contraintes mécaniques.

La rétractométrie permettrait également de répondre en partie aux problèmes analytiques liés à la quantification, donc à la prévention des risques de dommages énoncés au paragraphe précédent.

IV / AUTRES APPLICATIONS

En physique du sol, la courbe de retrait est une donnée importante pour décrire le transfert d'eau dans les sols déformables. Afin de modéliser ce transfert, il est nécessaire de connaître deux autres propriétés hydrodynamiques qui sont la courbe de rétention et la courbe de conductivité hydraulique.

Garnier (1996) propose une méthode de détermination des trois propriétés hydrodynamiques (courbe de retrait, courbe de rétention et courbe de conductivité hydraulique) qui utilise le protocole expérimental présenté dans ce travail. La courbe de retrait est déterminée directement à partir de l'expérience, alors qu'une méthode inverse est utilisée pour déterminer les courbes de conductivité hydraulique et de rétention.

Pour mettre en oeuvre la méthode inverse, le protocole expérimental présenté dans ce mémoire est un peu modifié car deux tensiomètres sont introduits au voisinage des faces supérieures et inférieures de l'échantillon afin de mesurer le potentiel de l'eau du sol à ces deux endroits.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans diverses disciplines des sciences du sol, pour tenter de mieux comprendre ses comportements hydriques et mécaniques sous l'action des éléments du climat au cours des saisons, depuis près d'un siècle on s'intéresse à la mesure du retrait des sols.

En retraçant historiquement l'évolution de la mesure de la courbe de retrait d'un échantillon de sol à travers différentes méthodes d'analyse, ainsi que celle du concept de la structure hydroporale variable qui le décrit, nous avons mis en évidence le fait que la prise en compte de **certaines propriétés hydro-structurales caractéristiques du sol** comme par exemple celles de la phase argileuse et de l'organisation d'assemblage des agrégats, était indispensable pour étudier les procédés de ces phénomènes.

En agriculture, ces propriétés sont essentielles car elles représentent en fait les réserves en eau du sol, indispensables à la vie des plantes. L'eau contenue dans le sol est en effet caractérisée par son volume réparti dans les systèmes microporal et macroporal relatifs à chaque phase de retrait, et par son état énergétique. Trois états de l'eau dans le sol sont connus : eau de gravité ou de saturation, eau utilisable par la plante (réserve utile) et eau inutilisable par la plante. Ces notions calculées par des méthodes d'analyse expérimentales n'ont malheureusement pas de valeur générale car des paramètres importants sont omis (structure, type de porosité), (Chamayou et Legros, 1989).

En géotechnique, les limites d'Atterberg sont des propriétés importantes correspondant à des teneurs en eau du sol à différents états. Elles donnent des indications significatives aussi bien qualitatives sur certains comportements physiques du sol sous sollicitation, que quantitatives car elles délimitent ces derniers. Elles constituent donc une donnée indispensable dont il faut tenir compte dans la conception des ouvrages. Cependant, ces propriétés caractéristiques, aussi importantes soient-elles, sont encore aujourd'hui peu nombreuses, n'offrant que des indications empiriques sur les comportements physiques du sol en ne tenant compte ni de sa texture ni de sa structure interne.

En physique du sol, elles permettent de caractériser qualitativement et quantitativement la structure variable du sol composée de systèmes poraux à plusieurs niveaux d'organisation et de définir ses états hydrostructuraux particuliers.

Par définition, la rétractométrie est une méthode de mesure conceptuelle du retrait d'un échantillon de sol et d'analyse de ses propriétés hydrostructurales caractéristiques suivant un modèle fonctionnel de sa structure (Braudeau, 1988a et b). Construit à partir d'un modèle morphologique connu (Brewer, 1964), celui-ci décrit le fonctionnement hydroporal du sol suivant sa courbe de retrait expérimentale, celle-ci étant tracée en continu et modélisée mathématiquement à partir d'une équation paramétrique.

La rétractométrie permet la mesure en continu du retrait d'un échantillon de sol et ainsi, par l'étude de sa courbe de retrait, l'analyse très précise de ses propriétés hydrostructurales. Afin d'élargir le champ des possibilités de traitement analytique des données expérimentales et ainsi permettre une interprétation de la courbe de retrait et du comportement hydrostructural de l'échantillon qu'elle caractérise la plus rigoureuse et significative possible, il fallait concevoir un appareil permettant d'analyser en routine un grand nombre d'échantillons par séries de répétitions sur le même matériau.

Cette mesure pouvait être réalisée en utilisant des technologies modernes (passeur d'échantillons automatique, capteurs optiques laser de distance et de dimension, etc...) tout en répondant à un souci de précision, de fiabilité et d'efficacité.

Pour cela, le premier rétractomètre laser à passeur d'échantillons (prototype) a été fabriqué, mis au point et validé sur des échantillons de sol de textures différentes, du plus rigide (exemple d'un sol sablo-limoneux à 13 % d'argile) au plus gonflant (exemple d'un sol argileux type vertisol à 60% d'argile, à dominante smectite), de taille variable et quelle que soit la nature de sa structure (reconstituée ou non remaniée).

Afin d'éviter des problèmes de variabilité structurale dans le sol qui perturberaient l'analyse statistique des résultats, comme c'est souvent le cas pour les sols naturels à structure intacte (à cause des fissures de taille irrégulière, de la macroporosité différente d'un échantillon à un autre, de l'activité faunique, des accidents naturels du sol, des racines etc...), il est plus pratique de travailler sur des séries d'échantillons de sol reconstitué à une masse volumique apparente identique à celle du sol en place suivant un protocole expérimental strict. C'est pourquoi ce rétractomètre laser a été conçu pour permettre d'analyser une série de huit échantillons en une seule manipulation, ce qui offre la possibilité de répéter la même analyse plusieurs fois par type d'échantillon de sol. Sa validation, d'un point de vue métrologique, a permis d'évaluer ses limitations techniques et de définir les degrés de précision et de fidélité de la mesure : la précision obtenue est de 0.019% (soit 9 μ m) en moyenne pour les mesurages de dimension horizontale et verticale de l'échantillon, pour un volume environ égal à 100cm³.

Depuis 1988, l'interprétation de la courbe de retrait modélisée par ajustement du modèle fonctionnel MRS (modèle de retrait structural, d'après Braudeau 1988a et b) est réalisée en admettant l'hypothèse d'isotropie du retrait (Braudeau, 1987 ; Boivin, 1990 ; Mapangui, 1993 ; Colleuille, 1993 ; Perrier, 1994 ; Coquet, 1995 ; Diome, 1995). L'ajustement était alors optimisé par la méthode du simplex qui, pour certains types de sol, ne permettait pas toujours un calcul des paramètres caractéristiques reproductible. Nous savons aujourd'hui, sans toutefois en connaître l'explication physique précise, que le retrait est anisotrope pour certaines phases, isotrope pour d'autres, suivant qu'il est été analysé sur sol en place (in-situ) ou sur échantillon prélevé (Fox, 1964 ; Bronswijk, 1991 ; Mitchell, 1991).

En utilisant une nouvelle méthode d'ajustement des phases de retrait par traitement graphique (modèle des droites MD) qui prend en compte cette fois toutes les phases de retrait de la courbe, quels que soient les types textural et structural du sol, et qui tient compte de l'anisotropie du retrait dans le calcul du volume spécifique des échantillons analysés, nous possédons une méthode de mesure et d'interprétation de la courbe de retrait rigoureuse et fiable. Une étude de l'influence des conditions opératoires de l'analyse rétractométrique (aussi bien qualitative que quantitative) sur les points caractéristiques de la courbe de retrait a peut-être permis non seulement d'en préciser les modalités analytiques, mais également de mieux comprendre les mécanismes de retrait-gonflement à l'échelle des agrégats ou des argiles.

Avec le rétractomètre laser multipostes et cette nouvelle méthode d'analyse de la courbe de retrait interprétée suivant le modèle proposé, nous avons les moyens de calculer de façon précise et moins empirique que les tests existants, des propriétés hydro-structurales du sol comme certaines de ses réserves en eau pour une meilleure gestion de l'eau en agriculture ou les limites d'Atterberg en géotechnique, qui peuvent être comparées aux paramètres caractéristiques de la courbe de retrait. D'autres applications sont possibles : par exemple, en hydrophysique du sol, on peut utiliser la mesure de la courbe de retrait par rétractométrie pour modéliser le transfert d'eau dans les sols déformables (Perrier, 1994 ; Garnier, 1996).

Afin de mieux comprendre les processus thermodynamiques dans le système triphasique air-eau-sol liés aux phénomènes de retrait et gonflement des sols à structure variable encore mal connus (comme par exemple celui de l'activité de l'eau porale (colloïdale) dans un sol argileux quand celle-ci passe du système « extrafeuilletés » au système « interfeuilletés » de la matrice argileuse), il serait intéressant de développer, par le biais de la rétractométrie, des recherches expérimentales et théoriques dans ce sens. Il en est de même pour l'étude des variations de température ou encore l'étude physico-chimique de l'effet de la salinité (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , etc...) des sols sur ces mêmes phénomènes physiques. Le rétractomètre laser peut également contribuer à développer certaines études physiques comme la cinétique de gonflement des sols et agrégats.

Par ses qualités métrologiques et par la pertinence de la méthode d'interprétation de la courbe de retrait qu'il mesure, le rétractomètre laser est un outil efficace et précis, aussi bien en recherche fondamentale pour dans l'avenir, tenter de modéliser la structure variable du sol en tenant compte de toutes ses contraintes naturelles, qu'en recherche appliquée à l'étude des milieux naturels afin de pouvoir optimiser l'exploitation de leurs qualités, ou encore de prévoir certains de leurs comportements physiques et ainsi mieux les maîtriser.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AITCHINSON, G. D., and J. W. HOLMES. (1953). Aspects of swelling in the soil profile. *Aust. J. Appl. Sci.* **4** : 244 - 259.
- ATLAN, Y. (1991). Desordres des constructions causés par le dessèchement des sols. *Presse du BRGM*, Orléans, janvier 1991.
- ANTOINE, P., et D. FABRE. (1980). Géologie appliquée au génie civil. *Ed. Masson*, Paris.
- ATTERBERG, A. (1911). The behavior of clays with water, their limits of plasticity and their degrees of plasticity. *Kungliga lantbruksakademiens handlingar och tidskrift.* **50** (2) : 132 - 158.
- AUCHINLECK, G. G. (1912). The estimation of certain physical properties of soil. *West. Ind. Bul.* **12** : 50 - 69.
- AUDRY P., A., COMBEAU, F. X. HUMBEL, E. ROOSE et J. F. VISIER. (1973). Essai sur les études de dynamique actuelle des sols. Bulletin du groupe de travail sur la dynamique actuelle des sols, **2**, *Orstom*, 126 pp.
- BARTELL and SIMS. (1922). For a general discussion of swelling. *J. Am. Chem. Soc.* **44** : 289.
- BAUMGARTL, Th., P. WINKELMANN, W. GRAESLE, R. HORN and B. G. RICHARDS. (1995). Measurement of soil mechanical properties and hydrolic processes with a modified triaxial test. Proceeding of the first international conference on unsaturated soils/unsat'95/Paris/France: 6-8/09/1995. *Presse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées*, Paris. 433 - 438.
- BELLIER, G., et J. LARVY DELARIVIERE. (1993). Mise en évidence de l'anisotropie et conséquence de la cohésion sur le retrait. *Rapport de la première réunion du groupe thématique 'Structure et fertilité des sols tropicaux'*, Montpellier 06/09/1993. 75 - 83.
- BERNDT, R. J., and K. J. COUGHLAN. (1976). The nature of changes in bulk density with water content in a craking clay. *Aust.J. Soil Res.* **15** : 27 - 37.
- BOIVIN, P. (1990). Caractérisation physique des sols sulfatés acides de la vallée de Katouré (Basse Casamance, Sénégal). coll. Etudes et Thèses, *ORSTOM ed.* Paris.
- BOEDT, L., and VERHEYE, W. (1985). Evaluation of profile available water capacity. I. The conceptual approach. *Pédologie*, **35** : 55 - 65.
- BOURRIE, G., et G. PEDRO. (1979). La notion de pF, sa signification physico-chimique et ses implications pédogénétiques. *Science du sol.* **4** : 313 - 322.

- BRASHER, B. R., D. P. FRANZMEIER, V. VALASSIS, and S. E. DAVIDSON.** (1966). Use of saran resin to coat natural soil clods for bulk-density and water-retention measurements. *Soil Sci.* **101**, 108.
- BRAUDEAU, E.** (1987). Mesure automatique de la rétraction d'échantillons de sol non remaniés. *Sci. du sol.* **25** : 85 - 93.
- BRAUDEAU, E.** (1988a). Equation généralisée des courbes de retrait d'échantillons de sol structurés. *C. R. Acad. Sci. (série II)*. **307** : 1731 - 1734.
- BRAUDEAU, E.** (1988b). Essai de caractérisation quantitative de l'état structural d'un sol basé sur l'étude de la courbe de retrait. *C. R. Acad. Sci. (série II)*. **307** : 1933 - 1936.
- BRAUDEAU, E.** (1988c). Méthode de caractérisation pédo-hydrrique des sols basée sur l'analyse de la courbe de retrait. *Cah. ORSTOM. ser. Pédol.* **24** : 179 - 189.
- BRAUDEAU, E., et A. BRUAND.** (1993). Détermination de la courbe de retrait de la phase argileuse à partir de la courbe de retrait établie sur échantillon de sol non remanié. Application à une séquence de sols de Côte-d'Ivoire. *C. R. Acad. Sci. (série II)*. **316** : 685 - 692.
- BRAUDEAU, E., J.M. COSTANTINI, et H. COLLEUILLE.** (1996). Modelization of soil structure in the shrinkage process.(I). Measurement and modeling of soil shrinkage curve. *Soil Sci. Soc. Am. J. (à paraître)*.
- BREWER, R.** (1964). Fabric and Mineral Analysis. *J. Wiley and Sons*, New York.
- BRONSWIJK, J.J.B.** (1990). Shrinkage geometry of a heavy clay soil at various stresses. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **54** : 1500 - 1502.
- BRONSWIJK, J.J.B., and J.J. EVERS-VERMEER.** (1990). Shrinkage of Dutch clay soil aggregates. *Neth. J. Agric. Sci.* **38** : 175 - 194.
- BRONSWIJK, J.J.B.** (1991). Relation between Vertical Soil Movements and Water Content changes in cracking clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **55** : 1220 - 1226.
- BRUAND, A.** (1985). Contribution à l'étude de la dynamique de l'organisation de matériaux gonflants. Application à un matériau provenant d'un sol argilo-limoneux de l'Auxerrois. *Thèse de doctorat*, Université de Paris VII.
- BRUAND, A.** (1986). Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral. Utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau. *Science du sol.* **244** : 351 - 362.
- BRUAND, A., et R. PROST.** (1987). Effect of water content on the fabric of a soil material : an experimental approach. *J. Soil. Sci.* **38** : 461 - 472.

