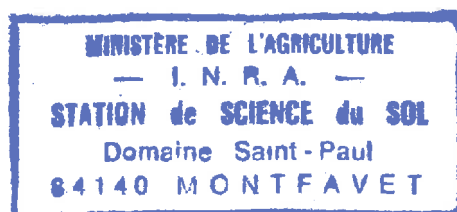


THESE présentée à L'UNIVERSITE PIERRE et MARIE CURIE -PARIS VI-
et à l'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE PARIS par

Philippe PARCEVAUX

en vue de l'obtention du titre de Docteur-Ingénieur en Géologie de l'Ingénieur

Etude microscopique et macroscopique du gonflement de sols argileux



Soutenue le 13 NOV. 1980 devant la commission d'examen

MM.	M. ARNOULD	Président
	R. STRUILLOU	Rapporteur
	R. SIESTRUNCK	Examineur
	F. SCHLOSSER	Examineur

AVANT - PROPOS

Qu'il me soit permis d'exprimer ici ma gratitude à toutes les personnes qui m'ont apporté soutien, conseils et assistance à l'occasion de cette recherche.

En premier lieu mes remerciements vont à M. le Professeur ARNOULD pour l'accueil qu'il m'a réservé au Centre de Géologie de l'Ingénieur de l'Ecole des Mines de Paris et pour la confiance qu'il m'a témoignée tout au long de ce travail.

M. STRUILLOU, Maître de Recherche à l'Ecole des Mines de Paris, a encadré mon travail et m'a prodigué ses précieux conseils. Qu'il en soit vivement remercié.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à M. le Professeur SIESTRUNCK de l'Université Paris VI et à M. SCHLOSSER, Professeur à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, qui m'honorent de leur présence dans ce jury.

Cette étude s'appuie sur un travail expérimental à partir d'échantillons spécifiques de sols argileux qui m'ont été gracieusement fournis par Mme F. GAMBINI (SNCF, Section Travaux Neufs), M. FABRE (RATP), M. TOULEMONT (LRPC de l'Est Parisien), M. THIRY (Centre de Minéralogie de l'Ecole des Mines de Paris). Je suis très reconnaissant à ces personnes pour leur collaboration et leur amabilité.

Je n'oublie pas mes camarades chercheurs et techniciens du Centre de Géologie de l'Ingénieur qui m'ont apporté leur aide et leur sympathie, et plus particulièrement F. PELLERIN, M. AUDIGUIER et P. GAUDON pour leurs conseils et leurs critiques, B. CHRETIEN et P. ROLLAND pour les essais de laboratoire, M. HUYNH pour l'illustration de ce mémoire, J. JEGO pour la dactylographie du texte, Ch. LAVIALLE pour la mise en page définitive et M. CHANETTE pour la présentation.

J'adresse enfin mes remerciements à M. TANZI, Directeur de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, ainsi qu'à M. l'Ingénieur Général BONNET et M. GERBALDI, chargés de la Recherche à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, qui m'ont permis de réaliser ce travail grâce à une bourse accordée par l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées sur les crédits dont elle dispose, au titre de la Recherche Scientifique et Technique.

R É S U M É

Le gonflement des sols argileux qui se développe à l'échelle microscopique (au niveau de la particule d'argile) se traduit à l'échelle macroscopique par des dommages souvent importants sur les ouvrages.

Cette étude, réalisée sur six sols argileux différents, a pour but d'apprécier les variations de texture des sols au cours du gonflement (échelle microscopique) et de modéliser, à partir d'essais de laboratoire, l'évolution du phénomène en fonction des principales variables, temps, épaisseur des échantillons, contraintes mécaniques appliquées, succion (échelle macroscopique).

La première partie consiste en une caractérisation minéralogique et géotechnique des sols étudiés à partir des méthodes classiques (diffraction X, fluorescence X, analyse granulométrique, essais d'identification géotechnique), et en une présentation théorique et bibliographique du phénomène de gonflement.

La deuxième partie concerne l'étude macroscopique du gonflement unidimensionnel. L'essai classique est l'essai de type oedométrique, mais certaines mesures optiques nécessitent l'emploi de moules transparents et de repères visuels dans les échantillons. Quatre points sont abordés successivement :

- L'étude de la cinétique du gonflement permet de modéliser l'évolution du taux de gonflement $\frac{\Delta h}{h_0}$, en fonction du temps, par une loi hyperbolique de la forme

$$\frac{\Delta h}{h_0} = G \cdot \frac{t}{B+t} \quad \text{où } G \text{ est le taux de gonflement final et } B \text{ le temps de demi-gonflement qui est, de plus, proportionnel à l'épaisseur } h_0 \text{ de l'échantillon.}$$

- L'étude de la propagation du gonflement montre que la cinétique du gonflement de tout sous-échantillon est identique à celle de l'échantillon complet. De plus, avec une alimentation en eau par le haut, le gonflement se développe dans la partie inférieure de la couche bien avant d'être complètement terminé dans la partie supérieure et la distance de propagation du front d'eau (associée à la propagation du gonflement) est en relation linéaire avec la racine carrée du temps. Le taux de gonflement en tout point d'un échantillon, pour lequel la contrainte géostatique est négligeable, semble tendre vers une valeur unique quand la durée de l'essai devient très grande.

- L'influence des contraintes initiales σ'_i et finale σ'_f (cas du déchargement d'un sol normalement consolidé) sur les valeurs du taux de gonflement final G et du temps de demi-gonflement B , est modélisée par les équations :

$$G = \frac{\sigma'_i - \sigma'_f}{u \sigma'_i \cdot \sigma'_f + v (\sigma'_i - \sigma'_f) + S} \quad \text{et} \quad B = \frac{x \sigma'_i + y}{\sigma'_i (\sigma'_f + z)}$$

où u , v , S dépendent de la nature du sol considéré et x , y , z dépendent en outre de l'épaisseur de la couche.

- L'application de chemins de contraintes par paliers de succion croissants ou décroissants entraîne une réponse différente selon les sols, dépendant de l'histoire du matériau ; par contre la mise au point d'un essai de mesure directe de la succion d'un sol dans un état donné (méthode du papier-filtre) permet de montrer qu'il existe une relation linéaire décroissante entre le logarithme de la succion τ (exprimée en pF), qui est aussi la pression de gonflement P_s du matériau, et la teneur en eau w :

Résumé (suite)

$$\log \tau = pF = \log P_s = - a w + b$$

où a et b sont des caractéristiques du sol.

La troisième partie concerne l'étude microscopique des variations de texture engendrées par le gonflement :

- une série d'observations au microscope électronique à balayage montre que les sols étudiés possèdent à l'état naturel une texture assez compacte constituée plus ou moins nettement d'agrégats argileux mal individualisés et tassés les uns contre les autres. Cette texture évolue lors du gonflement en une texture nettement en agrégats séparés par des pores plutôt bidimensionnels. Au cours du gonflement la taille des agrégats diminue et l'épaisseur des pores augmente.

- une étude par porosimétrie au mercure permet de quantifier certains paramètres texturaux. En particulier, au cours du gonflement, la porosité intra-agrégats ne varie pas tandis que la porosité inter-agrégats augmente, avec augmentation des rayons d'accès de pores (marquant une ouverture des pores). De plus, le logarithme du rayon modal de la classe de pores inter-agrégats est en relation linéaire croissante avec la teneur en eau du sol. L'évolution de la texture des sols argileux saturés étudiés au cours du gonflement est donc un phénomène essentiellement inter-agrégats que l'on peut représenter par un modèle capillaire simple.

Ainsi, l'utilisation d'une double démarche, observation naturaliste et mesures expérimentales, à l'échelle microscopique, permet à la fois de quantifier les paramètres géotechniques du gonflement à des fins pratiques, et d'approcher la réalité physique du phénomène.

~~~~~



## INTRODUCTION

---

Le gonflement des sols argileux, par décompression et/ou par apport d'eau, est la cause régulière de nombreux dommages : soulèvements de fonds de fouilles, destruction de chaussées, fissurations de bâtiments.

Jusque vers les années 1930, seul le tassement était considéré comme une cause possible de dégâts. C'est l'US Bureau of Reclamation qui le premier mit l'accent sur le phénomène de gonflement. Le développement des constructions en béton sur fondations superficielles amena alors de nombreux ingénieurs à se poser le problème en termes de gonflement des sols argileux (F.H. CHEN - 1975).

Si les dommages dus au gonflement sont très importants dans les pays à climat aride et semi-aride, Afrique, Australie, Amérique du Sud, Etats-Unis, où leur coût annuel représente environ 7000 millions de US dollars (J.P. KROHN et J.E. SLOSSON - 1980), ils se produisent néanmoins, mais à plus petite échelle, dans nos régions tempérées, par exemple en Région Parisienne dans les Marnes vertes du Sannoisien et les Argiles Plastiques du Sparnassien (G. PHILIPPONAT - 1978), ou en Vallée du Rhône dans les Argiles Pliocène (J. KERISEL, P. SAVEY - 1977).

En conséquence, le phénomène de gonflement fait l'objet de nombreuses études, aussi bien in situ qu'en laboratoire, que ce soit sur des sols initialement non saturés ou initialement saturés.

Ces études ont deux objectifs essentiels :

- . la compréhension du phénomène d'un point de vue mécanique et géologique ;
- . la modélisation du phénomène afin de connaître les divers paramètres caractérisant le gonflement à partir d'essais de laboratoire.

Après avoir défini les différents types de gonflements rencontrés dans les sols argileux, et les principaux objectifs de notre étude, et après avoir caractérisé de façon minéralogique et géologique les sols utilisés (Chapitre I), nous en viendrons à l'étude expérimentale (Chapitres II et III). Afin de ne pas trop séparer théorie et pratique, les revues bibliographiques relatives à chaque point étudié expérimentalement seront insérées respectivement au début de chaque paragraphe correspondant.

-----

# SOMMAIRE

---

## Pages

## INTRODUCTION

## PREMIER CHAPITRE

- . PRESENTATION DU PHENOMENE DE GONFLEMENT
- . CARACTERISATION MINERALOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DES SOLS ETUDIES

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| I.1. - <u>PRESENTATION DU PHENOMENE DE GONFLEMENT</u>                           | 1  |
| I.1.1. - <i>Gonflement interfoliaire et gonflement interparticulaire</i>        | 1  |
| I.1.1.1. - <i>Notions de Minéralogie des argiles</i>                            | 1  |
| I.1.1.2. - <i>Gonflement interfoliaire et gonflement interparticulaire</i>      | 3  |
| I.1.2. - <i>Le gonflement au sens Physico-chimique</i>                          | 3  |
| I.1.3. - <i>Le gonflement au sens mécanique</i>                                 | 6  |
| I.1.3.1. - <i>Contraintes dans un sol</i>                                       | 6  |
| I.1.3.2. - <i>Le gonflement dû à une modification de l'état des contraintes</i> | 9  |
| I.1.3.3. - <i>Relations entre succion et texture</i>                            | 12 |
| I.1.4. - <i>Caractérisation de notre domaine d'étude</i>                        | 13 |
| I.2. - <u>CARACTERISATION MINERALOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DES SOLS ETUDIES</u>    | 15 |
| I.2.1. - <i>Argiles Plastiques et Fausses Glaises</i>                           | 15 |
| I.2.1.1. - <i>Caractérisation minéralogique et chimique</i>                     | 15 |
| I.2.1.1.1. - <i>Caractérisation minéralogique</i>                               | 15 |

## II.

|                                                                    | <u>Pages</u> |
|--------------------------------------------------------------------|--------------|
| I.2.1.1.2. - Composition chimique : Fluorescence X et perte au feu | 16           |
| I.2.1.2. - Caractérisation géotechnique                            | 16           |
| I.2.1.2.1. - Caractérisations géotechniques classiques             | 16           |
| I.2.1.2.2. - Granularité                                           | 17           |
| I.2.1.2.3. - Critères indirects de gonflement                      | 18           |
| I.2.2. - Argiles Vertes et Marnes Bleues du Bassin de Paris        | 21           |
| I.2.2.1. - Caractérisation minéralogique et chimique               | 21           |
| I.2.2.1.1. - Composition minéralogique                             | 21           |
| I.2.2.1.2. - Composition chimique : Fluorescence X et perte au feu | 22           |
| I.2.2.2. - Caractérisation Géotechnique                            | 22           |
| I.2.2.2.1. - Caractéristiques géotechniques classiques             | 22           |
| I.2.2.2.2. - Granularité                                           | 23           |
| I.2.2.2.3. - Critères indirects de gonflement                      | 24           |
| I.2.3. - Argile Glaciaire d'Aix-Les-Bains                          | 25           |
| I.2.3.1. - Caractérisation minéralogique et chimique               | 25           |
| I.2.3.1.1. - Caractérisation minéralogique                         | 25           |
| I.2.3.1.2. - Composition chimique : Fluorescence X et perte au feu | 26           |
| I.2.3.1. - Caractérisation Géotechnique                            | 26           |
| I.2.3.2.1. - Caractéristiques géotechniques classiques             | 26           |
| I.2.3.2.2. - Granularité                                           | 26           |
| I.2.3.2.3. - Critères indirects de gonflement                      | 27           |

DEUXIEME CHAPITRE

## ETUDE DU GONFLEMENT A L'ECHELLE MACROSCOPIQUE

## PREAMBULE

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.0. - <u>PRESSION DE GONFLEMENT ET CRITERES INDIRECTS DE GONFLEMENT</u>                                    | 30 |
| II.0.1. - <i>Pression de gonflement</i>                                                                      | 30 |
| II.0.2. - <i>Caractérisation du gonflement à partir de critères indirects (les propriétés géotechniques)</i> | 32 |
| II.0.2.1. - <i>Limites d'ATTERBERG</i>                                                                       | 33 |
| II.0.2.2. - <i>Retrait linéaire</i>                                                                          | 34 |
| II.0.2.3. - <i>Fraction argileuse, activité de gonflement</i>                                                | 35 |
| II.0.2.4. - <i>Indice de gonflement libre</i>                                                                | 35 |
| II.0.2.5. - <i>Classification</i>                                                                            | 35 |
| II.0.2.6. - <i>Influence de la teneur en eau et de la densité sèche</i>                                      | 36 |
| II.0.2.7. - <i>Conclusions</i>                                                                               | 37 |
| II.1. - <u>ETUDE DE LA CINETIQUE DU GONFLEMENT ET D'UNE COUCHE ARGILEUSE DANS SON ENSEMBLE</u>               | 38 |
| II.1.1. - <i>Revue bibliographique</i>                                                                       | 38 |
| II.1.1.1. - <i>Essai de gonflement unidimensionnel</i>                                                       | 38 |
| II.1.1.2. - <i>Cinétique du gonflement</i>                                                                   | 39 |
| II.1.2. - <i>But de l'étude et moyens mis en oeuvre</i>                                                      | 40 |
| II.1.2.1. - <i>But de l'étude</i>                                                                            | 40 |
| II.1.2.2. - <i>Mode opératoire</i>                                                                           | 40 |