- BRUAND, A., E. BRAUDEAU et E. FRITSCH.** (1990). Evolution de la géométrie de l'espace poral des sols lors du passage du domaine ferrallitique au domaine ferrugineux et hydromorphe. Exemple du bassin de Booro Borotou (Cote d'Ivoire), *in structure et fonctionnement hydro-pédologique d'un petit bassin versant de savane humide*, coll. *Etudes et Thèses, ORSTOM ed.* Paris, 1990, p.137 - 145.
- CAMBEFORT, H.** (1971). Introduction à la géotechnique. *Ed. Eyrolles*, Paris.
- CASSAN, M.** (1978). Les essais in situ en mécanique des sols. Tome I : Réalisation et interprétation. *Ed. EYROLLES*, Paris.
- CHAMAYOU, H., et J.P. LEGROS.** (1989). Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la science du sol. *Presses universitaires de France*, Paris.
- CHANG, R. K., and B. P. WARKENTIN.** (1968). Volume change of compacted clay soil aggregates. *Soil Sci.* **102** : 106 - 111.
- CHAN, K.Y.** (1981). Representative sampling for bulk density in a Vertisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **45** : 668 - 669.
- CHAN, K.Y.** (1982). Shrinkage characterisic of soil clods from a grey clay under intensive cultivation. *Aust. J. Soil Res.* **20** : 65 - 68.
- COLLEUILLE, H.** (1993). Approches physique et morphologique de la dynamique structurale des sols. Application à l'étude de deux séquences pédologiques tropicales. *Thèse de doctorat*, Univ. Paris VI.
- COLLEUILLE, H., and E. BRAUDEAU.** (1996). A soil fractionation related to soil structural behaviour. *Aust. J. Soil Res.* **34** : 653 - 669.
- COQUET, Y.** (1995). Etude in situ des phénomènes de retrait-gonflement des sols. Application à deux sols tropicaux peu gonflants. *Thèse de doctorat*, Univ. Orléans, 337 p.
- DANCETTE, C.** (1973). Principales études de l'IRAT au Sénégal portant sur les caractéristiques hydriques et hydrodynamiques des sols et sur leurs aptitudes à l'irrigation. *L'Agron.Trop.*, **28** : 887 - 893.
- DAVIDSON, S. E., and J. B. PAGE.** (1956). Factors influencing swelling and shrinking in soils. *Soil Sci. Soc. Am.Proc.* **20** (3) : 321.
- DELACROIX, A., et C. PORTE.** (1996). Méthodes d'optimisation en chimie analytique. *Technique de l'ingénieur*, INDEX P 12 'Analyse et caractérisation', janvier 1996.
- DIOME, F.** (1995). Rôle de la structure du sol dans son fonctionnement hydrique. Sa quantification par la courbe de retrait. Thèse du doctorat de 3^{ème} cycle, Univ. Dakar.
- DUCHAUFOR, P.** (1991). Pédologie. *Ed. Masson*, Paris.
- FELTENS, J.** (1995). Passeur pneumatique d'échantillons. Etude, dessins et réalisation. *Unité technique*, Orstom Ile de France, 27p.

- FEODOROFF, A.** (1962). Ressuyage du sol et capacité de rétention pour l'eau. *Ann. agron.* **13** : 523 - 547.
- FIES, J. C.** (1984). Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelette : comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie au mercure. *Agronomie (Paris)* **4** : 891 - 899.
- FIES, J. C., et P. STENGEL.** (1981a). Densité texturale de sols naturels. I. Méthode de mesure. *Agronomie*, **1** (8) : 651 - 658.
- FLAVIGNY, E.,** (1991). Essais in-situ des sols gonflants. Ed. Presse ENPC Paris, du 08 au 10 octobre 1991, Aix en Provence.
- FOX, W. E.** (1964). A study of bulk-density and water in a swelling soil. *Soil Sci.* **98** : 307 - 316.
- GARNIER, P.** (1996). Détermination des caractéristiques hydrodynamiques de sols déformables par la méthode inverse. *Thèse de Doctorat*, Nancy I.
- GIRALDEZ, J. V., G. SPOSITO and C. DELGADO,** (1983a). A general soil volume change equation : I. The two-parameter model. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **47** : 419 - 422.
- GIRALDEZ, J. V., and G. SPOSITO,** (1983b). A general soil volume change equation : II. Effect of load pressure. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **47** : 422 - 425.
- GREENE - KELLY, R.,** (1971). The Shrinkage of clay soils during impregnation by polyéthylène glycols. *J. Soil. Sci* **22** : 191 - 201
- GRIMALDI, M., et D. TESSIER.** (1986). Changements des propriétés de retrait, de gonflement et de rétention d'un matériau limoneux soumis à un compactage dynamique. *Sci. Sol.* **24** : 319 - 336.
- GROENEVELT, P. H., and PARLANGE.** (1974). Thermodynamic stability of swelling soils. *Soil. Sci.* **118** : 1 - 5.
- GRÜNBERGER, O.** (1990). Precision et stabilité des mesures du rétractomètre. Limites d'utilisation et développements possibles : flux évaporatoires et retraits des éponges. *Note technique de laboratoire*, Orstom Ile de France, 26 p.
- GUERIF, J.** (1987). L'analyse de la porosité : application à l'étude du compactage des sols. 'Soil compaction regeneration'. G. MONNIER, and M. J. GOSS Ed. Balkena Rotterdam/Boston, 1 - 13.
- GUGGENHEIM, E.A.** (1967). Thermodynamics, and advanced treatment for chemist and physicists. North-Holland Publ. Co., Amsterdam.
- HAINES, W.B.** (1923). The volume-changes associated with variations of water content in soil. *J. Agr. Sci.* **13** : 296 - 310.

- HALLAIRE, V.** (1987). Retrait vertical d'un sol argileux au cours du dessèchement. Mesures de l'affaissement et conséquence structurales. *Agronomie*. **7** (8) : 631 - 637.
- HALLAIRE, V.** (1991). Une méthode d'analyse bidimensionnelle du retrait d'échantillons naturels de sol. *Science du sol*. **29** (2) : 147 -158.
- HARDY, F.** (1923). The physical significance of the shrinkage coefficient of clays and soils. *J. Agr. Sci.* **13** : 243 - 264.
- HENIN, S. R., R. GRAS and G. MONNIER.** (1969). Le profil cultural. Ed. MASSON & Cie Editeurs.
- HENIN, S.** (1976). Cours de physique du sol. TOME 1. *Ed. Doc. tech. ORSTOM*, Paris.
- HOLTZ, R.D., et W.D. KOVACS.** (1991). Introduction à la géotechnique. *Ed. de l'Ecole Polytechnique de Montréal*, Montréal.
- JAMISON, V.C., and G.A. THOMPSON.** (1967). Layer Thickness Changes in a Clay-Rich Soil in relation to Soil Water Content Changes. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* **31** : 441 -444
- JAYAWARDANE, N.S., W.S. MEYER, and H.D. BARRS.** (1983). Moisture measurement in a swelling clay soil using Neutron moisture meters. *Aust. J. Soil Res.*, **122** : 109 - 117.
- JAYAWARDANE, N.S., and E.L. GREACE.** (1987). The nature of swelling in Soils. *Aust. J. soil Res.* **25** : 107 - 113.
- JOHNSTON, J.R., and H.G. HILL.** (1944). A study of the shrinking and swelling properties of rendzina soils. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.* **9** : 24 - 29.
- KIM, D.J., H. VEREECKEN, J. FEYEN, D. BOELS, and J.J.B. BRONSWIJK.** (1992). On the characterisation of properties of an unripe marine clay soil. I. Shrinkage processes of an unripe marine clay soil in relation to physical ripening. *Soil.Sci.* **153** : 471 - 481.
- LANCHON, R.** (1983). Cours de laboratoire. Granulats, bétons et sols. Tome1. *Ed.Desforges*, Paris.
- LARVY DELARIVIERE, J.** (1997). Analyse rétractométrique. Notice pratique d'utilisation. *Note technique de laboratoire*, Orstom Ile de France, 36 p.
- LAURITZEN, C.W, and A. STEWART.** (1941). Soil volume changes and accompanying moisture and pore-space relationships. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.* **6** : 113 - 116.
- LAURITZEN, C.W.** (1948). Apparent specific volume and shrinkage characteristics of soils materials. *Soil. Sci.* **65** : 155 - 179.
- LOGEAIS, L.** (1990). Tassement de fondation dus à la sécheresse. Sycodés informations, n°8, décembre 1990, janvier-février 1991, p. 8-14.

- LOZET, J., et C. MATHIEU. (1990). Dictionnaire de science du sol. *Technique et Documenta-tion Lavoisier*, Paris.
- MAPANGUI, A. (1992). Etude de l'organisation et du comportement des sols ferrallitiques argileux de la vallée du Niari (Congo). Conséquence sur l'évolution physique sous culture du manioc en mécanisé depuis quinze ans. *Thèse de doctorat*, Univ.Paris VI.
- MARIOTTI, M. (1988). Le gonflement des sols argileux et la pathologie des ouvrages. Nouvelles approches en mécanique des sols. *Ed. ENPC Paris*, du 18-octobre-1988, Paris.
- MASON, T.G. (1922). *West. Ind Bul.* **19** : 125.
- MATHIEU, J.P., A. KASTLER, et P. FLEURY. (1985). Dictionnaire de Physique. *Masson et Eyrolles*, Paris.
- Mc GARRY, D., and I.G. DANIELLS. (1987). Shrinkage curve indices to quantify cultivation effects on soil structure of a Vertisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **51** : 1575 - 1580.
- Mc GARRY, D., and K.W.J. MALAFANT. (1987). The analysis of volume change in unconfined units of soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **51** : 290 - 297.
- Mc INTYRE, D.S., and J. LOVEDAY. (1968). Problems of determination of soil density and moisture properties from natural clods. *Soil Sci.* **105** : 232 - 236.
- Mc INTYRE, D.S., C.L. WATSON, and J. LOVEDAY. (1982). Swelling of a clay Soil Profile under Pounding. *Aust. J. Soil Res.* **20** : 71 - 79.
- Mc INTYRE, D.S., J. LOVEDAY, and C.L. WATSON. (1982 a). Field studies of water and salt movement in an irrigatedswelling clay soil. I. Infiltration during ponding. *Aust. J. Soil Res.* **20** : 81 - 90.
- Mc INTYRE, D.S., J. LOVEDAY, and C.L. WATSON. (1982 b). Field studies of water and salt movement in an irrigated swelling clay soil. II. Profile hydrology during ponding. *st. J. Soil Re Aus.* **20** : 91 - 99.
- Mc INTYRE, D.S., C.L. WATSON., and J. LOVEDAY. (1982 c). Swelling of a clay soil profile under ponding. *Aust. J. Soil Res.* **20** : 71 - 79.
- MILLER, S. A., and A. P. MAZURAK. (1955). An evaluation of permanent-wilting percentage. 15 atmosphere moisture percentage and hygroscopic coefficient of three soils in Eastern Nebraska. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* **19** : 260 - 263.
- MITCHELL, A.R. (1987). Field elevation changes to estimate profile soil water. Proc. International Con on Measurement of soil and Plant Water Status, *Logan, UT July 6* : 6-10.
- MITCHELL, A.R. (1991). Soil surface shrinkage to estimate profile soil water. *Irrig. Sci.* **12** : 1-6.

- MITCHELL, A.R., and M. Th. Van GENUCHTEN. (1992). Shrinkage of bare and cultivated. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **56** : 1036 - 1042.
- MITCHELL, A.R. (1992). Shrinkage terminology : escape from normaly. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **56** : 993 - 994.
- MONNIER, G., P. STENGEL et J. C. FIES. (1973). Une méthode de mesure de la densité de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol, *Ann. Agron.*, **24** (5) : 533 - 545.
- MOUROUX, P., P. MARGRON, J.C. PINTE. (1988). La construction économique sur sols gonflants. *Manuels et Méthodes n°14, Ed. du BRGM*, Orléans.
- MUSY, A., et M. SOUTTER. (1991). Physique du sol. *Ed. Presses polytechniques et universitaires Romandes*, Lausanne.
- NAGPAL, N. K., L. BOERSMA and V. F. WRIGHT. (1972). Pore size distribution of soils from mercury intrusion porosimeter data. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.* **36** : 264 - 267.
- NEULLY, M., et CETAMA. (1993). (Commission d'Etablissement des Méthodes d'Analyses du commissariat à l'énergie atomique). Modélisation et estimation des erreurs de mesure. *Ed. Lavoisier, Tec et Doc*, Paris.
- NEWMAN, A. C. D., and K. H. PERRINS. (1977). Soils in Northamptonshire I : Sheet SP66 (Long Buckby). *Soil Surv. Rec.*, Harpenden.
- NEWMAN, A. C. D., and A. J. THOMASSON. (1979). Rothamsted studies of soil structure : III. Pore size distributions and shrinkage processes. *J. Soil Sci.* **30** : 415- 439.
- NIANG, A. (1995). Caractérisation pédohydrrique des sites d'essai du programme Jachère au Sénégal, à Soukorong et Sareyorobana. *Mémoire d'ingénieur en géologie*, Univ. Dakar.
- OFER, Z. (1981). Instruments for laboratory and in-situ measurements of the lateral swelling pressure of expansive clay, *Geotechnical testing journal.* **4** : 177-182.
- PARATTE, P.A, et P. ROBERT (1986). Systèmes de mesure. *Ed. Dunod*, Paris.
- PHILIPPONNAT, G. (1990). Retrait-gonflement des argiles, proposition de méthodologie. ENPC Paris, du 11 au 13 décembre 1990, Paris.
- PEDRO, G. (1987). Géochimie, minéralogie des sols. *Cah. ORSTOM. ser. Pédol.* **3** : 169 - 186.
- PERRIER, E. (1994). Structure géométrique et fonctionnement hydrique des sols. *Thèse de doctorat*, Univ. Paris VI.
- POSNIAK (1920). *Principles of Gen. Physiol.*, pp. 5.
- REEVE, M. J., and D. G. M. HALL. (1978). Shrinkage of clayey subsoils. *J. Soil. Sci.* **29** : 315 -323.

- ROBAIN, H., et P. CURMI.** (1986). Rôle de la structure pédologique sur le comportement hydrique du sol aux faibles pF. *C.R. Acad. Sc.Paris, (Série II)* **6** : 509 - 514.
- ROBERT, A.** (1991). Construire sur les sols gonflants et rétractables, tunnels et soulèvement. *Presse ENPC Paris*, du 08-10 octobre 1988.
- ROSENBOHM** (1920). (Cited by WILSON). *Third Rept. Colloid Chem.*, pp. 59.
- SALA, G. H., et D. TESSIER.** (1993). Importance de l'état énergétique de l'eau sur l'aptitude au tassement de matériaux argileux non saturés. *C.R. Acad. Sc.Paris, (Série II)* **316** : 231 - 236.
- SCHAFER, W., and M. J. SINGER.** (1976). A new method of measuring shrink-swell potentiel using soil pastes. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **40** : 805 - 806.
- SIBLEY, J.W., and D. J. WILLIAMS.** (1989). A Procedure for Determining Volumetric Shrinkage of an Unsaturated. *Soil.Geotech. Testing. J.* **12** : 181 - 187.
- SOLTNER, D.** (1991). Les bases de la production végétale. TOME 1, Le sol. *Collection sciences et techniques agricoles*, Ste-Gemmes-sur-Loire.
- SPOSITO. G., and J.V. GIRALDEZ.** (1976). Thermodynamic stability and the law of corresponding states in swelling soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **40** : 352 - 358.
- STIRK, G. B.** (1954). Some aspects of soil shrinkage and the effect of craking upon water entry into the soil. *Aust. J. Agr. Res.* **5** : 279 - 290.
- STENGEL, P.** (1981). Relation entre le retrait et le potentiel de l'eau dans des mélanges smectite-limon. *C.R. Acad. Sc.Paris, (Série II)* **293** : 465 - 468.
- SYCODES Informations** .(1991).Tassement de fondations dus a la sécheresse.Dec. 1990 n°8.
- TARIQ, A. R., and D. S. DURNFORD.** (1993). Soil volumetric shrinkage measurements : a simple method. *Soil Science.* **155** : 325 - 330.
- TARIQ, A. R., and D. S. DURNFORD.** (1993). Analytical Volume Change Model for Swelling Clay Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **57** : 1183 - 1187.
- TANDY, J.C., M. GRIMALDI, C. GRIMALDI, et D.TESSIER.** (1990). Mineralogical and textural changes in french Guyana oxisols and their relation with microaggregation. *Soil Micromorphology* : 191 - 198.
- TEMPANY, H.A.** (1917). The shrinkage of soils. *J. Agr. Sci.* **8** : 312 - 333.
- TERZAGHI.** (1967). Soil Mechanics in Engineering Practise, 2° Ed., *John Wiley and Sons*, New-Yorkp, p 729.
- TESSIER, D.** (1978). Etude de l'organisation des argiles calciques. Evolution au cours de la dessiccation. *Ann. Agron.* **29** (4) : 319 - 355.

- TESSIER, D., et J. BERRIER. (1979). Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols. *Science du sol.* **1** : 67 - 82.
- TESSIER, D., G. PEDRO, et L. CAMARA. (1980). Sur le comportement hydrique et l'évolution de l'organisation des argiles au cours de la dessiccation et de la réhumectation. *C.R. Acad. Sc. (Série D)* **290** : 1169 - 1172.
- TESSIER, D. (1980). Sur la signification de la limite de retrait dans les argiles. *C.R. Acad.Sci. (Série D)* **291** : 377 - 380.
- TESSIER, D., et G. PEDRO. (1980). Sur les propriétés de gonflement des argiles dans les sols. *C.R. Acad. Sci. (Série D)* **291** : 461 - 464.
- TESSIER, D. (1984) Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. *Thèse de doctorat, université Paris VII.Ed.INRA*, 361p.
- TOPP, G. C., and J. L. DAVIS. (1985). Time-domain reflectometry (TDR) and its application to irrigation scheduling. *in* D. Hillel, ed. *Advances in irrigation* vol. **3** : 107 - 127.
- TOWNER, G.D. (1987). The Mechanics of Cracking of Drying Clay. *J. Agric. Engng. Res.* **36** : 115 - 124.
- TOWNER, G.D. (1986). Anisotropic shrinkage of clay cores, and the interpretation of field observations of vertical soil movement. *J. Soil. Sci.* **37** : 363 - 371.
- UTOMO W. H., and A. R. DEXTER (1981). Soil friability. *J. Soil. Sci.* **32** : 203 - 213.
- WATTS, F. (1908). Travaux publiés dans : The estimation of certain physical properties of soil. *West. Ind. Bul.* **12** : 50 - 69.
- WILDSON, B.H. (1921). Mem. Dept. Ag. India, Ag. Res. Inst. Pusa. *Chem. Ser.* **6** : 3.
- WIRES, K.C., W.D. ZEBCHUK, and G.C. TOPP. (1987). Pore volume changes in a structured silt-loam soil during drying. *Can. J. Soil Sci.* **67** : 905 - 917.
- YAALON, D. H., and D. KALMAR. (1972). Vertical movement in an undisturbed soil continuous measurement of swelling and shrinkage with a sensitive apparatus *Geoderma.* **8** : 231 - 240.
- YONG R. F., and B. P. WARKENTIN. (1975). Soil properties and behaviour. *Ed. Elsevier Scientific Publishing Company.* coll. 'Developements in geotechnical engineering, New York.
- YULE, D.F., and J.T. RITCHIE. (1980a) Soil shrinkage relationships of Texas Vertisols : I. Small cores. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **44** : 1285 - 1291.
- YULE, D.F., and J.T. RITCHIE. (1980 b). Soil shrinkage relationships of Texas Vertisols : II. Large cores. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* **44** : 1291 - 1295.

ANNEXES

ANNEXE 1 :

Validation des mesurages de hauteur et diamètre exécutés par le rétractomètre

- Etude statistique de la précision des mesures
- Etude de la répétabilité.

Précision du rétractomètre

	Barriere 1 (v)	Barriere 2 (v)	B1 + B2(v)	B1 + B2 (µm)	Spot (v)	Spot (µm)
page 1 (34x34)						
moyenne =	4.597	4.114	8.711	21516.392	1.814	4534.702
écart type =	0.165	0.178	0.016	39.689	0.012	28.828
écartmoyen =	0.129	0.141	0.013	30.888	0.009	22.683
minimum =	4.08	3.647	8.641	21343.27	1.781	4452.5
maximum =	4.994	4.632	8.746	21602.62	1.846	4615
MAX-MIN	0.914	0.985	0.105	259.35	0.065	162.5
page 2 (38x38)						
moyenne =	3.950	3.136	7.085	17500.803	0.314	784.906
écart type =	0.181	0.183	0.005	11.970	0.007	17.966
écartmoyen =	0.146	0.148	0.004	9.558	0.006	14.176
minimum =	3.386	2.681	7.072	17467.84	0.293	732.5
maximum =	4.393	3.688	7.099	17534.53	0.333	832.5
MAX-MIN	1.007	1.007	0.027	66.69	0.04	100
page 3 (42x42)						
moyenne =	2.891	3.354	6.245	15424.468	-0.467	-1166.930
écart type =	0.281	0.280	0.004	8.975	0.005	12.485
écartmoyen =	0.223	0.222	0.003	7.422	0.003	8.398
minimum =	1.841	2.771	6.234	15397.98	-0.491	-1227.5
maximum =	3.472	4.409	6.255	15449.85	-0.458	-1145
MAX-MIN	1.631	1.638	0.021	51.87	0.033	82.5
page 4 (42x42)						
moyenne =	2.821	3.408	6.229	15385.527	-0.432	-1079.738
écart type =	0.262	0.262	0.003	8.141	0.005	13.564
écartmoyen =	0.205	0.205	0.003	6.471	0.004	9.099
minimum =	1.831	2.877	6.218	15358.46	-0.456	-1140
maximum =	3.356	4.413	6.244	15422.68	-0.421	-1052.5
MAX-MIN	1.525	1.536	0.026	64.22	0.035	87.5
page 5 (42x42)						
moyenne =	3.128	3.106	6.234	15397.052	-0.440	-1100.127
écart type =	0.200	0.199	0.003	8.510	0.005	13.420
écartmoyen =	0.163	0.163	0.003	6.714	0.004	9.175
minimum =	2.488	2.723	6.216	15355.75	-0.45	-1125
maximum =	3.512	3.74	6.243	15420.21	-0.421	-1052.5
MAX-MIN	1.024	1.017	0.027	64.46	0.029	72.5
page 6 (46x46)						
moyenne =	2.948	2.450	5.398	13332.233	-1.265	-3161.747
écart type =	0.188	0.185	0.004	10.931	0.005	13.690
écartmoyen =	0.152	0.149	0.004	9.116	0.004	10.845
minimum =	2.128	2.021	5.387	13305.89	-1.28	-3200
maximum =	3.387	3.282	5.41	13362.7	-1.248	-3120
MAX-MIN	1.259	1.261	0.023	56.81	0.032	80
page 7 (50x50)						
moyenne =	1.903	1.871	3.774	9321.966	-2.912	-7279.958
écart type =	0.235	0.244	0.011	26.764	0.005	13.244
écartmoyen =	0.188	0.195	0.007	18.343	0.004	10.217
minimum =	1.119	1.33	3.761	9289.67	-2.933	-7332.5
maximum =	2.448	2.72	3.839	9482.33	-2.901	-7252.5
MAX-MIN	1.329	1.39	0.078	192.66	0.032	80
page 8 (54x54)						
moyenne =	4.986	4.920	9.906	24467.117	3.257	8141.475
écart type =	0.041	0.098	0.099	243.780	0.012	29.978
écartmoyen =	0.019	0.080	0.081	198.859	0.009	23.430
minimum =	4.643	4.583	9.579	23660.13	3.207	8017.5
maximum =	4.996	4.996	9.992	24680.24	3.294	8235
MAX-MIN	0.353	0.413	0.413	1020.11	0.087	217.5

ANNEXE 2 :

Tableau des données rétractométriques :

- Echantillons reconstitués de quatre types de sol différents
- Taille des échantillons : **(53x30mm)**
- Retrait volumique calculé à partir de la mesure du **diamètre**
- Résultats pour les deux modèles utilisés **MRS** et **MD**.

(53x30) reconstitué ;
mes.diamètre ; mod. MRS

nom	wA	wB	wC	wE	VA	Vs	Kno
FA3021d	0.0968	0.1184	0.1280	0.1600	0.7171	0.7248	0.6144
FA3022d	0.1041	0.1132	0.1308	0.1639	0.7015	0.7199	0.6615
FA3023d	0.0953	0.1183	0.1294	0.1613	0.7012	0.7211	0.6727
FA3024d	0.0826	0.1196	0.1287	0.1698	0.6930	0.7025	0.5815
FA3025d	0.0755	0.1017	0.1100	0.1436	0.7019	0.7131	0.6358
FA3026d	0.1141	0.1249	0.1445	0.1660	0.7076	0.7187	0.5732
FA3027d	0.0902	0.1136	0.1229	0.1550	0.7078	0.7183	0.6366
FA3028d	0.0939	0.1147	0.1265	0.1734	0.7070	0.7186	0.5757
moyenne	0.0940	0.1156	0.1276	0.1616	0.7047	0.7171	0.6189
écart-type	0.0112	0.0063	0.0089	0.0087	0.0065	0.0063	0.0365
variance	1E-04	4E-05	8E-05	8E-05	4E-05	4E-05	1.3E-03
FU3011d	0.0188	0.0514	0.0668	0.0845	0.6970	0.7110	0.3643
FU3012d	0.0312	0.0540	0.0640	0.0817	0.6910	0.6942	0.3196
FU3013d	0.0195	0.0384	0.0709	0.0889	0.6870	0.6999	0.3377
FU3014d	0.0214	0.0315	0.0825	0.1023	0.6941	0.6962	0.3720
FU3015d	0.0350	0.0487	0.0626	0.1099	0.6977	0.7022	0.3356
FU3017d	0.0218	0.0470	0.0638	0.0949	0.6874	0.6997	0.3521
FU3018d	0.0465	0.0507	0.0622	0.1000	0.6927	0.7017	0.3797
moyenne	0.0277	0.0460	0.0675	0.0946	0.6924	0.7007	0.3516
écart-type	0.0095	0.0075	0.0067	0.0094	0.0039	0.0050	0.0201
variance	9E-05	6E-05	5E-05	9E-05	2E-05	2E-05	4.1E-04
LM3012d	0.0265	0.0341	0.0463	0.0873	0.6300	0.6330	0.3345
LM3013d	0.0162	0.0240	0.0537	0.0847	0.6365	0.6467	0.3815
LM3014d	0.0214	0.0417	0.0523	0.0860	0.6469	0.6524	0.3461
LM3015d	0.0204	0.0492	0.0647	0.0419	0.6457	0.6520	0.3342
LM3016d	0.0178	0.0302	0.0537	0.0785	0.6129	0.6177	0.3492
LM3017d	0.0131	0.0440	0.0507	0.0832	0.6129	0.6177	0.3203
LM3018d	0.0143	0.0241	0.0466	0.0744	0.6306	0.6440	0.3274
moyenne	0.0185	0.0353	0.0526	0.0766	0.6308	0.6376	0.3419
écart-type	0.0043	0.0092	0.0057	0.0147	0.0129	0.0140	0.0186
variance	2E-05	8E-05	3E-05	2E-04	2E-04	2E-04	3.5E-04
AG3011d	0.0712	0.1065	0.1909	0.2733	0.5390	0.6975	0.9794
AG3012d	0.0855	0.1040	0.2447	0.2931	0.5303	0.7118	0.9874
AG3013d	0.0759	0.1126	0.1925	0.2585	0.5325	0.6067	0.9733
AG3014d	0.0782	0.1034	0.1919	0.2365	0.5090	0.6651	1.0643
AG3015d	0.0821	0.0950	0.2047	0.2314	0.5099	0.6312	0.9661
AG3016d	0.0623	0.1174	0.1890	0.2412	0.5427	0.7858	0.9733
AG3018d	0.0733	0.0987	0.1716	0.2241	0.5485	0.6974	0.9672
moyenne	0.0755	0.1054	0.1979	0.2512	0.5303	0.6851	0.9873
écart-type	0.0071	0.0071	0.0211	0.0231	0.0143	0.0543	0.0321
variance	5E-05	5E-05	4E-04	5E-04	2E-04	3E-03	1.0E-03