| II.1.3. - <i>Résultats des essais</i>                                                                        | 42 |
| II.1.4. - <i>Modélisation du gonflement par une loi hyperbolique</i>                                         | 57 |

|                                                                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.1.5. - Dispersion des taux de gonflement finaux                                                                       | 57 |
| II.1.6. - Etude du temps de demi-gonflement $B$ en fonction de l'épaisseur $h_0$ de la couche                            | 63 |
| II.1.6.1. - Argiles de Provins                                                                                           | 63 |
| II.1.6.2. - Vérification de la conclusion $B = Cho$                                                                      | 66 |
| II.1.7. - Méthodes indirectes pour déterminer $B = Cho$<br>Application à l'Argile Plastique de Provins                   | 67 |
| II.1.7.1. - Première méthode indirecte                                                                                   | 67 |
| II.1.7.2. - Deuxième méthode indirecte : influence de l'épaisseur de l'échantillon sur le gonflement absolu au temps $t$ | 70 |
| II.1.8. - Variation des valeurs numériques du coefficient $C$<br>(avec $C = B/h_0$ )                                     | 73 |
| II.1.9. - Conclusions                                                                                                    | 74 |
| II.2. - <u>PROPAGATION DU GONFLEMENT A L'INTERIEUR D'UNE COUCHE ARGILEUSE</u>                                            | 75 |
| II.2.1. - But de l'étude et revue bibliographique                                                                        | 75 |
| II.2.2. - Mode opératoire                                                                                                | 75 |
| II.2.3. - Essais effectués - Matériaux utilisés                                                                          | 77 |
| II.2.4. - Modélisations des divers sous-échantillons constitutifs d'un même échantillon                                  | 78 |
| II.2.5. - Comparaison entre les pourcentages de gonflement mesurés à l'aide des repères visuels et les teneurs en eau    | 80 |
| II.2.6. - Cinétique du gonflement des sous-échantillons d'un même échantillon : Modélisation 1                           | 82 |
| II.2.7. - Propagation du gonflement à l'intérieur de la couche :<br>Modélisation 2                                       | 94 |

|                                                                                                            | <u>Pages</u> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| II.2.8. - Propagation du front d'eau à l'intérieur de la couche :<br>Modélisation 2                        | 98           |
| II.2.9. - Distribution des gonflements absolus à l'intérieur de<br>la couche : Modélisation 2              | 102          |
| II.2.10. - Distribution de teneur en eau à l'intérieur de la carotte                                       | 107          |
| II.2.11. - Conclusions                                                                                     | 109          |
| I.3. - <u>INFLUENCE DES CONTRAINTES INITIALES ET FINALE SUR LE GONFLEMENT</u>                              | 110          |
| II.3.1. - Revue bibliographique et présentation de l'étude expéri-<br>mentale                              | 110          |
| II.3.1.1. - Revue bibliographique                                                                          | 110          |
| II.3.1.2. - Présentation de l'étude expérimentale et mode<br>opératoire                                    | 112          |
| II.3.2. - Evolution du taux de gonflement en fonction des contraintes<br>(Argile Verte de Villejuif)       | 115          |
| II.3.2.1. - Pour une contrainte initiale $\sigma'_i$ constante                                             | 115          |
| II.3.2.2. - Pour une contrainte finale $\sigma'_f$ constante                                               | 118          |
| II.3.2.3. - Détermination d'une relation générale<br>$G = f(\sigma'_i, \sigma'_f)$                         | 119          |
| II.3.2.4. - Détermination des constantes $u, v, s$                                                         | 121          |
| II.3.2.5. - Adéquation de la relation proposée avec les<br>valeurs expérimentales                          | 122          |
| II.3.3. - Evolution de temps de demi-gonflement en fonction des<br>contraintes (Argile Verte de Villejuif) | 123          |
| II.3.3.1. - Pour une contrainte initiale $\sigma'_i$ constante                                             | 123          |
| II.3.3.2. - Pour une contrainte finale $\sigma'_f$ constante                                               | 125          |
| II.3.3.3. - Détermination d'une relation générale<br>$B = G(\sigma'_i, \sigma'_f)$                         | 125          |



|                                                                                                                                                        | <u>Pages</u> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| II.3.3.4. - Détermination des constantes $x, y, z$                                                                                                     | 127          |
| II.3.3.5. - Adéquation de la relation proposée avec les valeurs expérimentales                                                                         | 127          |
| II.3.3.6. - Conclusions concernant l'étude de l'Argile Verte de Villejuif                                                                              | 128          |
| II.3.4. - Application des relations trouvées à d'autres sols                                                                                           | 129          |
| II.3.5. - Conclusions et applications pratiques                                                                                                        | 132          |
| II.4. - <u>CARACTERISATION DU POTENTIEL DE GONFLEMENT A PARTIR DE LA SUCCION DES SOLS</u>                                                              | 134          |
| II.4.1. - Etude théorique et bibliographique                                                                                                           | 134          |
| II.4.1.1. - Le complexe sol-eau                                                                                                                        | 134          |
| II.4.1.2. - Méthodes de mesure de la succion d'un sol                                                                                                  | 136          |
| II.4.1.2.1. - Méthodes permettant l'établissement d'une courbe de rétention d'eau                                                                      | 136          |
| II.4.1.2.1.1. - Dispositif à pression pneumatique                                                                                                      | 136          |
| II.4.1.2.1.2. - Dispositif à pression de vapeur                                                                                                        | 137          |
| II.4.1.2.1.3. - Cellule osmotique                                                                                                                      | 139          |
| II.4.1.2.2. - Méthodes mesurant directement la succion d'un sol                                                                                        | 140          |
| II.4.1.2.2.1. - Méthode du papier-filtre                                                                                                               | 140          |
| II.4.1.2.2.2. - Méthode psychrométrique                                                                                                                | 140          |