(53x30) reconstitué ;
mes. diamètre ; mod.MD

nom	w1	w2	w3	V1	Vs	Kre	Kno	Kst	Klm
FA3021d	0.1154	0.1325	0.2841	0.7192	0.7248	0.0055	0.6144	0.0045	0.3446
FA3022d	0.1118	0.1355	0.2637	0.7064	0.7199	0.0390	0.6615	0.0488	0.3420
FA3023d	0.1145	0.1340	0.2659	0.7044	0.7211	0.0083	0.6727	0.0561	0.3409
FA3024d	0.1149	0.1338	0.2691	0.6948	0.7025	0.0048	0.5815	0.0116	0.2304
FA3025d	0.0977	0.1149	0.2546	0.7039	0.7131	0.0001	0.6358	0.0169	0.3123
FA3026d	0.1238	0.1468	0.2966	0.7113	0.7187	0.0434	0.5732	0.0297	0.3575
FA3027d	0.1104	0.1276	0.2725	0.7108	0.7183	0.0414	0.6366	0.0125	0.3762
FA3028d	0.1121	0.1317	0.2750	0.7090	0.7186	0.0003	0.5757	0.0256	0.3667
moyenne	0.1126	0.1321	0.2727	0.7075	0.7171	0.0179	0.6189	0.0257	0.3338
écart_type	0.0068	0.0083	0.0121	0.0066	0.0063	0.0183	0.0365	0.0172	0.0431
variance	4.6E-05	6.9E-05	1.5E-04	4.4E-05	4.0E-05	3E-04	0.0013	3.0E-04	0.0019
FU3011d	0.0471	0.0683	0.2435	0.6987	0.7110	0.0008	0.3643	0.0398	0.3973
FU3012d	0.0519	0.0656	0.2383	0.6916	0.6942	0.0011	0.3196	0.0058	0.3643
FU3013d	0.0382	0.0722	0.2315	0.6913	0.6999	0.0814	0.3377	0.0336	0.3741
FU3014d	0.0312	0.0815	0.2424	0.6956	0.6962	0.0001	0.3720	0.0307	0.3644
FU3015d	0.0484	0.0674	0.2346	0.6997	0.7022	0.0678	0.3356	0.0031	0.2919
FU3017d	0.0449	0.0665	0.2347	0.6899	0.6997	0.0363	0.3521	0.0330	0.4079
FU3018d	0.0504	0.0669	0.2414	0.6944	0.7017	0.0809	0.3797	0.0217	0.3315
moyenne	0.0446	0.0698	0.2381	0.6945	0.7007	0.0383	0.3516	0.0240	0.3616
écart_type	0.0069	0.0052	0.0042	0.0035	0.0050	0.0354	0.0201	0.0133	0.0366
variance	4.7E-05	2.7E-05	1.8E-05	1.2E-05	2.5E-05	0.001	4E-04	1.8E-04	1.3E-03
LM3012d	0.0339	0.0497	0.1805	0.6312	0.6330	0.0439	0.3345	0.0015	0.2462
LM3013d	0.0240	0.0571	0.1799	0.6408	0.6467	0.1151	0.3815	0.0224	0.4043
LM3014d	0.0399	0.0551	0.1954	0.6479	0.6524	0.0039	0.3461	0.0140	0.5370
LM3015d	0.0487	0.0723	0.2052	0.6473	0.6520	0.0179	0.3342	0.0169	0.3906
LM3016d	0.0292	0.0551	0.1864	0.6135	0.6177	0.0290	0.3492	0.0242	0.3189
LM3017d	0.0418	0.0523	0.1713	0.6132	0.6177	0.0000	0.3203	0.0180	0.2744
LM3018d	0.0235	0.0510	0.1868	0.6349	0.6440	0.1141	0.3274	0.0352	0.4242
moyenne	0.0344	0.0561	0.1865	0.6327	0.6376	0.0463	0.3419	0.0189	0.3708
écart_type	0.0088	0.0070	0.0103	0.0134	0.0140	0.0453	0.0186	0.0095	0.0922
variance	7.8E-05	5.0E-05	1.1E-04	1.8E-04	1.9E-04	0.002	3E-04	9.1E-05	8.5E-03
AG3011d	0.1049	0.2256	0.3344	0.6344	0.6975	0.3835	0.9794	0.5457	0.5076
AG3012d	0.1032	0.2126	0.3191	0.6760	0.7118	0.3833	0.9874	0.5894	0.5369
AG3013d	0.1147	0.2065	0.3232	0.6062	0.6067	0.3509	0.9733	0.5248	0.4652
AG3014d	0.0929	0.2106	0.2549	0.6101	0.6651	0.4695	1.0643	0.7234	0.6905
AG3015d	0.0883	0.2159	0.2887	0.6174	0.6312	0.2357	0.9661	0.5612	0.4100
AG3016d	0.0879	0.2230	0.2439	0.6336	0.7858	0.3062	0.9733	0.6395	0.5972
AG3018d	0.0881	0.1935	0.2800	0.6238	0.6974	0.3263	0.9672	0.5100	0.3329
moyenne	0.0971	0.2125	0.2920	0.6288	0.6851	0.3508	0.9873	0.5849	0.5058
écart_type	0.0097	0.0099	0.0324	0.0217	0.0543	0.0677	0.0321	0.0692	0.1096
variance	9.5E-05	9.9E-05	1.0E-03	4.7E-04	2.9E-03	4.6E-03	1E-03	4.8E-03	1.2E-02

ANNEXE 3 :

Tableau des données rétractométriques :

- Echantillons reconstitués de quatre types de sol différents
- Taille des échantillons : **(53x30mm)**
- Retrait volumique calculé à partir de la mesure du **hauteur**
- Résultats pour les deux modèles utilisés **MRS** et **MD**.

(53x30) reconstitué ;
mes.hauteur ; mod.MRS

nom	wA	wB	wC	wE	VA	Vs	Kno
2FA3021h	0.1033	0.1125	0.1364	0.1705	0.7180	0.7259	0.4079
2FA3022h	0.1000	0.1125	0.1483	0.1856	0.7016	0.7053	0.4141
2FA3023h	0.0820	0.1006	0.1306	0.1483	0.7111	0.7232	0.4357
2FA3024h	0.0883	0.1138	0.1397	0.1704	0.6955	0.7019	0.4249
2FA3025h	0.0790	0.0940	0.1113	0.1501	0.6935	0.7017	0.4471
2FA3026h	0.1144	0.1240	0.1426	0.1766	0.7079	0.7146	0.4475
2FA3027h	0.0919	0.1060	0.1326	0.1678	0.7079	0.7134	0.4144
2FA3028h	0.0820	0.1036	0.1253	0.1600	0.7083	0.7161	0.4202
moyenne	0.0926	0.1084	0.1334	0.1662	0.7055	0.7128	0.4265
écart-type	0.0124	0.0093	0.0114	0.0128	0.0081	0.0092	0.0143
variance	1.3E-04	7.6E-05	1.1E-04	1.4E-04	5.8E-05	7.4E-05	2.1E-04
2FU3011h	0.0226	0.0446	0.0730	0.1142	0.6972	0.6990	0.1928
2FU3012h	0.0432	0.0563	0.0708	0.1135	0.6915	0.6956	0.2102
2FU3013h	0.0244	0.0455	0.0700	0.1391	0.6873	0.6894	0.1922
2FU3014h	0.0243	0.0418	0.0789	0.1009	0.6945	0.6968	0.1918
2FU3015h	0.0350	0.0586	0.0827	0.1140	0.6962	0.6969	0.1764
2FU3016h	0.0271	0.0451	0.0615	0.0906	0.6872	0.6912	0.2071
2FU3017h	0.0746	0.0834	0.0709	0.1545	0.6873	0.6878	0.1649
2FU3018h	0.0266	0.0302	0.0596	0.1193	0.6925	0.6937	0.1814
moyenne	0.0347	0.0507	0.0709	0.1183	0.6917	0.6938	0.1896
écart-type	0.0175	0.0159	0.0073	0.0202	0.0041	0.0040	0.0141
variance	2.7E-04	2.2E-04	5.3E-05	3.6E-04	1.5E-05	1.4E-05	2.0E-04
2LM3011h	0.0173	0.0239	0.0277	0.0547	0.6428	0.6470	0.2268
2LM3012h	0.0061	0.0149	0.0253	0.0502	0.6281	0.6311	0.2319
2LM3013h	0.0034	0.0240	0.0318	0.0601	0.6365	0.6394	0.2094
2LM3014h	0.0089	0.0120	0.0162	0.0565	0.6471	0.6516	0.2492
2LM3015h	0.0140	0.0195	0.0272	0.0349	0.6456	0.6518	0.2185
2LM3016h	0.0127	0.0205	0.0230	0.0433	0.6233	0.6279	0.2027
2LM3018h	0.0189	0.0305	0.0612	0.0902	0.6296	0.6340	0.1814
moyenne	0.0116	0.0207	0.0303	0.0557	0.6361	0.6404	0.2171
écart-type	0.0057	0.0062	0.0144	0.0174	0.0094	0.0099	0.0203
variance	2.8E-05	3.3E-05	1.8E-04	2.6E-04	7.5E-05	8.3E-05	4.1E-04
2AG3011h	0.0863	0.1238	0.2088	0.2576	0.5468	0.6116	0.5018
2AG3012h	0.0749	0.0998	0.1867	0.2693	0.5343	0.6085	0.5322
2AG3013h	0.0864	0.1069	0.2078	0.2563	0.5628	0.6372	0.5118
2AG3014h	0.0983	0.1165	0.1961	0.2498	0.5144	0.5700	0.5175
2AG3015h	0.0858	0.1059	0.2086	0.2529	0.5200	0.5919	0.5499
2AG3016h	0.0750	0.1036	0.1931	0.2643	0.5439	0.6336	0.5499
2AG3017h	0.0773	0.1157	0.2026	0.2500	0.5685	0.6669	0.6061
2AG3018h	0.0715	0.1007	0.2007	0.2448	0.5443	0.6482	0.6605
moyenne	0.0819	0.1091	0.2006	0.2556	0.5419	0.6210	0.5537
écart-type	0.0089	0.0086	0.0081	0.0081	0.0188	0.0315	0.0505
variance	6.9E-05	6.5E-05	5.7E-05	5.7E-05	3.1E-04	8.7E-04	2.6E-03

(53x30) reconstitué ;
mes.hauteur ; mod.MD

nom	w1	w2	w3	V1	Vs	Kre	Kno	Kst	Klm
2FA3021h	0.1123	0.1394	0.0358	0.7187	0.7259	0.0808	0.4079	0.0171	0.6958
2FA3022h	0.1123	0.1497	0.0289	0.7020	0.7053	0.0307	0.4141	0.0069	0.6836
2FA3023h	0.0991	0.1324	0.0000	0.7121	0.7232	0.0577	0.4357	0.0287	0.7175
2FA3024h	0.1115	0.1433	0.0491	0.6964	0.7019	0.0348	0.4249	0.0000	0.6690
2FA3025h	0.0923	0.1161	0.0323	0.6939	0.7017	0.0294	0.4471	0.0126	0.6763
2FA3026h	0.1236	0.1470	0.0222	0.7088	0.7146	0.0994	0.4475	0.0059	0.6974
2FA3027h	0.1052	0.1364	0.0135	0.7086	0.7134	0.0560	0.4144	0.0000	0.7039
2FA3028h	0.1016	0.1289	0.0056	0.7087	0.7161	0.0235	0.4202	0.0127	0.7080
moyenne	0.1072	0.1367	0.0234	0.7062	0.7128	0.0515	0.4265	0.0105	0.6940
écart-type	0.0091	0.0102	0.0154	0.0077	0.0086	0.0255	0.0143	0.0089	0.0154
variance	8.3E-05	1.04E-04	2E-04	6.0E-05	7.38E-05	6.5E-04	2.1E-04	8.0E-05	2.4E-04
2FU3011h	0.0431	0.0758	0.0193	0.6972	0.6990	0.0000	0.1928	0.0003	0.6856
2FU3012h	0.0553	0.0742	0.0358	0.6916	0.6956	0.0144	0.2102	0.0099	0.6689
2FU3013h	0.0447	0.0536	0.0251	0.6876	0.6894	0.0147	0.1922	0.0000	0.6725
2FU3014h	0.0406	0.0803	0.0666	0.6945	0.6968	0.0000	0.1918	0.0029	0.6526
2FU3015h	0.0578	0.0838	0.0239	0.6962	0.6969	0.0000	0.1764	0.0000	0.6807
2FU3016h	0.0445	0.0638	0.0188	0.6878	0.6912	0.0300	0.2071	0.0084	0.6760
2FU3017h	0.0836	0.0705	0.0151	0.6874	0.6878	0.0112	0.1649	0.0017	0.6771
2FU3018h	0.0302	0.0623	0.0084	0.6926	0.6937	0.0199	0.1814	0.0000	0.6879
moyenne	0.0500	0.0705	0.0266	0.6919	0.6938	0.0113	0.1896	0.0029	0.6752
écart-type	0.0150	0.0094	0.0169	0.0037	0.0037	0.0102	0.0141	0.0038	0.0104
variance	2.3E-04	8.88E-05	3E-04	1.37E-05	1.38E-05	1.0E-04	2.0E-04	1.4E-05	1.1E-04
2LM3011h	0.0231	0.0318	0.0598	0.6430	0.6470	0.0340	0.2268	0.0111	0.6084
2LM3012h	0.0132	0.0295	0.0327	0.6281	0.6311	0.0000	0.2319	0.0027	0.6105
2LM3013h	0.0210	0.0358	0.0683	0.6365	0.6394	0.0000	0.2094	0.0039	0.5978
2LM3014h	0.0116	0.0235	0.0588	0.6472	0.6516	0.0543	0.2492	0.0081	0.6138
2LM3015h	0.0189	0.0282	0.0796	0.6457	0.6518	0.0339	0.2185	0.0209	0.6000
2LM3016h	0.0198	0.0252	0.0693	0.6235	0.6279	0.0312	0.2027	0.0165	0.5845
2LM3018h	0.0297	0.0636	0.0614	0.6298	0.6340	0.0190	0.1814	0.0121	0.5689
moyenne	0.0196	0.0340	0.0614	0.6363	0.6404	0.0246	0.2171	0.0108	0.5977
écart-type	0.0056	0.0127	0.0135	0.0087	0.0091	0.0183	0.0203	0.0061	0.0149
variance	3.2E-05	1.60E-04	2E-04	7.52E-05	8.32E-05	3.3E-04	4.1E-04	3.7E-05	2.2E-04
2AG3011h	0.1081	0.2292	0.1673	0.5483	0.6116	0.0697	0.5018	0.2380	0.5511
2AG3012h	0.0893	0.2213	0.1189	0.5351	0.6085	0.0563	0.5322	0.2057	0.5222
2AG3013h	0.1001	0.2281	0.1680	0.5638	0.6372	0.0697	0.5118	0.2128	0.5573
2AG3014h	0.1037	0.2185	0.1011	0.5150	0.5700	0.1169	0.5175	0.2211	0.4982
2AG3015h	0.0975	0.2271	0.1721	0.5222	0.5919	0.1861	0.5499	0.2223	0.3532
2AG3016h	0.0908	0.2256	0.2272	0.5469	0.6336	0.1861	0.5499	0.2223	0.5100
2AG3017h	0.0901	0.2224	0.2169	0.5700	0.6669	0.1171	0.6061	0.2295	0.5333
2AG3018h	0.0885	0.2218	0.1672	0.5466	0.6482	0.1332	0.6605	0.2218	0.5033
moyenne	0.0960	0.2243	0.1673	0.5435	0.6210	0.1169	0.5537	0.2217	0.5036
écart-type	0.0070	0.0035	0.0400	0.0176	0.0295	0.0474	0.0505	0.0091	0.0603
variance	4.9E-05	1.25E-05	2E-03	3.1E-04	8.7E-04	2.2E-03	3E-03	8.3E-05	3.6E-03

ANNEXE 4 :

Tableau des données rétractométriques :

- Echantillons reconstitués de quatre types de sol différents
- Taille des échantillons : **(53x40mm)**
- Retrait volumique calculé à partir de la mesure du **diamètre**
- Résultats pour les deux modèles utilisés **MRS** et **MD**.