| II.4.1.3. - Etude des potentiels et des contraintes pendant un essai de mesure de succion. Relation avec l'essai classique de consolidation-gonflement | 141          |
| II.4.1.4. - Relations entre le gonflement et la succion des sols                                                                                       | 144          |

|                                                                                                                        | <u>Pages</u> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| II.4.2. - Comportement des sols en drainage et en imbibition :<br>utilisation de l'appareil de Richard                 | 146          |
| II.4.2.1. - Description du dispositif expérimental et mode<br>opératoire                                               | 147          |
| II.4.2.2. - Essais effectués                                                                                           | 149          |
| II.4.2.3. - Résultats                                                                                                  | 150          |
| II.4.2.4. - Interprétation des résultats                                                                               | 150          |
| II.4.2.4.1. - Argile Plastique de Provins                                                                              | 150          |
| II.4.2.4.2. - Fausses Glaises                                                                                          | 157          |
| II.4.2.4.3. - Argile Verte de Villejuif                                                                                | 159          |
| II.4.2.4.4. - Conclusions                                                                                              | 161          |
| II.4.3. - Application de la méthode du papier-filtre à l'étude du<br>potentiel de gonflement des sols argileux saturés | 162          |
| II.4.3.1. - Origines et évolutions de la méthode                                                                       | 162          |
| II.4.3.2. - Etude expérimentale                                                                                        | 163          |
| II.4.3.2.1. - Technique opératoire                                                                                     | 163          |
| II.4.3.2.2. - Essais effectués et interprétation<br>des résultats                                                      | 165          |

## TROISIEME CHAPITRE

### ETUDE DU GONFLEMENT A L'ECHELLE MICROSCOPIQUE

|              |     |
|--------------|-----|
| INTRODUCTION | 170 |
|--------------|-----|

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| II.1. - <u>DESCRIPTION DES ESSAIS ET BIBLIOGRAPHIE</u> | 171 |
|--------------------------------------------------------|-----|

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| III.1.1. - Description des essais | 171 |
|-----------------------------------|-----|

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| III.1.1.1. - Sols étudiés | 171 |
|---------------------------|-----|

|                                                                                   | <u>Pages</u> |
|-----------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| III.1.1.2. - Préparation des échantillons                                         | 171          |
| III.1.1.3. - Lyophilisation                                                       | 171          |
| III.1.1.4. - Description sommaire des techniques opératoires                      | 172          |
| III.1.2. - Etude bibliographique                                                  | 173          |
| III.1.2.1. - Texture des sols                                                     | 173          |
| III.1.2.2. - Le M.E.B. appliqué à l'étude du gonflement                           | 176          |
| III.1.2.3. - La porosimétrie appliquée à l'étude du gonflement                    | 176          |
| III.2. - <u>OBSERVATIONS AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE</u>                | 178          |
| III.2.1. - Terminologie                                                           | 178          |
| III.2.2. - Présentation de l'étude expérimentale                                  | 178          |
| III.2.3. - Argile Plastique de Provins                                            | 180          |
| III.2.3.1. - Description des observations                                         | 180          |
| III.2.3.2. - Comparaison des échantillons - Interprétation des observations       | 181          |
| III.2.4. - Fausses Glaises                                                        | 181          |
| III.2.4.1. - Description des échantillons                                         | 181          |
| III.2.4.2. - Comparaison des échantillons - Interprétation des observations       | 184          |
| III.2.5. - Argile Verte de Montreuil                                              | 184          |
| III.2.5.1. - Description des échantillons                                         | 186          |
| III.2.5.2. - Comparaison des trois échantillons : interprétation des observations | 186          |

*III.2.6. - Marne Bleue de Nogent* 187

*III.2.6.1. - Description des échantillons* 187

*III.2.6.2. - Comparaison des deux types d'échantillons :  
interprétation des observations* 187

*III.2.7. - Argile d'Aix-Les-Bains* 190

*III.2.8. - Conclusions : évolution de la texture des sols au cours  
du gonflement appréciée au M.E.B.* 190

*III.3. - ETUDE POROSIMETRIQUE* 192

*III.3.1. - Terminologie - Représentations graphiques - Unités* 192

*III.3.2. - Modèle d'interprétation d'un essai porosimétrique* 193

*III.3.3. - Etude du spectre de porosité des matériaux naturels* 195

*III.3.4. - Evolution du volume poreux total* 196

*III.3.5. - Evolution de la microporosité* 196

*III.3.6. - Evolution de la porosité piégée et de la porosité libre* 197

*III.3.7. - Evolution des classes de pores* 198

*III.4. - CONCLUSIONS GENERALES CONCERNANT L'ETUDE DE LA TEXTURE* 211

**CONCLUSIONS GENERALES** 213

**BIBLIOGRAPHIE** 216

**ANNEXE I -** 226

- . MISE AU POINT DE L'ESSAI DE LIMITE DE RETRAIT
- . RESUME DES PRINCIPALES METHODES D'IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE ET  
PETROGRAPHIQUE

**ANNEXE II -** 234

- . LISTE DES POINTS DE MESURE EXPERIMENTAUX DES ESSAIS DE GONFLEMENT

## PREMIER CHAPITRE

PRESENTATION DU PHENOMENE DE GONFLEMENT  
CARACTERISATION MINERALOGIQUE ET GEOTECHNIQUE DES SOLS ETUDIES

## I.1. - PRESENTATION DU PHENOMENE DE GONFLEMENT

### I.1.1. - Gonflement interfoliaire, Gonflement interparticulaire

#### I.1.1.1. - Notions de Minéralogie des argiles

Les minéraux argileux sont des silicates d'aluminium hydratés. Ils font presque tous partie de la famille des phyllosilicates, c'est-à-dire des minéraux à structure en feuillets. Les feuillets sont constitués à partir de 2 unités structurales de base :

- le tétraèdre  $\text{SiO}_4$  : 4 atomes d'oxygène enserrant un atome de silicium équidistant à chacun d'eux. Les tétraèdres se combinent entre eux pour former des couches planes dites couches tétraédriques.
- l'octaèdre  $\text{Al}_2(\text{OH})_6$  ou  $\text{Mg}_3(\text{OH})_6$  : 6 ions hydroxyles enserrant un atome d'aluminium ou un atome de magnésium. Les octaèdres se combinent également pour former des couches planes dites couches octaédriques.

Un feuillet élémentaire est constitué par l'assemblage de 2 ou 3 couches octaédriques et tétraédriques et les feuillets s'empilent pour former la particule d'argile, définie comme le plus petit empilement typique que l'on peut observer (de l'ordre du  $\mu$  ou d'une fraction de  $\mu$  et en principe inférieur à  $2\mu$  selon la définition granulométrique des argiles).

La Figure I.1.1. donne un exemple de la structure en feuillets ; le Tableau I.1.1. constitue un résumé de minéralogie des argiles.

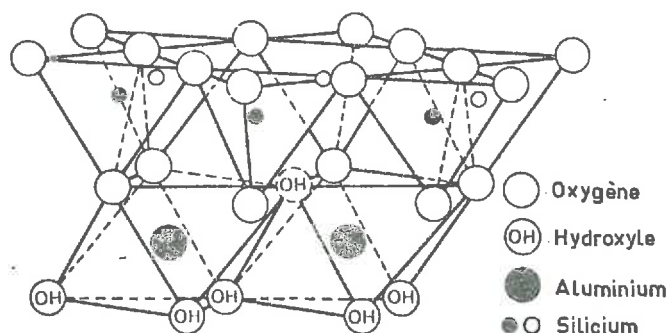


Figure I.1.1. - Structure de la Kaolinite (d'après JK. MITCHELL, 1976)



# PHYLLOSILICATES A FEUILLETS DE MICA 2/1 [POUR $\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2$ ]

| n° de<br>série | Sites octaéd.                                 |                 | Substitution avec modification de charge |                                                | Cations interfoliaires |                        | Espace-ment  | Noms     | Formules types  |
|----------------|-----------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------|------------------------------------------------|------------------------|------------------------|--------------|----------|-----------------|
|                | occup.<br>n°                                  | caïques         | repart.                                  | dans sites tétra.                              | dans sites octa.       | non<br>échangeables    | échangeables |          |                 |
| 1              | 2                                             | Al              |                                          |                                                |                        |                        |              | stable   | PYROPHYLLITE    |
|                | 3                                             | Mg              |                                          |                                                |                        |                        |              | stable   | TALC            |
| 2              | Al                                            | ord.            | 1/4 Si par Al                            |                                                |                        | K                      |              | stable   | MUSCOVITE       |
|                | Al                                            |                 | Si par Al                                | Al par $\text{Mg}$<br>$\text{Fe}^{2+}$         |                        | K                      |              | stable   | PHENGITE        |
|                | Al                                            | ord.            | 1/4 Si par Al                            |                                                |                        | Na                     |              | stable   | PARAGONITE      |
|                | $\text{Fe}^{3+}$                              |                 |                                          | 1/2 $\text{Fe}^{3+}$ par Mg                    |                        | K                      |              | stable   | GELADONITE      |
| 3              | Mg                                            | ord.            | 1/4 Si par Al                            |                                                |                        | K                      |              | stable   | PHLOGOPITE      |
|                | $\text{Mg}$ , $\text{Mn}$<br>$\text{Fe}^{2+}$ | ord.            | Si par Al                                | $\text{Mg}$ par $\text{Fe}^{3+}$<br>Al, Ti     |                        | K                      |              | stable   | BICTITE         |
| 2              | Al                                            | ord.            | 1/2 Si par Al                            |                                                |                        | Ca                     |              | stable   | MARGARITE       |
| 3              | Mg                                            | ord.            | 1/2 Si par Al                            |                                                |                        | Ca                     |              | stable   | CLINTONITE      |
| 2              | Al                                            | ord.            | Si par Al                                | 2 Al par Ti<br>$\text{Mg}$ , $\text{Fe}$       |                        | K, Na, Ca, $\text{OH}$ |              | stable   | ILLITE          |
|                | $\text{Fe}^{3+}$<br>Al                        | ord.            | Si par Al                                | $\text{Fe}^{3+}$ par $\text{Fe}^{2+}$<br>et Mg |                        | K, Na, Ca              |              | stable   | GLAUCONITE      |
| 3              | Mg<br>$\text{Fe}^{2+}$                        | ord.            | Si par Al                                | Mg par $\text{Fe}^{3+}$                        |                        | $\text{Mg}$ , Ca, Na   |              | variable | VERMICULITE     |
| 2              | Al                                            | désord.         |                                          | Al par Mg                                      |                        | Na, Ca                 |              | variable | MONTMORILLONITE |
|                | $\text{Fe}^{3+}$<br>Al                        | ord.<br>désord. | Si par Al                                | Al par Mg                                      |                        | Na                     |              | variable | BEIDELLITE      |
|                | $\text{Fe}^{3+}$<br>Al                        | ord.            | Si par Al                                |                                                |                        | K                      |              | variable | NONTRONITE      |
|                | Al, Cr                                        | ord.            | Si par Al                                |                                                |                        | K                      |              | variable | VOLKONSKOITE    |
| 3              | Mg                                            | désord.         |                                          | Mg par Li<br>ou tétra                          |                        | Na                     |              | variable | HECTORITE       |
|                | Mg                                            | désord.         |                                          | Mg par<br>La, tétra                            |                        | Na                     |              | variable | STEVENSITE      |
|                | Mg                                            | désord.         | Si par Al                                |                                                |                        | Na                     |              | variable | SAPONITE        |

## MINÉRAUX PHYLLOTEUX A FEUILLETS DE KAOLINITE (7Å)

| n° de<br>série | Sites octaédriques |           | Substitution avec<br>modification de charge    |                       | Espace-ment | Noms                | Formules types                                             |                                              |
|----------------|--------------------|-----------|------------------------------------------------|-----------------------|-------------|---------------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
|                | occup.<br>n°       | caïques   | sites<br>tétraédriques                         | sites<br>octaédriques |             |                     | octaédrique                                                | tétraédrique                                 |
| 1/3            | Al                 |           |                                                |                       | stable      | KAOLINITE           | $\text{Al}_4(\text{OH})_8$                                 | $\text{Si}_4\text{O}_{10}$                   |
|                | Al                 |           |                                                |                       | variable    | HALLOYSITE          | $\text{Al}_4(\text{OH})_8$                                 | $\text{Si}_4\text{O}_{10}\text{H}_2\text{O}$ |
| 1/3            | Mg                 |           |                                                |                       | stable      | ANTIGORITE          | $\text{Mg}_6(\text{OH})_8$                                 | $\text{Si}_4\text{O}_{10}$                   |
|                | Ni, Mg             |           |                                                |                       | stable      | Nouméite - Népouïte | $(\text{Ni}, \text{Mg})_6(\text{OH})_8$                    | $\text{Si}_4\text{O}_{10}$                   |