(53x40) diamètre ; MD

nom	w1	w2	w3	V1	Vs	Kre	Kno	Kst	Klm
FA4021d	0.1131	0.1396	0.2524	0.6899	0.6983	0.0089	0.5537	0.0140	0.7099
FA4022d	0.1145	0.1365	0.2623	0.6971	0.7139	0.0023	0.7055	0.0446	0.8570
FA4023d	0.0885	0.1396	0.3654	0.6899	0.7788	0.0005	0.6905	0.0453	0.6788
FA4024d	0.0775	0.1845	0.3431	0.7215	0.7970	0.0077	0.6308	0.0803	0.7452
FA4025d	0.1126	0.1346	0.2605	0.6907	0.7126	0.0000	0.7603	0.0523	0.6998
FA4026d	0.1267	0.1971	0.2572	0.6923	0.7020	0.0280	0.7045	0.0187	0.8163
FA4027d	0.0904	0.1663	0.2581	0.7012	0.7098	0.0127	0.6036	0.0134	0.7239
FA4028d	0.1012	0.1835	0.2698	0.6991	0.7222	0.0101	0.8152	0.0703	0.7303
moyenne	0.1031	0.1602	0.2836	0.6977	0.7293	0.0088	0.6830	0.0424	0.7451
écart-type	0.0146	0.0226	0.0391	0.0093	0.0328	0.0080	0.0747	0.0225	0.0537
variance	2.39E-04	6E-04	1.7E-03	9.8E-05	1.21E-03	7E-05	6.3E-03	5.67E-04	3.24E-03
FU4011d	0.0432	0.0678	0.1928	0.6980	0.6992	0.0106	0.2496	0.0000	0.0212
FU4012d	0.0413	0.0607	0.2114	0.7025	0.7034	0.0000	0.2350	0.0009	0.0168
FU4013d	0.0422	0.0695	0.2185	0.6924	0.6952	0.0069	0.2594	0.0074	0.0311
FU4014d	0.0324	0.0663	0.2186	0.6909	0.6923	0.0210	0.2509	0.0025	0.0170
FU4015d	0.0361	0.0652	0.2185	0.6762	0.6775	0.0000	0.2550	0.0000	0.0364
FU4017d	0.0405	0.0669	0.2145	0.6813	0.6847	0.0220	0.2574	0.0120	0.0948
FU4018d	0.0427	0.0649	0.2105	0.6779	0.6807	0.0135	0.2559	0.0081	0.0377
moyenne	0.0398	0.0659	0.2121	0.6885	0.6904	0.0106	0.2519	0.0044	0.0248
écart-type	0.0037	0.0026	0.0091	0.0094	0.0090	0.0083	0.0076	0.0044	0.0040
variance	1.38E-05	6.52E-06	8E-05	8.9E-05	8.09E-05	7E-05	5.78E-05	1.93E-05	1.59E-05
LM4011d	0.0455	0.0893	0.2005	0.6563	0.6616	0.0885	0.3593	0.0150	0.4136
LM4012d	0.0300	0.1026	0.2067	0.6641	0.6681	0.0000	0.3156	0.0134	0.5348
LM4013d	0.0297	0.0683	0.1867	0.6594	0.6666	0.0522	0.3463	0.0236	0.4440
LM4014d	0.0302	0.0811	0.2083	0.6679	0.6697	0.0191	0.3027	0.0005	0.5456
LM4016d	0.0315	0.0992	0.2070	0.6663	0.6705	0.0471	0.3181	0.0154	0.5364
LM4017d	0.0302	0.0864	0.1957	0.6574	0.6623	0.0000	0.2825	0.0176	0.4984
LM4018d	0.0265	0.0802	0.2060	0.6718	0.6782	0.0295	0.3397	0.0227	0.4510
moyenne	0.0319	0.0867	0.2016	0.6633	0.6681	0.0338	0.3235	0.0154	0.4891
écart-type	0.0057	0.0109	0.0073	0.0054	0.0052	0.0293	0.0247	0.0071	0.0490
variance	3.28E-05	1.18E-04	5.4E-05	2.9E-05	2.70E-05	9E-04	6.11E-04	5.00E-05	2.40E-03
AG4011d	0.0891	0.2166		0.6351	0.7525	0.3992	1.1493	0.6011	
AG4012d	0.0904	0.2499		0.6597	0.7517	0.3444	1.0790	0.6499	
AG4013d	0.0958553	0.2130		0.5904	0.6645	0.4553	1.3965	0.6502	
AG4014d	0.0702	0.2067		0.5694	0.6645	0.4118	1.2082	0.7340	
AG4015d	0.0897	0.2010		0.6563	0.7223	0.4284	1.1974	0.8098	
AG4016d	0.1048	0.2194		0.6581	0.7225	0.3500	1.2084	0.6109	
AG4017d	0.0873	0.2024		0.6382	0.7882	0.5361	1.2522	0.5469	
AG4018d	0.0972	0.1949		0.6251	0.7134	0.5027	1.1742	0.5982	
moyenne	0.0906	0.2130		0.6290	0.7224	0.4285	1.2081	0.6501	
écart-type	0.0094	0.0160		0.0310	0.0401	0.06341	0.0858	0.0789	
variance	8.80E-05	2.55E-04		9.6E-04	1.61E-03	0.00402	7.36E-03	6.23E-03	

(53x40) diamètre ; MRS

nom	w A	w B	w C	w E	VA	Vs	Kno
FA4021d	0.0848	0.1188	0.1348	0.1620	0.6861	0.6983	0.5537
FA4022d	0.0900	0.1219	0.1319	0.1527	0.6931	0.7139	0.7055
FA4023d	0.0878	0.1214	0.1366	0.1829	0.6895	0.7788	0.6905
FA4024d	0.0869	0.1217	0.1372	0.1792	0.6973	0.7970	0.6308
FA4025d	0.0943	0.1186	0.1246	0.1673	0.6880	0.7126	0.7603
FA4026d	0.0709	0.1292	0.1917	0.2579	0.6862	0.7020	0.7045
FA4027d	0.0785	0.0936	0.1607	0.2604	0.6953	0.7098	0.6036
FA4028d	0.0823	0.1079	0.1799	0.2158	0.6932	0.7222	0.8152
moyenne	0.0844	0.1166	0.1497	0.1973	0.6911	0.7293	0.6830
écart-type	0.0064	0.0097	0.0218	0.0375	0.0038	0.0328	0.0747
variance	5E-05	1.1E-04	5.4E-04	1.6E-03	1.6E-05	1.2E-03	6.3E-03
FU4011d	0.0230	0.0445	0.0645	0.1098	0.6969	0.6992	0.2496
FU4012d	0.0224	0.0424	0.0587	0.0989	0.7020	0.7034	0.2350
FU4013d	0.0294	0.0432	0.0666	0.1033	0.6910	0.6952	0.2594
FU4014d	0.0207	0.0330	0.0634	0.1026	0.6893	0.6923	0.2509
FU4015d	0.0069	0.0387	0.0627	0.0935	0.6750	0.6775	0.2550
FU4017d	0.0320	0.0410	0.0651	0.0917	0.6799	0.6847	0.2574
FU4018d	0.0212	0.0441	0.0626	0.0951	0.6767	0.6807	0.2559
moyenne	0.0222	0.0410	0.0634	0.0993	0.6873	0.6904	0.2519
écart-type	0.0074	0.0038	0.0023	0.0059	0.0096	0.0090	0.0076
variance	6E-05	1E-05	5E-06	3E-05	9E-05	8E-05	6E-05
LM4011d	0.0368	0.0461	0.0517	0.0882	0.6549	0.6616	0.3593
LM4012d	0.0214	0.0310	0.0561	0.0751	0.6621	0.6681	0.3156
LM4013d	0.0205	0.0305	0.0375	0.0680	0.6581	0.6666	0.3463
LM4014d	0.0245	0.0306	0.0413	0.0970	0.6671	0.6697	0.3027
LM4016d	0.0290	0.0317	0.0544	0.0719	0.6643	0.6705	0.3181
LM4017d	0.0283	0.0303	0.0408	0.0899	0.6569	0.6623	0.2825
LM4018d	0.0185	0.0275	0.0446	0.0563	0.6698	0.6782	0.3397
moyenne	0.0256	0.0325	0.0466	0.0781	0.6619	0.6681	0.3235
écart-type	0.0059	0.0057	0.0068	0.0132	0.0051	0.0052	0.0247
variance	3.43E-05	3.2E-05	4.65E-05	0.00017	2.62E-05	2.7E-05	0.000611
AG4011d	0.0798	0.0958	0.1810	0.2662	0.5334	0.7525	1.1493
AG4012d	0.0749	0.1015	0.2047	0.2354	0.5430	0.7517	1.0790
AG4013d	0.0774	0.1091	0.1466	0.1849	0.5297	0.6645	1.3965
AG4014d	0.0902	0.0964	0.1538	0.2478	0.5297	0.6645	1.2082
AG4015d	0.0787	0.0976	0.1908	0.2153	0.5415	0.7223	1.1974
AG4016d	0.0709	0.1292	0.1917	0.2579	0.5542	0.7225	1.2084
AG4017d	0.0785	0.0936	0.1607	0.2604	0.5495	0.7882	1.2522
AG4018d	0.0823	0.1079	0.1799	0.2158	0.5331	0.7134	1.1742
moyenne	0.0791	0.1039	0.1761	0.2355	0.5393	0.7224	1.2081
écart-type	0.0053	0.0109	0.0191	0.0264	0.0087	0.0401	0.0858
variance	2.79E-05	0.000119	0.000365	0.0007	7.54E-05	0.00161	0.007356

ANNEXE 5 :

Tableau des données rétractométriques :

- Echantillons reconstitués de quatre types de sol différents
- Taille des échantillons : **(53x50mm)**
- Retrait volumique calculé à partir de la mesure du **diamètre**
- Résultats pour les deux modèles utilisés **MRS** et **MD**.

(53x50) reconstitués
mes.diamètre ; MD

nom	w1	w2	w3	V1	Vs	Kre	Kno	Kst	Klm
FA5021d	0.1138	0.1276	0.2594	0.6970	0.7065	0.0008	0.7657	0.0127	0.3084
FA5022d	0.1131	0.1323	0.2559	0.6934	0.7032	0.0026	0.6900	0.0161	0.2885
FA5023d	0.1118	0.1287	0.2663	0.6966	0.7057	0.0489	0.7128	0.0142	0.3004
FA5024d	0.1106	0.1275	0.2603	0.6985	0.7099	0.0058	0.7459	0.0204	0.3498
FA5025d	0.1118	0.1266	0.2682	0.7053	0.7153	0.0000	0.7547	0.0144	0.4595
FA5026d	0.1114	0.1240	0.2588	0.7014	0.7093	0.0062	0.7712	0.0055	0.2209
FA5027d	0.1095	0.1304	0.2569	0.6988	0.7089	0.0283	0.7360	0.0200	0.3253
FA5028d	0.1120	0.1327	0.2512	0.6859	0.6979	0.0003	0.7559	0.0261	0.2160
moyenne	0.1117	0.1287	0.2596	0.6971	0.7071	0.0116	0.7415	0.0162	0.3086
écart-type	0.0013	0.0028	0.0052	0.0054	0.0048	0.0166	0.0259	0.0057	0.0720
variance	1.59E-06	7.6191E-06	2.6609E-05	2.881E-05	2.311E-05	0.000274	0.00067147	3.3E-05	0.005184
FU5011d	0.0444	0.0557	0.2323	0.6991	0.7027	0.0050	0.3796	0.0019	0.0033
FU5012d	0.0524	0.0513	0.2011	0.6922	0.7056	0.0088	0.3828	0.0429	0.1106
FU5013d	0.0414	0.0506	0.2136	0.7133	0.7186	0.0036	0.4181	0.0075	0.1966
FU5014d	0.0437	0.0542	0.1739	0.6851	0.6903	0.0046	0.3920	0.0086	0.0532
FU5015d	0.0409	0.0523	0.2001	0.7080	0.7223	0.0025	0.3754	0.0427	0.1578
FU5017d	0.0453	0.0587	0.2102	0.6920	0.6985	0.0027	0.3819	0.0127	0.0877
FU5018d	0.0392	0.0524	0.2241	0.7072	0.7123	0.0017	0.3772	0.0076	0.1880
moyenne	0.0439	0.0536	0.2079	0.6996	0.7072	0.0041	0.3867	0.0177	0.1139
écart-type	0.0040	0.0026	0.0176	0.0095	0.0105	0.0022	0.0138	0.0161	0.0664
variance	1.59E-05	6.8827E-06	0.00030885	9.117E-05	0.0001095	4.8E-06	0.00018918	0.000261	0.004411
LM5011d	0.0441	0.0457	0.1604	0.6337	0.6357	0.0062	0.3698	0.0083	0.4756
LM5012d	0.0402	0.0674	0.2040	0.6477	0.6507	0.0887	0.3167	0.0013	0.4881
LM5013d	0.0258	0.0431	0.1946	0.6400	0.6459	0.0043	0.3605	0.0125	0.4939
LM5014d	0.0267	0.0461	0.1965	0.6507	0.6741	0.0000	0.4038	0.0788	0.5005
LM5015d	0.0349	0.0469	0.1974	0.6464	0.6592	0.1197	0.4434	0.0341	0.4515
LM5016d	0.0301	0.0391	0.1795	0.6427	0.6503	0.0000	0.3657	0.0237	0.4675
LM5017d	0.0288	0.0441	0.1853	0.6365	0.6418	0.0374	0.3480	0.0130	0.5216
LM5018d	0.0267	0.0411	0.1817	0.6360	0.6411	0.0477	0.3506	0.0126	0.4061
moyenne	0.0322	0.0467	0.1874	0.6417	0.6498	0.0380	0.3698	0.0230	0.4756
écart-type	0.0064	0.0082	0.0129	0.0058	0.0114	0.0424	0.0360	0.0230	0.0330
variance	4.14E-05	6.7457E-05	0.000167	3.342E-05	0.0001291	0.001796	0.00129329	0.00053	0.001087
AG5011d	0.0986	0.2076	0.3199	0.5653	0.7641	0.5049	1.0256	0.4972	0.6581
AG5012d	0.1025	0.2170	0.3264	0.5694	0.7955	0.4879	1.0165	0.4892	0.6133
AG5013d	0.1373	0.1655	0.3266	0.5784	0.7629	0.4281	1.0897	0.5225	0.6137
AG5014d	0.0916	0.2039	0.2931	0.5632	0.7995	0.5037	1.0253	0.5128	0.4892
AG5015d	0.1330	0.2184	0.3885	0.5716	0.7399	0.5389	1.1726	0.4552	0.6266
AG5016d	0.0948	0.2393	0.3292	0.5699	0.7712	0.5247	0.8809	0.4624	0.6940
AG5017d	0.1166	0.2380	0.3014	0.5660	0.7520	0.5460	0.9620	0.4859	0.5996
moyenne	0.1106	0.2128	0.3265	0.569i	0.7693	0.5049	1.0247	0.4893	0.6135
écart-type	0.0172	0.0231	0.0284	0.0047	0.0201	0.0367	0.0852	0.0227	0.0589
variance	0.000296	0.00053355	0.00080597	2.164E-05	0.0004045	0.001347	0.00725287	0.000516	0.003472