|                | $\text{Fe}^{2+}$   | Si par Al | Fe par Al                                      |                       | stable      | Berthiérine         | $\text{Fe}_{6-x}\text{Al}_x(\text{OH})_8$                  | $\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x\text{O}_{10}$    |
|                | $\text{Fe}^{2+}$   | Si par Al | $\text{Fe}^{3+}$ par Al ou<br>$\text{Fe}^{3+}$ |                       | stable      | Berthiérine oxydée  | $\text{Fe}_{6-x-y}\text{Al}_x\text{Fe}_y(\text{OH})_{8-y}$ | $\text{Si}_{4-x}\text{Al}_x\text{O}_{10+y}$  |

TABLEAU I.1.1. - Classification des différents minéraux argileux  
(d'après PHAN, 1976)

La particule d'argile présente une charge nette négative due à des substitutions isomorphes au niveau des feuillets (un cation de valeur élevée est remplacé par un cation de valeur plus faible). Les substitutions les plus courantes sont  $\text{Si}^{4+}$  remplacé par  $\text{Al}^{3+}$  ou  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  remplacé par  $\text{Mg}^{2+}$ .

Il s'ensuit des propriétés adsorbantes, qui se traduisent par la fixation de cations et de molécules polaires afin d'assurer à l'ensemble eau-argile l'électroneutralité. D'où la formation, autour de chaque particule, d'une double couche électrique diffuse (dite de GOUY CHAPMAN), dont la première est constituée par la charge négative sur la surface de la particule et la seconde par la concentration de cations autour de la particule. Le nuage de cations est lui-même formé d'une couche plus ou moins fixée à la surface de la particule (couche de STERN) et d'une distribution diffuse qui s'étend jusqu'à une certaine distance de la surface de la particule (D. HILLEL, 1974).

#### I.1.1.2. - Gonflement interfoliaire et gonflement interparticulaire

Certaines argiles, pour lesquelles les liaisons interfeuillets sont très faibles, ont la propriété de fixer des molécules d'eau entre deux feuillets voisins (c'est le cas des smectites et de certaines chlorites). L'eau pénètre à l'intérieur des particules et s'organise en couches monomoléculaires, il s'agit alors d'un gonflement intraparticulaire ou interfoliaire (G. DIDIER, 1972). En dehors de ce cas particulier, qui définit les argiles dites "gonflantes", le gonflement est interparticulaire, c'est-à-dire que l'eau ne pénètre pas à l'intérieur des particules d'argile.

#### I.1.2. - Le gonflement au sens Physico-chimique

L'ensemble de la double couche, à savoir la particule d'argile, les ions adsorbés et l'eau, constitue un champ électrique. Les cations sont attirés à la surface des particules par le champ électrique, par contre l'eau peut circuler dans le milieu. Le champ électrique agit donc comme une membrane semi-perméable laissant passer l'eau mais pas les ions. Si la concentration de l'eau dite libre circulant dans le sol est inférieure à la concentration de l'eau de la double couche, il s'ensuit une pression osmotique de répulsion, s'exprimant par un gonflement, et déterminée par l'équation de VANT'HOFF :

$$P_o = RT \cdot (C_1 - C_2)$$

où

$P_o$  = pression osmotique de répulsion

$R$  = constante des gaz parfaits : 85 Kg cm/mole K

$T$  = température absolue (K)

$C_1$  = concentration de la double couche mole/m<sup>3</sup>

$C_2$  = concentration du liquide interstitiel mole/m<sup>3</sup>

Sans détailler ici la théorie de la double couche qui a été développée par ailleurs (JP. CITTANOVA, 1970 - JM. RUNACHER 1970), nous pouvons en donner les résultats principaux.

L'épaisseur de la double couche associée à une particule est donnée par la relation :

$$\frac{1}{K} = \sqrt{\frac{D.k.T.}{8\pi C_2 \epsilon^2 z^2}}$$

|    |               |                                                         |
|----|---------------|---------------------------------------------------------|
| où | $\frac{1}{K}$ | épaisseur de la double couche (cm)                      |
|    | D             | constante diélectrique du milieu liquide                |
|    | k             | constante de BOLTZMANN = $1,38 \cdot 10^{-16}$ ues      |
|    | $\epsilon$    | charge électrique d'1 électron $4,8 \cdot 10^{-10}$ ues |
|    | T             | Température absolue °K                                  |
|    | z             | Valence des cations                                     |
|    | $C_2$         | concentration du milieu liquide ions/m <sup>3</sup>     |

Le gonflement représentant l'extension des doubles couches, ce phénomène se développera en particulier avec :

- . une diminution de la concentration du liquide interstitiel
- . une diminution de la valeur des ions
- . une augmentation de la taille des ions hydratés
- . une augmentation du pH
- . une augmentation de l'adsorption d'anions
- . une augmentation de la constante diélectrique

En considérant un modèle de sol constitué de particules équidistantes de distance  $2d$  et de longueur infinie, la pression de gonflement  $P_s$ , entièrement supportée par la pression de répulsion de la double couche, a pu être approchée par l'expression (JM. RUNACHER, 1970) :

$$\log \left( \frac{P_s}{RT C_1} \right) = \log 64 - 0,4343 \left[ 2 z \sqrt{\beta C_1} \left( X_0 + \frac{e}{\gamma_s \cdot S} \right) \right]$$

|    |                                  |                                                                    |
|----|----------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| où | $\beta$                          | = $1,06 \cdot 10^{15}$ cm/m moles pour l'eau à 25°                 |
|    | $\gamma_s$                       | = densité des grains g/cm <sup>2</sup>                             |
|    | $X_0 = \frac{4}{2 \beta \sigma}$ | $\sigma$ = charge superficielle des particules meq/mm <sup>2</sup> |
|    | $e$                              | = indice des vides                                                 |
|    | S                                | = surface spécifique g/cm <sup>2</sup>                             |

On en déduit un indice de gonflement :

$$Cs = \frac{de}{d(\log Ps)} = \alpha . S \quad \text{avec } \alpha = \frac{-76}{0,87 . z . \sqrt{\rho C_1}}$$

L'indice de gonflement  $Cs$  est proportionnel à la surface spécifique du matériau.

De plus la pression de répulsion entre deux particules d'argiles distantes de  $2d$  baignées dans une solution ionique peut être déterminée en fonction de  $d$  à partir de la théorie DLVO (DEJARGUIN, LANDAU, VERWEY, OVERBEEK) en combinant l'équation de la pression osmotique de BOLTZMANN et l'équation différentielle de POISSON. Un exemple typique de cette relation, d'après P. LOW, est donné par la Figure I.1.2.

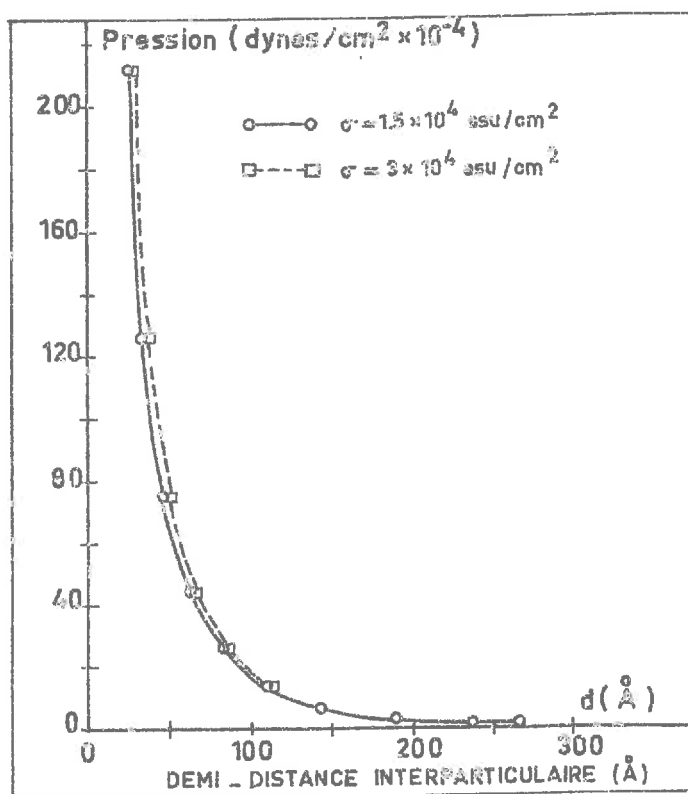


Figure I.1.2.- Pression de répulsion  $p$  entre deux particules de montmorillonite adjacente de distance  $2d$ , pour deux valeurs de la densité de charge  $T$  (d'après P. LOW).

A partir de cette même théorie, F.T. MADSEN (1976, 1979) détermine la pression de répulsion  $p$  par l'expression suivante :

$$p = 2 C.k.T. (\cosh u - 1)$$

où  $u$  est le potentiel électrique au milieu de la distance interparticulaire et  $C$  la concentration du milieu liquide.

Ce potentiel électrique  $u$  dépend lui-même de la demi-distance interparticulaire  $d$ , de la valence des ions  $z$ , et de la charge spécifique surfacique  $\sigma$ . MADSEN obtient de plus une corrélation satisfaisante entre la pression de répulsion ainsi calculée et la pression de gonflement mesurée expérimentalement.

La théorie de la double couche reste évidemment limitée, de part les hypothèses faites sur le milieu (par exemple : pas d'interaction entre les ions, particules infinies et parallèles, etc...).

On peut en première approximation dire que la théorie de la double couche est applicable quand le moteur du gonflement est la pression de répulsion osmotique, c'est-à-dire quand on a affaire à des sols sursaturés en cations en présence d'une eau de circulation à faible concentration ionique.

Dans tous les autres cas, ce modèle n'est pas suffisant; il est alors fondamental d'étudier le gonflement des sols argileux à partir d'autres propriétés que les propriétés physico-chimiques, à savoir les propriétés géotechniques et mécaniques.

### I.1.3. - Le gonflement au sens mécanique

Le phénomène de gonflement, de même que le tassement, provient d'une modification de l'état des contraintes dans le sol en présence d'eau. Il est donc important de rappeler les bases de la mécanique des sols concernant l'état des contraintes dans un sol.

#### I.1.3.1. - Contraintes dans un sol

Un sol est un système constitué de 3 phases : une phase solide (les particules solides), une phase liquide (eau interstitielle), une phase gazeuse (bulles d'air ou film d'air continu).

Le sol est saturé si la phase gazeuse disparaît, c'est-à-dire si tous les vides interparticulaires sont occupés par l'eau interstitielle.

Dans un sol saturé soumis à une contrainte totale  $\sigma$  (géostatique ou surcharge

extérieure),  $\sigma$  se décompose en :  $\sigma = \sigma' + u$  (théorie de TERZAGHI)  $u$  étant la pression interstitielle à savoir pression de l'eau des pores et  $\sigma'$  la contrainte effective, c'est-à-dire la contrainte qui s'exerce sur le squelette solide.

Si le sol a la possibilité de se drainer et est à l'équilibre, la pression interstitielle  $u$  est nulle et on a  $\sigma = \sigma'$ .

Si l'élément de sol considéré est situé sous la nappe phréatique (Figure I.1.3.) à une cote  $z$ , la pression interstitielle est égale à la pression exercée par la colonne d'eau susjacent  $u = \gamma_w \cdot z$ .

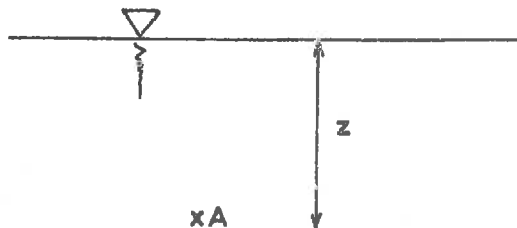


Figure I.1.3. - élément de sol pris à une cote  $z$  sous la nappe

Si par contre il se situe au-dessus de la nappe phréatique, il peut être saturé ou non, selon les caractéristiques du matériau qui le compose et la distance qui le sépare du toit de la nappe.

La Figure I.1.4. présente le profil hydrique d'un sol argileux situé au-dessus du toit de la nappe. Saturé sous la nappe, le sol reste saturé à une certaine distance au-dessus de la nappe en raison des phénomènes de capillarité et de retrait.

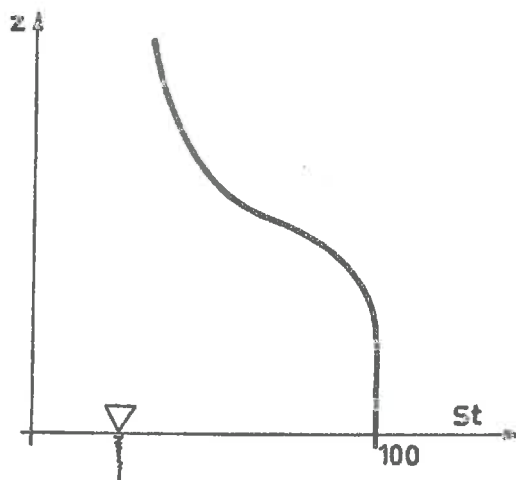


Figure I.1.4. - Profil hydrique d'un sol argileux au dessus du toit de la nappe



L'attraction entre les molécules adjacentes à la surface d'un fluide (tension de surface) lui permet de s'élever dans un capillaire au-dessus de la ligne de pression atmosphérique. La hauteur de fluide dans le capillaire est donnée par la loi de JURIN :

$$H = \frac{2 \sigma \cos \theta}{\gamma \cdot R} \quad (\text{S. HENIN, 1977})$$

$\sigma$  = tension de surface  
 $R$  = rayon du capillaire  
 $\theta$  = angle de contact liquide/capillaire  
 $\gamma$  = densité du fluide

C'est ce phénomène qui permet à un sol de retenir de l'eau au-dessus du toit de la nappe, par l'intermédiaire de son réseau poreux.

L'étude du retrait des sols argileux (voir Annexe I.1.) montre que jusqu'à une teneur en eau caractéristique appelée limite de retrait, le volume d'eau qui sort est égal à la diminution de volume du sol et donc le sol reste à l'état saturé.

C'est la conjugaison de ces deux phénomènes, capillarité et retrait linéaire, qui permet à un sol d'être saturé tout en se situant au-dessus du toit de la nappe. Si donc l'élément de sol considéré est à la cote  $z$  au-dessus du toit de la nappe (voir Figure I.1.5.) et est saturé, la pression interstitielle  $u$  est inférieure à la pression atmosphérique. On la définit comme négative et elle est égale à  $u = -\gamma_w z$

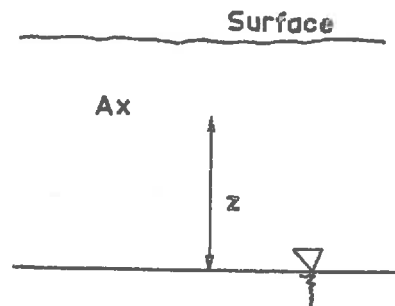


Figure I.1.5. - Élément de sol situé à une cote  $z$  au-dessus du toit de la nappe

Elle représente la succion capillaire du sol  $\tau$ , qui dans le cas simple d'un tube capillaire cylindrique est donnée par la loi de JURIN', et qui caractérise la capacité du sol à retenir de l'eau au-dessus du toit de la nappe.

Si au contraire, l'élément de sol considéré n'est pas saturé, la pression interstitielle négative est fonction de la pression d'eau  $u_w$  et de la pression d'air  $u_a$  dans le sol.  $u^*$ , ou pression interstitielle équivalente, est évaluée par :

$$u^* = u_a + \chi (u_w - u_a)$$

où  $\chi$  est un coefficient correcteur qui dépend du degré de saturation du sol.  $\chi$  varie entre 0 et 1, et est égal à 1 pour un sol saturé (T.W. LAMBE et R.V. WHITMAN, 1969).

#### I.1.3.2. - Le gonflement dû à une modification de l'état des contraintes

Considérons un élément de sol saturé à l'équilibre. Si une contrainte extérieure  $\sigma_0$  est appliquée à cet élément de sol, l'eau étant moins compressible que le squelette solide, la contrainte  $\sigma_0$  est immédiatement appliquée sur la phase liquide et au temps initial  $t = 0$  on a :

$$\begin{cases} u = \sigma_0 \\ \sigma' = 0 \end{cases}$$

Si on permet alors au sol de se drainer, un phénomène de consolidation va se développer, exprimant le transfert de contrainte de l'eau sur le squelette solide. Un nouvel équilibre va alors s'établir pour l'état de contraintes :

$$\begin{cases} u = 0 \\ \sigma' = \sigma_0 \end{cases}$$

Si la contrainte  $\sigma_0$  est alors supprimée, le même phénomène se produit en sens inverse, et immédiatement :

$$\begin{cases} u = -\sigma_0 \\ \sigma' = \sigma_0 \end{cases}$$

La pression interstitielle devient négative (dans le domaine des suctions) et opposée à la variation de contrainte totale.

Des dispositifs expérimentaux (T.W. LAMBE, R.V. WHITMAN, 1969) ont ainsi permis de mesurer des pressions interstitielles négatives bien inférieures à zéro.

Dans des conditions de libre circulation de l'eau, un phénomène de gonflement va alors se développer, exprimant le transfert de contrainte négative de l'eau sur le squelette solide, jusqu'à l'état d'équilibre final.

$$\begin{cases} \sigma' = 0 \\ u = 0 \end{cases} \quad (\text{cas théorique})$$

Il est donc possible d'affirmer que si la consolidation exprime une diminution de la pression interstitielle jusqu'à son annulation, le gonflement exprime quant à lui la diminution de la succion ( $-u$ ) jusqu'à son annulation.

Le cas d'un sol surconsolidé mérite qu'on s'y attarde, puisqu'un tel sol peut gonfler en présence d'eau sans variation de la contrainte totale.

Considérons un sol surconsolidé, de pression de préconsolidation  $\sigma'_c$ , et dans l'état actuel soumis à une contrainte totale  $\sigma_0$  telle que  $\sigma_0 < \sigma'_c$ . Si on reconstitue l'histoire théorique de ce sol, il a connu un premier état d'équilibre

$$\begin{cases} \sigma = \sigma'_c = \sigma' \\ u = 0 \end{cases}$$

puis il a été déchargé à  $\sigma_0 < \sigma'_c$  sans arrivée d'eau, produisant ainsi une succion capillaire dans le sol égale à  $\tau = -u = \sigma'_c - \sigma_0$ . Dans les conditions actuelles, l'état des contraintes est donc le suivant :

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_0 \\ \sigma' = \sigma'_c \\ u = -(\sigma'_c - \sigma_0) = -\tau \end{cases}$$

Un apport d'eau dans ces conditions va donc entraîner une diminution de la succion capillaire, s'exprimant par un gonflement, jusqu'à l'état d'équilibre

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_0 \\ \sigma' = \sigma'_0 \\ u = 0 \end{cases}$$

D'une façon générale, si on connaît la profondeur du toit de la nappe et la profondeur de l'élément de sol considéré, les contraintes peuvent alors être calculées directement. Considérons donc un terrain saturé au-dessus de la nappe (voir Figure I.1.6.) soumis à une surcharge  $\sigma_1$ . En un point de cote  $z$ ,

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |   |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|--------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>. la contrainte totale est <math>\sigma = \gamma z + \sigma_1</math></li> <li>. la succion capillaire est <math>\tau = -u = \gamma_w (H_0 - z)</math></li> <li>. et par conséquent <math>\sigma' = \sigma - u = (\gamma - \gamma_w)z + \gamma_w H_0 + \sigma_1</math></li> </ul> | } | ETAT 0 |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---|--------|