(53x50) reconstitués mes.diamètre ; MRS

nom	w A	w B	w C	w E	VA	Vsat	Kst	Kno
2FA5021d	0.0955	0.1167	0.1237	0.1535	0.697	0.70645	0.01273	0.7657
2FA5022d	0.0840	0.1166	0.1289	0.1634	0.6933	0.7032	0.0161	0.690
2FA5023d	0.0873	0.1143	0.1253	0.1560	0.6954	0.7057	0.0142	0.71283
2FA5024d	0.0827	0.1147	0.1247	0.1480	0.6983	0.7099	0.0204	0.74586
2FA5025d	0.0944	0.1145	0.1224	0.1557	0.7053	0.7153	0.0144	0.75469
2FA5026d	0.0921	0.1145	0.1203	0.1475	0.7013	0.7093	0.0055	0.77124
2FA5027d	0.0990	0.1108	0.1285	0.1444	0.6985	0.7089	0.0200	0.7360
2FA5028d	0.0929	0.1150	0.1309	0.1455	0.6859	0.6979	0.0261	0.75587
moyenne	0.0910	0.1146	0.1256	0.1518	0.6969	0.70706	0.01619	0.74153
écart-type	0.0054	0.0017	0.0034	0.0061	0.0054	0.00481	0.00575	0.02591
variance	2.927E-05	2.83E-06	1.14E-05	3.71E-05	3E-05	2.3E-05	3.3E-05	0.00067
2FU5011d	0.0319	0.0463	0.0510	0.0855	0.699	0.70271	0.00195	0.37961
2FU5012d	0.0392	0.0544	0.0507	0.0806	0.6921	0.70561	0.04292	0.38277
2FU5013d	0.0263	0.0443	0.0466	0.0717	0.7132	0.7186	0.00745	0.41814
2FU5014d	0.0278	0.0464	0.0504	0.0776	0.685	0.69032	0.00859	0.39202
2FU5015d	0.0262	0.0431	0.0515	0.0597	0.708	0.72229	0.0427	0.37537
2FU5017d	0.0251	0.0485	0.0557	0.0790	0.692	0.69852	0.01273	0.38193
2FU5018d	0.0234	0.0417	0.0491	0.0741	0.7072	0.71231	0.00756	0.37719
moyenne	0.0286	0.0464	0.0507	0.0755	0.6995	0.7072	0.0177	0.38672
écart-type	0.0050	0.0039	0.0025	0.0076	0.0096	0.01046	0.01614	0.01375
variance	2.497E-05	1.51E-05	6.36E-06	5.82E-05	9E-05	0.00011	0.00026	0.00019
2LM5011d	0.0217	0.0446	0.0454	0.0683	0.6335	0.6357	0.00835	0.36981
2LM5012d	0.0336	0.0401	0.0643	0.0966	0.6471	0.6507	0.00129	0.31665
2LM5013d	0.0173	0.0271	0.0399	0.0651	0.6399	0.6459	0.0125	0.36055
2LM5014d	0.0143	0.0292	0.0450	0.0555	0.6507	0.67406	0.07879	0.40379
2LM5015d	0.0167	0.0371	0.0384	0.0878	0.6442	0.65921	0.03413	0.44341
2LM5016d	0.0167	0.0324	0.0370	0.0543	0.6427	0.65027	0.02368	0.36565
2LM5017d	0.0227	0.0294	0.0411	0.0665	0.6363	0.64176	0.01298	0.34796
2LM5018d	0.0202	0.0273	0.0384	0.0609	0.6357	0.6411	0.01264	0.35063
moyenne	0.0204	0.0334	0.0437	0.0694	0.6413	0.64984	0.02304	0.36981
écart-type	0.0056	0.0061	0.0083	0.0141	0.0056	0.01136	0.02302	0.03596
variance	3.189E-05	3.67E-05	6.87E-05	0.0002	3E-05	0.00013	0.00053	0.00129
2AG5011d	0.0942	0.1019	0.1534	0.282	0.5632	0.76414	0.49716	1.0256
2AG5012d	0.0800	0.1080	0.1706	0.2676	0.5584	0.7955	0.4892	1.01649
2AG5013d	0.0883	0.1197	0.1396	0.2682	0.557	0.76287	0.52249	1.08973
2AG5014d	0.0834	0.1051	0.1295	0.2479	0.5591	0.79947	0.51282	1.0253
2AG5015d	0.1148	0.1460	0.1645	0.2935	0.5618	0.73991	0.45523	1.17256
2AG5016d	0.0760	0.1083	0.1772	0.3257	0.5600	0.77116	0.46242	0.8809
2AG5017d	0.1095	0.1216	0.1995	0.2917	0.5622	0.75198	0.4859	0.962
moyenne	0.0923	0.1158	0.1620	0.2824	0.5603	0.76929	0.48932	1.02465
écart-type	0.0137	0.0141	0.0219	0.0230	0.002	0.02011	0.02271	0.08516
variance	0.0001887	0.000198	0.000479	0.000528	4E-06	0.0004	0.00052	0.00725

ANNEXE 6 :

Tableau des données rétractométriques :

- Echantillons reconstitués de quatre types de sol différents
- Trois hauteurs : (**53x30; 53x40; 53x50**)
- Retrait volumique calculé à partir de la mesure du **diamètre**
- Résultats pour un modèle utilisé : **MD**.

Trois hauteurs différentes
(mes.diamètre ; modèle MD)

STAT.	CLAS.	w1	w2	w3	V1	VS	Kre	Kno	Kst	Klm
	FA									
moyenne	53x30	0.113	0.132	0.273	0.707	0.717	0.018	0.619	0.026	0.334
	53x40	0.103	0.084	0.284	0.084	0.729	0.084	0.084	0.042	0.745
	53x50	0.112	0.129	0.260	0.697	0.707	0.012	0.742	0.016	0.309
écart-type	53x30	0.007	0.008	0.012	0.007	0.006	0.018	0.037	0.017	0.043
	53x40	0.015	0.006	0.039	0.006	0.033	0.006	0.006	0.022	0.054
	53x50	0.001	0.003	0.005	0.005	0.005	0.017	0.026	0.006	0.072
variance	53x30	0.460	0.690	1.500	0.440	0.400	3.000	13.000	3.000	19.000
(xE-04)	53x40	2.400	0.500	17.200	0.500	12.100	0.500	0.500	5.700	32.400
	53x50	0.020	0.080	0.270	0.290	0.230	2.740	6.710	0.330	51.840
	FU									
moyenne	53x30	0.045	0.070	0.238	0.694	0.701	0.038	0.352	0.024	0.362
	53x40	0.040	0.066	0.025	0.688	0.690	0.252	0.252	0.004	0.025
	53x50	0.044	0.054	0.208	0.700	0.707	0.004	0.387	0.018	0.114
écart-type	53x30	0.007	0.005	0.004	0.004	0.005	0.035	0.020	0.013	0.037
	53x40	0.004	0.003	0.004	0.009	0.009	0.008	0.008	0.004	0.004
	53x50	0.004	0.003	0.018	0.010	0.010	0.002	0.014	0.016	0.066
variance	53x30	0.470	0.270	0.180	0.120	0.250	10.000	4.000	1.800	0.010
(xE-04)	53x40	0.140	0.650	0.160	0.890	0.810	0.600	0.580	0.190	0.160
	53x50	0.160	0.070	3.100	0.910	1.100	0.480	1.890	2.610	44.110
	LM									
moyenne	53x30	0.034	0.056	0.174	0.633	0.638	0.046	0.342	0.019	0.371
	53x40	0.032	0.087	0.202	0.663	0.668	0.323	0.323	0.015	0.489
	53x50	0.032	0.047	0.187	0.642	0.650	0.038	0.370	0.023	0.476
écart-type	53x30	0.009	0.007	0.033	0.013	0.014	0.045	0.019	0.010	0.092
	53x40	0.006	0.011	0.007	0.005	0.005	0.025	0.025	0.007	0.049
	53x50	0.006	0.008	0.013	0.006	0.011	0.042	0.036	0.023	0.033
variance	53x30	0.780	0.500	11.000	1.800	1.900	20.000	3.000	0.910	85.000
(xE-04)	53x40	0.330	1.180	0.540	0.290	0.270	6.000	6.110	0.500	24.000
	53x50	0.410	0.680	1.670	0.330	1.290	18.000	12.900	5.300	11.000
	AG									
moyenne	53x30	0.097	0.213	0.292	0.629	0.685	0.351	0.987	0.585	0.506
	53x40	0.091	0.213		0.629	0.722	0.429	1.208	0.650	
	53x50	0.111	0.213	0.326	0.569	0.769	0.505	1.025	0.489	0.614
écart-type	53x30	0.010	0.010	0.032	0.022	0.054	0.068	0.032	0.069	0.110
	53x40	0.009	0.016		0.031	0.040	0.063	0.086	0.079	
	53x50	0.017	0.023	0.028	0.005	0.020	0.037	0.085	0.023	0.059
variance	53x30	0.950	0.990	10.000	4.700	29.000	46.000	10.000	48.000	120.000
(xE-04)	53x40	0.880	2.550		9.600	16.100	40.000	73.600	62.300	
	53x50	2.960	5.340	8.060	0.220	4.040	13.470	72.530	5.160	34.720

ANNEXE 7 :

Tableau des données rétractométriques :

- Echantillons reconstitués et non remaniés de quatre types de sol différents
- (**deux structures** différentes)
- Une seule même taille : (**53x50mm**)
- Retrait volumique calculé à partir de la mesure du **diamètre**
- Résultats pour un modèle utilisé : **MD**.

(n.rem.53x50) diamètre ; MD

nom	w1	w2	w3	V1	Vsat	Kre	Kno	Kst	Klm
FAmn11d	0.1356	0.1447	0.1947	0.6655	0.6625	0.0025	0.4146	0.0048	0.0021
FAmn12d	0.1307	0.1379	0.1711	0.6631	0.6628	0.0206	0.4735	0.0000	-0.0068
FAmn13d	0.1207	0.1305	0.1628	0.6642	0.6647	0.0027	0.5012	0.0000	-0.0103
FAmn14d	0.1215	0.1269	0.1691	0.6612	0.6611	0.0126	0.4544	0.0011	-0.0000
FAmn15d	0.1267	0.1339	0.2592	0.6608	0.6608	0.0042	0.3930	0.0050	0.0020
FAmn16d	0.1378	0.1426	0.1713	0.6616	0.6605	0.0036	0.4095	0.0043	0.0023
FAmn17d	0.1253	0.1311	0.1963	0.6610	0.6646	0.0019	0.5006	0.0222	0.0288
FAmn18d	0.1211	0.1286	0.2200	0.6614	0.6648	0.0059	0.5820	0.0045	0.0063
moyenne	0.1274	0.1345	0.1931	0.6624	0.6627	0.0068	0.4661	0.0052	0.0031
écart-type	0.0062	0.0062	0.0308	0.0016	0.0017	0.0061	0.0584	0.0067	0.0109
variance	3.9E-05	3.8E-05	9.5E-04	2.7E-06	2.9E-06	3.8E-05	3.41E-03	4.5E-05	1.2E-04
FUmn11d	0.0550	0.0610	0.1827	0.7118	0.7149	0.0405	0.3158	0.0188	0.0393
FUmn12d	0.0470	0.0543	0.1629	0.7102	0.7107	0.0177	0.3208	0.0044	0.0262
FUmn13d	0.0543	0.0597	0.1582	0.7126	0.7101	0.0358	0.2808	0.0046	0.0434
FUmn14d	0.0555	0.0651	0.1302	0.7102	0.7099	0.0190	0.2833	0.0027	0.0029
FUmn16d	0.0526	0.0593	0.1563	0.7086	0.7086	0.0012	0.3086	0.0004	0.0181
FUmn17d	0.0641	0.0737	0.0994	0.7104	0.7212	0.0013	0.3330	0.0082	0.0460
FUmn18d	0.0661	0.0735	0.2676	0.7112	0.7136	0.0000	0.3020	0.0186	0.0223
moyenne	0.0564	0.0638	0.1653	0.7107	0.7127	0.0165	0.3063	0.0082	0.0283
écart-type	0.0061	0.0068	0.0485	0.0012	0.0040	0.0155	0.0178	0.0070	0.0144
variance	3.8E-05	4.7E-05	2.4E-03	1.4E-06	0.0000	0.00024	0.000317	4.9E-05	0.00021
LMmn21d	0.0451	0.0513	0.2059	0.6419	0.6455	0.0325	0.3445	0.0245	0.4118
LMmn22d	0.0417	0.0451	0.1979	0.6413	0.6422	0.0201	0.2830	0.0210	0.4013
LMmn23d	0.0427	0.0482	0.1997	0.6424	0.6491	0.0134	0.3113	0.0474	0.4511
LMmn24d	0.0416	0.0476	0.2064	0.6388	0.6412	-0.0000	0.3316	0.0112	0.3785
LMmn25d	0.0366	0.0538	0.2151	0.6388	0.6518	0.0171	0.3180	0.0366	0.4051
LMmn27d	0.0536	0.0590	0.2063	0.6404	0.6429	-0.0000	0.3134	0.0233	0.3600
LMmn28d	0.0457	0.0499	0.2002	0.6395	0.6402	0.0124	0.3234	0.0273	0.4014
moyenne	0.0439	0.0507	0.2045	0.6404	0.6447	0.0136	0.3179	0.0273	0.4013
écart-type	0.0048	0.0043	0.0054	0.0014	0.0040	0.0106	0.0178	0.0108	0.0263
variance	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0003	0.0001	0.0007
AGmn11d	0.0936	0.1473	0.3573	0.5695	0.7793	0.2989	1.1188	0.3655	0.7413
AGmn12d	0.0970	0.1906	0.4702	0.5758	0.6199	0.2037	1.1872	0.4328	0.7952
AGmn13d	0.0954	0.1629	0.2954	0.5764	0.6880	0.2442	1.1172	0.2730	0.7248
AGmn14d	0.0973	0.1595	0.2844	0.5622	0.6379	0.2341	0.9828	0.2554	0.7228
AGmn15d	0.0822	0.1287	0.3215	0.5674	0.7721	0.2663	1.1912	0.4168	0.7715
AGmn16d	0.1053	0.1512	0.2849	0.5884	0.6578	0.2214	1.0695	0.2391	0.6925
AGmn17d	0.0711	0.1647	0.4084	0.5700	0.6926	0.2452	1.1492	0.3304	0.7432
moyenne	0.0917	0.1578	0.3460	0.5728	0.6925	0.2448	1.1166	0.3304	0.7416
écart-type	0.0105	0.0175	0.0656	0.0078	0.0578	0.0286	0.0673	0.0722	0.0312
variance	0.0001	0.0003	0.0043	0.0001	0.0033	0.0008	0.0045	0.0052	0.0010

(53x50) n.reman./reconst.
mes.diamètre ; mod.MD

STAT.	CLAS.	w1	w2	w3	V1	VS	Kre	Kno	Kst	Klm
	FA 50									
moyenne	n.rem	0.1274	0.1345	0.1931	0.6624	0.6627	0.007	0.466	0.005	0.003
	rec.	0.1117	0.1287	0.25964	0.6971	0.7071	0.0116	0.74153	0.0162	0.3086
écart-type	n.rem	0.1274	0.1345	0.1931	0.6624	0.6627	0.007	0.466	0.005	0.003
	rec.	0.0013	0.0028	0.0052	0.0054	0.0048	0.0166	0.0259	0.0057	0.0720
variance	n.rem	3.9E-05	3.8E-05	9.5E-04	2.7E-06	3E-06	3.8E-05	3.41E-03	4.5E-05	1.2E-04
	rec.	1.6E-06	7.6E-06	2.7E-05	2.9E-05	2.3E-05	3E-04	7E-04	3.3E-05	5.2E-03
	FU 50									
moyenne	n.rem	0.0564	0.0638	0.1653	0.7107	0.7127	0.0165	0.30633	0.0082	0.0283
	rec.	0.0439	0.0536	0.2079	0.6996	0.7072	0.0041	0.3867	0.0177	0.1139
écart-type	n.rem	0.0061	0.0068	0.0485	0.0012	4.0E-03	0.0155	0.0178	0.007	0.0144
	rec.	0.0040	0.0026	0.0176	0.0095	0.0105	0.0022	0.0138	0.0161	0.0664
variance	n.rem	3.8E-05	4.7E-05	2.4E-03	1.4E-06	0.0000	0.0002	0.00032	5E-05	0.0002
	rec.	1.6E-05	6.9E-06	3.1E-04	9.1E-05	1.1E-04	5E-06	1.9E-04	2.6E-04	4.4E-03
	LM 50									
moyenne	n.rem	0.0439	0.0507	0.2045	0.6404	0.6447	0.0136	0.31787	0.0273	0.4013
	rec.	0.0322	0.0467	0.1874	0.6417	0.6498	0.0380	0.3698	0.0230	0.4756
écart-type	n.rem	0.0048	0.0043	0.0054	0.0014	4.0E-03	0.0106	0.01777	0.0108	0.0263
	rec.	0.0064	0.0082	0.0129	0.0058	0.0114	0.0424	0.0360	0.0230	0.0330
variance	n.rem	2.3E-05	1.8E-05	3.0E-05	1.8E-06	0.0000	0.0001	0.00032	0.0001	0.0007
	rec.	4.1E-05	6.7E-05	1.7E-04	3.3E-05	1.3E-04	2E-03	1.3E-03	5.3E-04	1.1E-03
	AG 50									
moyenne	n.rem	0.0917	0.1578	0.3460	0.5728	0.6925	0.2448	1.11657	0.3304	0.7416
	rec.	0.1106	0.2128	0.3265	0.5691	0.7693	0.5049	1.0247	0.4893	0.6135
écart-type	n.rem	0.0105	0.0175	0.0656	0.0078	5.8E-02	0.0286	0.06734	0.0722	0.0312
	rec.	0.0172	0.0231	0.0284	0.0047	0.0201	0.0367	0.0852	0.0227	0.0589
variance	n.rem	1.1E-04	3.1E-04	4.3E-03	6.1E-05	0.0033	8.2E-04	4.5E-03	5E-03	9.7E-04
	rec.	3.0E-04	5.3E-04	8.1E-04	2.2E-05	4.0E-04	1E-03	7.3E-03	5.2E-04	3.5E-03
		n.rem.= non remanié								
		rec.= reconstitué								

ANNEXE 8 :

Tables statistiques :

- Loi de Fisher-Snedecor (comparaison de variances), à la probabilité : $P = 0.950$.
- Test de Hartley (comparaison de variance), à la probabilité : $r0.950$.

$P = 0,950$

$\nu_2 \backslash \nu_1$	12	15	20	24	30	40	60	120	=	$\nu_1 \backslash \nu_2$
1	243,9	245,9	248,0	249,1	250,1	251,1	252,2	253,3	254,3	1
2	19,41	19,43	19,45	19,45	19,46	19,47	19,48	19,49	19,50	2
3	8,74	8,70	8,64	8,64	8,62	8,59	8,57	8,55	8,53	3
4	5,91	5,86	5,80	5,77	5,75	5,72	5,69	5,66	5,63	4
5	4,68	4,62	4,56	4,53	4,50	4,46	4,43	4,40	4,36	5
6	4,00	3,94	3,87	3,84	3,81	3,77	3,74	3,70	3,67	6
7	3,57	3,51	3,44	3,41	3,38	3,34	3,30	3,27	3,23	7
8	3,28	3,22	3,15	3,12	3,08	3,04	3,01	2,97	2,93	8
9	3,07	3,01	2,94	2,90	2,86	2,83	2,79	2,75	2,71	9
10	2,91	2,85	2,77	2,74	2,70	2,66	2,62	2,58	2,54	10
11	2,79	2,72	2,65	2,61	2,57	2,53	2,49	2,45	2,40	11
12	2,69	2,62	2,54	2,51	2,47	2,43	2,38	2,34	2,30	12
13	2,60	2,53	2,46	2,42	2,38	2,34	2,30	2,25	2,21	13
14	2,53	2,46	2,39	2,35	2,31	2,27	2,22	2,18	2,13	14
15	2,48	2,40	2,33	2,29	2,25	2,20	2,16	2,11	2,07	15
16	2,42	2,35	2,28	2,24	2,19	2,15	2,11	2,06	2,01	16
17	2,38	2,31	2,23	2,19	2,15	2,10	2,06	2,01	1,96	17
18	2,34	2,27	2,19	2,15	2,11	2,06	2,02	1,97	1,92	18
19	2,31	2,23	2,16	2,11	2,07	2,03	1,98	1,93	1,88	19
20	2,28	2,20	2,12	2,08	2,04	1,99	1,95	1,90	1,84	20
21	2,25	2,18	2,10	2,05	2,01	1,96	1,92	1,87	1,81	21
22	2,23	2,15	2,07	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,78	22
23	2,20	2,13	2,05	2,01	1,96	1,91	1,86	1,81	1,76	23
24	2,18	2,11	2,03	1,98	1,94	1,89	1,84	1,79	1,73	24
25	2,16	2,09	2,01	1,96	1,92	1,87	1,82	1,77	1,71	25
26	2,15	2,07	1,99	1,95	1,90	1,85	1,80	1,75	1,69	26
27	2,13	2,06	1,97	1,93	1,88	1,84	1,79	1,73	1,67	27
28	2,12	2,04	1,96	1,91	1,87	1,82	1,77	1,71	1,65	28
29	2,10	2,03	1,94	1,90	1,85	1,81	1,75	1,70	1,64	29
30	2,09	2,01	1,93	1,89	1,84	1,79	1,74	1,68	1,62	30
40	2,00	1,92	1,84	1,79	1,74	1,69	1,64	1,58	1,51	40
60	1,92	1,84	1,75	1,70	1,65	1,59	1,53	1,47	1,39	60
120	1,83	1,75	1,66	1,61	1,55	1,50	1,43	1,35	1,25	120
=	1,75	1,67	1,57	1,52	1,46	1,39	1,32	1,22	1,00	=
$\nu_2 \backslash \nu_1$	12	15	20	24	30	40	60	120	=	$\nu_1 \backslash \nu_2$

LOI DE SNEDECOR (Comparaison de variances)

Les tables ci-après donnent les valeurs de F_P en fonction de ν_1 et ν_2 . Chaque table correspond à une valeur déterminée de P .

Si P est inférieur à 0,5, on utilise la relation : $F_P(\nu_1; \nu_2) = \frac{1}{F_{1-P}(\nu_2; \nu_1)}$.

$P = 0,950$

$\nu_2 \backslash \nu_1$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	$\nu_1 \backslash \nu_2$
1	161,4	199,5	215,7	224,6	230,2	234,0	236,8	238,9	240,5	241,9	1
2	18,51	19,00	19,16	19,25	19,30	19,33	19,35	19,37	19,38	19,40	2
3	10,13	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,89	8,85	8,81	8,79	3
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,09	6,04	6,00	5,96	4
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,88	4,82	4,77	4,74	5
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,21	4,15	4,10	4,06	6
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,79	3,73	3,68	3,64	7
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,50	3,44	3,39	3,35	8
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,29	3,23	3,18	3,14	9
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07	3,02	2,98	10
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	3,01	2,95	2,90	2,85	11
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,91	2,85	2,80	2,75	12
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,83	2,77	2,71	2,67	13
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,76	2,70	2,65	2,60	14
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,71	2,64	2,59	2,54	15
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,66	2,59	2,54	2,49	16
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,61	2,55	2,49	2,45	17
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,58	2,51	2,46	2,41	18
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,54	2,48	2,42	2,38	19
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45	2,39	2,35	20
21	4,32	3,47	3,07	2,84	2,68	2,57	2,49	2,42	2,37	2,32	21
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,46	2,40	2,34	2,30	22
23	4,28	3,42	3,03	2,80	2,64	2,53	2,44	2,37	2,32	2,27	23
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,42	2,36	2,30	2,25	24
25	4,24	3,39	2,99	2,76	2,60	2,49	2,40	2,34	2,28	2,24	25
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,39	2,32	2,27	2,22	26
27	4,21	3,35	2,96	2,73	2,57	2,46	2,37	2,31	2,25	2,20	27
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,36	2,29	2,24	2,19	28
29	4,18	3,33	2,93	2,70	2,55	2,43	2,35	2,28	2,22	2,18	29
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,33	2,27	2,21	2,16	30
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,25	2,18	2,12	2,08	40
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,17	2,10	2,04	1,99	60
120	3,92	3,07	2,68	2,45	2,29	2,17	2,09	2,02	1,96	1,91	120
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	2,01	1,94	1,88	1,83	∞

TEST DE HARTLEY (comparaison de variances)

Ces tables donnent les valeurs de r_p avec : $r = \frac{s_{\max}^2}{s_{\min}^2}$

en fonction de k (nombre d'estimations s_i^2) et ν (nombre de degrés de liberté de chaque estimation).

Valeurs de $r_{0,95}$

$\nu \backslash k$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$k \backslash \nu$
2	39,0	87,5	142	202	266	333	403	475	550	626	704	2
3	15,4	27,8	39,2	50,7	62,0	72,9	83,5	93,9	104	114	124	3
4	9,60	15,5	20,6	25,2	29,5	33,6	37,5	41,1	44,6	48,0	51,4	4
5	7,15	10,8	13,7	16,3	18,7	20,8	22,9	24,7	26,5	28,2	29,9	5
6	5,82	8,38	10,4	12,1	13,7	15,0	16,3	17,5	18,6	19,7	20,7	6
7	4,99	6,94	8,44	9,70	10,8	11,8	12,7	13,5	14,3	15,1	15,8	7
8	4,43	6,00	7,18	8,12	9,03	9,78	10,5	11,1	11,7	12,2	12,7	8
9	4,03	5,34	6,31	7,11	7,80	8,41	8,96	9,45	9,91	10,3	10,7	9
10	3,72	4,85	5,67	6,34	6,92	7,42	7,87	8,28	8,66	9,01	9,34	10
11	3,28	4,16	4,79	5,30	5,72	6,08	6,42	6,72	7,00	7,25	7,48	11
15	2,86	3,54	4,01	4,37	4,68	4,95	5,19	5,40	5,58	5,77	5,93	15
20	2,46	2,95	3,29	3,54	3,76	3,94	4,10	4,24	4,37	4,49	4,58	20
30	2,07	2,40	2,61	2,78	2,91	3,02	3,12	3,21	3,29	3,36	3,39	30
60	1,67	1,85	1,96	2,04	2,11	2,17	2,22	2,26	2,30	2,33	2,36	60
-	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-
$\nu \backslash k$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$k \backslash \nu$

Valeurs de $r_{0,99}$

$\nu \backslash k$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$k \backslash \nu$
2	199	448	729	1036	1362	1705	2083	2432	2813	3204	3606	2
3	47,5	85	120	151	184	216	249	281	310	337	361	3
4	23,2	37	49	59	69	79	89	97	106	113	120	4
5	14,9	22	28	33	38	42	46	50	54	57	60	5
6	11,1	15,5	19,1	22	25	27	30	32	34	36	37	6
7	8,89	12,1	14,5	16,5	18,4	20	22	23	24	26	27	7
8	7,50	9,9	11,7	13,2	14,5	15,8	16,9	17,9	18,9	19,6	21	8
9	6,54	8,5	9,9	11,1	12,1	13,1	13,9	14,7	15,3	16,0	16,6	9
10	5,85	7,4	8,6	9,6	10,4	11,1	11,8	12,4	12,9	13,4	13,9	10
11	4,91	6,1	6,9	7,6	8,2	8,7	9,1	9,5	9,9	10,2	10,6	11
15	4,07	4,9	5,5	6,0	6,4	6,7	7,1	7,3	7,5	7,8	8,0	15
20	3,32	3,8	4,3	4,6	4,9	5,1	5,3	5,5	5,6	5,8	5,9	20
30	2,63	3,0	3,3	3,4	3,6	3,7	3,8	3,9	4,0	4,1	4,2	30
60	1,96	2,2	2,3	2,4	2,4	2,5	2,5	2,6	2,6	2,7	2,7	60
-	1,00	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	-
$\nu \backslash k$	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$k \backslash \nu$

TABLE DES MATIERES

AVANT-PROPOS ET REMERCIEMENTS	7
SOMMAIRE	9
SYMBOLES ET UNITES	11
INTRODUCTION GENERALE	15
PREMIERE PARTIE : LA MESURE DU RETRAIT	19
I./ MESURE DE LA COURBE DE RETRAIT	21
I.1/ Premières notions de structure du sol d'après son retrait (1908-1923)	21
I.2/ Les différentes phases de la courbe de retrait	29
I.2.1/ <i>Courbes de retrait d'une pâte d'argile</i>	29
I.2.2/ <i>Courbe de retrait d'un sol à structure conservée (sol non remanié)</i>	30
I.3/ Les techniques de mesure de la courbe de retrait	37
I.3.1/ <i>Les méthodes de mesure directe du volume de l'échantillon</i>	37
I.3.2/ <i>Les méthodes de mesure indirecte du volume de l'échantillon</i>	38
I.3.3/ <i>Mesure en continu de la courbe de retrait</i>	39
II./ FONCTIONNEMENT STRUCTURAL D'UN ECHANTILLON DE SOL	
A PARTIR DE SA COURBE DE RETRAIT	42
II.1/ Comportement des agrégats durant le retrait	42
II.2/ Organisation des argiles au cours du retrait	49
III./ MODELISATION DE LA COURBE DE RETRAIT	53
III.1/ Les différents modèles	53
III.2/ Le modèle de retrait structural (MRS)	58
III.2.1/ <i>Modèle fonctionnel de la structure du sol</i>	58
III.2.1.1/ <i>Intérêt d'un modèle fonctionnel</i>	58
III.2.1.2/ <i>Le modèle morphologique</i>	58
III.2.1.3/ <i>Les deux hypothèses de fonctionnement</i>	60
III.2.1.4/ <i>Les propriétés du modèle</i>	62
IV./ LES MESURES DU RETRAIT ET GONFLEMENT EN GEOTECHNIQUE	67
IV.1/ Les phénomènes de retrait et gonflement en géotechnique	67
IV.2/ Les conséquences sur les constructions	68
IV.3/ Les méthodes de mesure du retrait et gonflement des sols	69
IV.3.1/ <i>Mesure en laboratoire</i>	69
IV.3.2/ <i>Les essais in-situ</i>	77
V./ CONCLUSION	78

DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES	79
I./ LE RETRACTOMETRE LASER	81
I.1/ Présentation	81
I.1.1/ <i>Unité mécanique : passeur d'échantillon</i>	83
I.1.2/ <i>Unité mesure</i>	86
I.1.2.1/ <i>Les capteurs photoélectriques à barrage laser</i>	86
I.1.2.2/ <i>Le capteur laser sans contact type « spot LB70 »</i>	88
I.1.2.3/ <i>La balance de précision</i>	90
I.1.3/ <i>Unité d'acquisition des donnée</i>	91
I.2/ Validation des mesures	93
I.2.1/ <i>Qualité des signaux des capteurs « laser »</i>	93
I.2.1.1/ <i>Le bruit</i>	93
I.2.1.2/ <i>La linéarité</i>	95
I.2.1.3/ <i>La résolution</i>	97
I.2.2/ <i>La fidélité</i>	97
I.2.2.1/ <i>Ecart-type de répétabilité</i>	97
I.2.2.2/ <i>La précision</i>	98
I.2.3/ <i>L'exactitude</i>	101
I.2.4/ <i>Qualité du signal de la balance</i>	103
I.2.4.1/ <i>La précision</i>	103
I.2.4.2/ <i>Influence du mouvement du plateau de la balance</i>	103
I.2.5/ <i>Conclusion</i>	104
II./ METHODE DE L'ANALYSE RETRACTOMETRIQUE	105
II.1/ Préparation des échantillons à l'analyse rétractométrique	105
II.1.1/ <i>Généralités</i>	105
II.1.2/ <i>Prélèvement du sol</i>	106
II.1.3/ <i>Préparation des échantillons</i>	107
II.1.2.1/ <i>Echantillon de sol à structure non remaniée</i>	107
II.1.2.2/ <i>Fabrication d'échantillons de sol reconstitué</i> <i>à une masse volumique apparente donnée</i>	112
II.1.4/ <i>Mise à saturation et positionnement de l'échantillon</i> <i>sur le plateau du rétractomètre</i>	116
II.2/ Détermination de la courbe de retrait	119
II.2.1/ <i>Expressions de la courbe de retrait : modélisation</i>	119
II.2.1.1/ <i>Expression de la courbe de retrait à partir de la hauteur (H) mesurée</i>	119
II.2.1.2/ <i>Expression de la courbe de retrait à partir du « diamètre » (D) mesuré</i>	120
II.2.1.3/ <i>Expression de la courbe de retrait à partir de H et D mesurés</i>	121
II.2.2/ <i>Traitement de la courbe de retrait</i>	121
II.2.2.1/ <i>Modélisation d'après la méthode d'ajustement des équations de type exponentielle</i> <i>(modèle MRS)</i>	121
II.2.2.2/ <i>Modélisation à partir de la méthode d'ajustement des droites</i> <i>(modèle en droites)</i>	127
II.2.2.3/ <i>Mesure de l'anisotropie du retrait</i>	130
III./ CONCLUSION	132

TROISIEME PARTIE : RESULTATS ET DISCUSSION	133
I./ ETUDE DES COURBES DE RETRAIT EXPERIMENTALES	135
I.1/ Qualité des mesures horizontale et verticale	135
I.2/ Calcul de la courbe de retrait tenant compte de son anisotropie	137
I.3/ Courbes de retrait de sol de types différents	141
II / INFLUENCE DES CONDITIONS OPERATOIRES SUR LES POINTS	
CARACTERISTIQUES DE LA COURBE DE RETRAIT	143
II.1/ Choix du modèle approprié	143
II.1.1/ <i>Analyse statistique des données rétractométriques calculées</i>	
<i>d'après la mesure horizontale du retrait</i>	143
II.1.1.1/ <i>Analyse des variances</i>	143
II.1.1.2/ <i>Analyse du pouvoir discriminant des deux modèles en fonction</i>	
<i>de la texture du sol pour la mesure horizontale du retrait</i>	145
II.1.2/ <i>Analyse statistique des données rétractométriques calculées</i>	
<i>d'après la mesure verticale du retrait</i>	147
II.1.2.1/ <i>Analyse des variances</i>	147
II.1.2.2/ <i>Analyse du pouvoir discriminant des deux modèles</i>	
<i>par rapport à la texture du sol</i>	148
II.1.2.3/ <i>Résultats</i>	149
II.1.3/ <i>Conclusion</i>	150
II.2/ Etude de l'influence de la hauteur de l'échantillon	151
II.2.1/ <i>Manipulation</i>	151
II.2.2/ <i>Etude statistique</i>	151
II.2.2.1/ <i>Analyse des variances</i>	152
II.2.2.2/ <i>Analyse discriminante en fonction de la hauteur de l'échantillon</i>	154
II.2.2.3/ <i>Résultats</i>	155
II.2.3/ <i>Conclusion</i>	155
II.3/ Effet de la structure sur le retrait	156
II.3.1/ <i>Manipulation</i>	156
II.3.2/ <i>Etude statistique</i>	157
II.3.2.1/ <i>Analyse des moyennes et variances</i>	157
II.3.2.2/ <i>Analyse discriminante en fonction de la structure de l'échantillon</i>	158
II.3.2.3/ <i>Résultats</i>	158
II.3.3/ <i>Conclusion</i>	159
II.4/ Influence de la masse volumique apparente du sol sur le retrait	160
II.4.1/ <i>Manipulation</i>	160
II.4.2/ <i>Résultats</i>	161
II.5/ Effet de l'enrobage de l'échantillon sur son retrait	162
II.5.1/ <i>Manipulation</i>	162
II.5.2/ <i>Résultats</i>	163
III./ CONCLUSION	165

QUATRIEME PARTIE : LES APPLICATIONS POSSIBLES	167
I./ DEFINITION D'UN MODELE FONCTIONNEL DE LA STRUCTURE DU SOL	169
II./ DETERMINATION DES PROPRIETES HYDROSTRUCTURALES DU SOL EN AGRICULTURE	172
II.1/ Les états pédo-hydriques particuliers du sol	172
II.1.1/ <i>La capacité de rétention</i>	172
II.1.2/ <i>Le point de friabilité</i>	173
II.1.3/ <i>Le point de flétrissement</i>	173
II.1.4/ <i>La teneur en eau à saturation</i>	174
II.2/ Les réserves en eau du sol	175
II.2.1/ <i>La réserve en eau du sol</i>	175
II.2.2/ <i>La réserve facilement utilisable (RFU)</i>	175
II.2.3/ <i>L'eau résiduelle (ER)</i>	177
II.2.4/ <i>L'eau gravitaire (EG)</i>	177
II.3/ Tableau récapitulatif des propriétés hydro-structurales du sol	178
III./ APPLICATIONS GEOTECHNIQUES	179
III.1/ Importance de la mesure du retrait	179
III.2/ La rétractométrie en géotechnique	179
IV./ AUTRES APPLICATIONS	181
CONCLUSION GENERALE	183
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	189
ANNEXE	201



RESUME

Pour tenter de mieux comprendre certains comportements physiques du sol soumis à l'action des éléments du climat au cours des saisons, depuis près d'un siècle on s'intéresse à la mesure de son retrait. En retraçant historiquement l'évolution de la mesure du retrait d'un échantillon de sol, nous avons mis en évidence l'importance de l'interaction entre sa structure variable et l'eau, responsable de ces comportements. Ceux-ci peuvent être décrits par les propriétés hydro-structurales du sol.

La rétractométrie permet la mesure bidimensionnelle (hauteur et diamètre) en continu du retrait volumique d'un échantillon de sol de forme cylindrique tout au long de son dessèchement, en fonction de sa perte en eau. Ainsi, par l'analyse de sa courbe de retrait, elle permet de définir ses états hydro-structuraux particuliers et de calculer ses propriétés hydro-structurales.

Afin de déterminer avec précision la courbe de retrait et d'élargir le champ des possibilités de son traitement analytique, il fallait concevoir un appareil permettant d'analyser, en routine, le retrait d'un grand nombre d'échantillons par séries de répétitions sur le même matériau. Pour cela, le premier rétractomètre laser à passeur d'échantillons automatique (prototype) a été fabriqué, mis au point et expérimenté sur des échantillons de sol de propriétés texturales différentes. Il permet l'analyse d'une série de huit échantillons par manipulation. Sa validation métrologique a permis de définir une précision de mesure de 0.019% (soit $9\mu\text{m}$) et une fidélité de $10\mu\text{m}$ en moyenne pour le mesurage des dimensions horizontale et verticale d'échantillons de volume environ égal à 100 cm^3 .

En faisant varier les paramètres physiques de l'échantillon de sol (quatre types de texture suivant sa teneur en argile, trois tailles différentes, deux types de structures : reconstituée et non remaniée pour chacun des cas ainsi que sa masse volumique apparente), nous avons étudié leurs effets sur la courbe de retrait. Une étude statistique a été réalisée sur les points caractéristiques de ces courbes. Pour cela, on a utilisé deux méthodes d'ajustement des phases de retrait sur la courbe expérimentale (par optimisation « simplex » pour le modèle de retrait structural MRS et par traitement graphique pour le modèle des droites MD). En comparant leurs répétabilités, on constate que cette dernière est mieux adaptée, quel que soit le type de sol analysé.

On prouve que l'allure de la courbe de retrait est caractéristique de l'organisation texturale de l'échantillon de sol. De même la taille de l'échantillon a un effet non négligeable sur son retrait, jusqu'au point d'entrée d'air dans sa microporosité. Le remaniement de la structure du sol par sa reconstitution en agrégats tassés (à la même masse volumique apparente que le même échantillon de sol non remanié) ne modifie quasiment pas les paramètres caractéristiques de la courbe de retrait. Enfin, l'étude de l'influence de la masse volumique apparente du sol nous montre que la dernière phase de retrait est bien caractéristique de la phase argileuse du sol. Pour chacun des protocoles, il est à souligner que la méthode d'analyse de la courbe de retrait tient compte de l'anisotropie du retrait, quelle que soit la texture du sol.

Les applications du rétractomètre laser sont reconnues et les perspectives nombreuses :

Il permet de calculer, par l'intermédiaire des courbes de retrait, des propriétés hydro-structurales d'un échantillon de sol comme certaines de ses réserves en eau pour l'agriculture, ou les limites d'Atterberg en géotechnique. On peut également l'utiliser pour modéliser le transfert d'eau dans les sols déformables, ou encore pour développer des recherches afin de mieux comprendre les processus thermodynamiques liés aux phénomènes de retrait et gonflement des sols. Il en est de même pour l'étude des variations de température ou encore l'étude physico-chimique de l'effet de la salinité des sols sur ces mêmes phénomènes physiques.

Mots clés :

Rétractomètre laser - mesure d'échantillons de sol - structure et texture du sol - courbe de retrait - validation métrologique - modélisation de la structure du sol durant son retrait - propriétés physiques des sols - limites d'Atterberg - réserves en eau du sol.

Key words :

laser retractometer - shrinkage measure of soil sample - structure and texture of soil - shrinkage curve - metrological validation - modelization of soil structure during the shrinkage process - physical properties of soil - Atterberg limits - soil water.