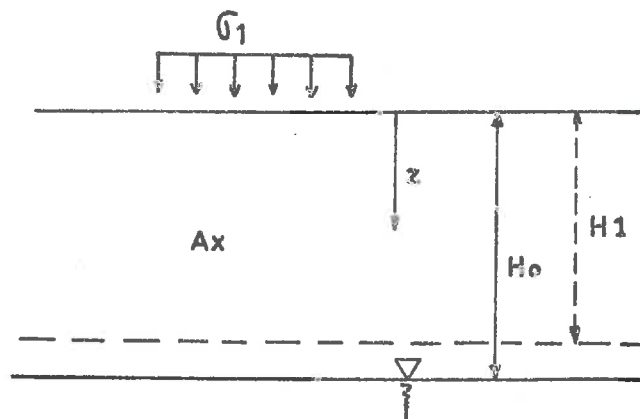


Figure I.1.6. - Schématisation d'un terrain situé au-dessus du toit de la nappe

Si le toit de la nappe monte jusqu'à une cote  $H_1$ , de nouvelles conditions d'équilibre vont s'établir :

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \gamma z + \sigma_1 \\ u &= \gamma_w (z - H_1) \\ \sigma' &= (\gamma - \gamma_w) z + \gamma_w H_1 + \sigma_1 \end{aligned} \right\} \text{ETAT 1}$$

La succion capillaire  $\tau = -u$  a diminué de  $\Delta(\tau) = \gamma_w (H_0 - H_1)$  s'accompagnant ainsi d'un certain gonflement.

Si le sol est alors déchargé de  $\sigma_1$  à 0, la variation de contrainte totale  $-\sigma_1$  se transmet immédiatement sur  $u$ , entraînant l'augmentation de la succion capillaire

$$\begin{aligned} \sigma &= \gamma z \\ u &= \gamma_w (z - H_1) - \sigma_1 \\ \sigma' &= (\gamma - \gamma_w) z + \gamma_w H_1 + \sigma_1 \end{aligned}$$

De nouvelles conditions d'équilibre vont alors s'établir, le toit de la nappe monte à une cote  $H_2 < H_1$ , entraînant ainsi une diminution de succion capillaire de  $\Delta u = \gamma_w (H_1 - H_2)$  et donc un gonflement jusqu'à l'état d'équilibre

$$\begin{aligned} \sigma &= \gamma z \\ u &= \gamma_w (z - H_2) \\ \sigma' &= (\gamma - \gamma_w) z + \gamma_w H_2 \end{aligned}$$

Le raisonnement que nous venons de développer, permet d'expliquer les causes du gonflement interparticulaire des sols, mais ne permet pas de le quantifier directement car il dépend non seulement de l'état des contraintes mais aussi de la nature du sol et du fluide considérés.

#### I.1.3.3. - Relations entre succion et texture

Nous venons de voir que le potentiel de gonflement d'un sol est dû à l'existence d'une pression négative ou succion dans le sol. La succion d'un sol peut être causée par exemple par un déchargement mécanique ou par un séchage (contrainte capillaire).

Tant que le sol reste saturé il y a équivalence entre contrainte mécanique et contrainte capillaire puisqu'aucune pression d'air n'intervient. Quand il se désature, à la pression d'eau doit être ajoutée une pression d'air pour obtenir la succion du sol.

Mais outre les phénomènes mécaniques, la succion est intimement liée à la texture du sol par l'intermédiaire de son réseau poreux (de façon analogue à la succion d'un tube capillaire cylindrique déterminée par la loi de JURIN).

La texture du sol définit sa succion, qui peut être potentielle si le sol est normalement consolidé (elle est alors équilibrée par la pression de surcharge) ou effective si le sol est surconsolidé. Il est alors possible de modéliser le processus de gonflement à partir de la texture du sol :

- . cas d'un sol surconsolidé : dans un état d'équilibre donné le sol possède une certaine texture qui par la distribution de son réseau poreux détermine une succion exprimant sa capacité à absorber de l'eau. En présence d'eau, l'équilibre est rompu et le sol va dissiper sa succion en gonflant. Il va s'ensuivre une modification de texture jusqu'à un second état d'équilibre.
- . cas d'un sol normalement consolidé : dans un état d'équilibre donné le sol est soumis à une contrainte totale et effective  $\sigma$  qui détermine une certaine texture. La pression interstitielle est nulle, donc la succion effective est nulle, mais potentiellement le sol peut développer une succion, définie par la texture, et égale à la contrainte totale de consolidation. Si le sol est déchargé, cette succion potentielle devient effective, et va se dissiper en présence d'eau en entraînant un gonflement. Il va s'ensuivre une modification de texture jusqu'à un nouvel état d'équilibre.

On voit ainsi que les phénomènes mécaniques (contrainte mécanique, pression interstitielle, succion) ont des liens très étroits avec la texture des sols.

#### I.1.4. - Caractérisation de notre domaine d'étude

Notre travail a pour but d'étudier le gonflement interparticulaire des sols argileux saturés partiellement ou totalement déchargés.

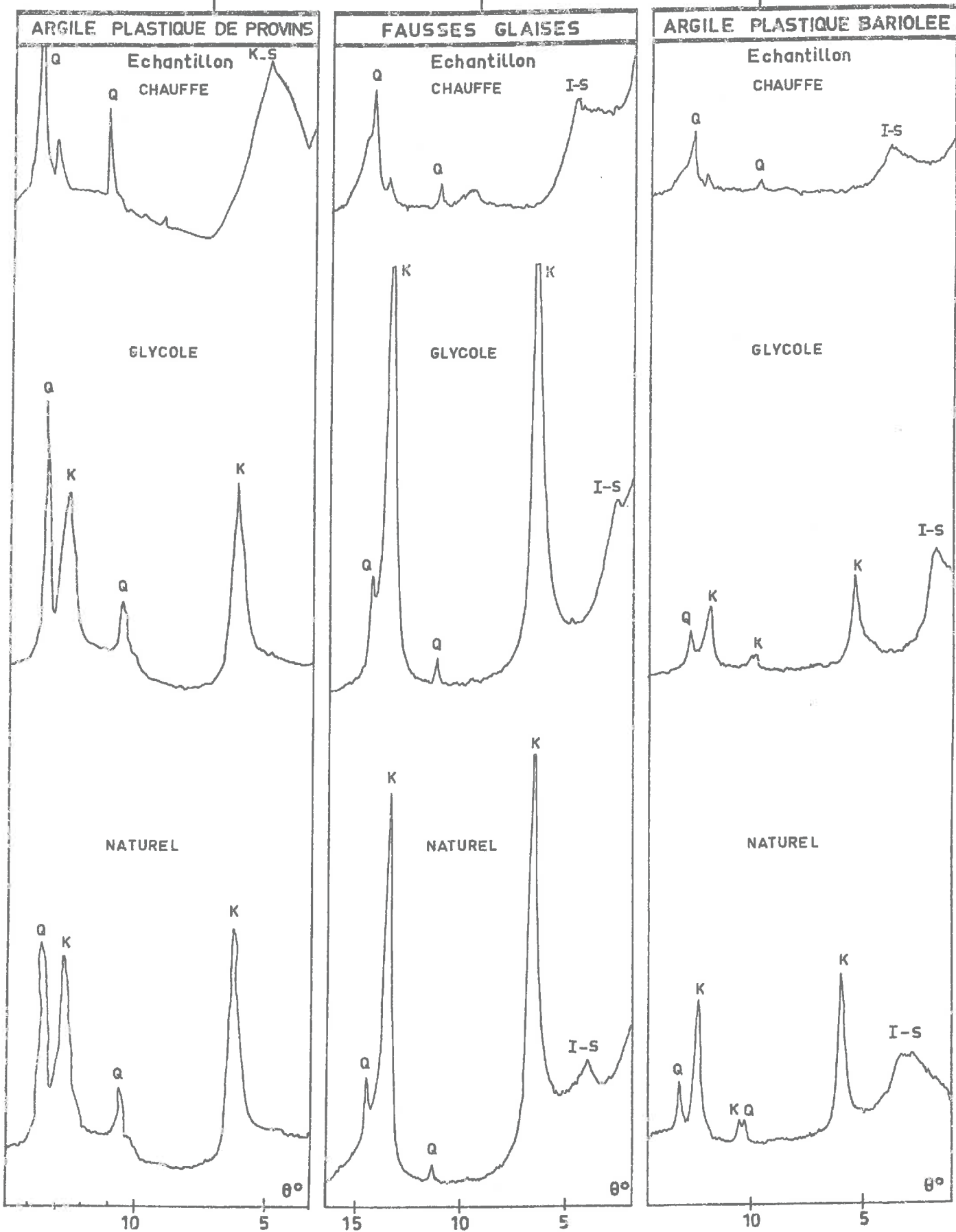
Les causes physico-chimiques du gonflement (pression de répulsion osmotique) sont donc négligées devant les causes mécaniques car la teneur en cations des sols étudiés n'est pas modifiée, et c'est la succion capillaire, par l'intermédiaire de la texture du sol, qui règle le gonflement (voir Paragraphe II.4. et Chapitre III), et y joue le rôle prédominant.

Le paragraphe précédent montrant l'influence de la texture des sols sur leur gonflement, il est nécessaire d'effectuer une étude à deux échelles :

- . échelle macroscopique dans le but de prédire le gonflement à partir d'essais de laboratoire (Chapitre II)
- . échelle microscopique dans le but de visualiser l'évolution de la texture des sols au cours du gonflement (Chapitre III).



Fig. I. 2.1. — Diffractogrammes des Argiles Plastiques



## I.2. - CARACTERISATION MINÉRALOGIQUE ET GÉOTECHNIQUE DES SOLS ETUDIÉS

Nous avons groupé les sols étudiés en trois catégories que nous caractériserons séparément d'un point de vue minéralogique et géotechnique :

- . les Argiles Plastiques et les Fausses Glaises du Sparnacien
- . les Argiles Vertes du Sannoisien et les Marnes Bleues du Ludien
- . 1' Argile Glaciaire d'Aix Les Bains

### I.2.1. - Argiles Plastiques et Fausses Glaises

Nous avons étudié trois types de dépôts sédimentaires d'origine laguno-continentale, tous trois d'âge Sparnacien :

- . 1' Argile Plastique de Provins
- . 1' Argile Plastique Bariolée de La Défense
- . les Fausses Glaises de La Défense

Le premier type de sol a été prélevé par abattage à ST-GENEST, dans le bassin de Provins, dans une exploitation à ciel ouvert de la Société Denain Anzin Minéraux. Ce dépôt a été finement étudié par M. THIRY (1977) d'un point de vue minéralogique et chimique.

Les deux autres types de sol, prélevés par carottage lors d'un sondage, ont été étudiés par J.P. GIGAN (1973).

#### I.2.1.1. - Caractérisation minéralogique et chimique

##### I.2.1.1.1. - Caractérisation minéralogique

La nature minéralogique a été déterminée à partir de la diffraction X sur trois échantillons par sol, un échantillon naturel, un échantillon glycolé et un échantillon chauffé.

Les diffractogrammes obtenus pour les trois types de sol en question sont présentés à la Figure I.2.1.

L'Argile Plastique de Provins est composée presque exclusivement de Kaolinite et de quartz. Un traitement à l'hydrazine a montré (pic à 7A° faiblement affecté) que cette formation s'apparente aux fire-clays (kaolin mal cristallisé) corroborant ainsi les conclusions de M. THIRY (1977).

- L'Argile Plastique Bariolée est composée essentiellement de kaolinite, en moindre importance, d'un interstratifié illite-smectite et d'un peu de quartz. La kaolinite s'apparente également aux fire-clays.
- Les Fausses Glaises sont composées essentiellement de kaolinite, d'un interstratifié illite-smectite et de quartz. La kaolinite semble légèrement mieux cristallisée que les précédentes.

I.2.1.1.2. - Composition chimique : Fluorescence X et  
perte au feu

Le Tableau I.2.1. donne la composition chimique, déterminée par fluorescence X, des trois sols étudiés :

|                      | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO  | TiO <sub>2</sub> | MgO  | P.F   |
|----------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|------------------|------|-------|
| A.Plastique Provins  | 57,79            | 35,26                          | 0,00                           | 0,07             | 0,63 | 2,50             | 0,00 | 13,08 |
| Fausses Glaises      | 54,68            | 33,23                          | 3,53                           | 0,41             | 0,90 | 2,29             | 1,5  | 11,04 |
| A.Plastique Bariolée | 55,67            | 26,51                          | 9,79                           | 0,35             | 1,14 | 2,52             | 2,6  | 9,52  |

Tableau I.2.1. - Composition chimique des Argiles Sparnaciennes

I.2.1.2. - Caractérisation géotechnique

I.2.1.2.1. - Caractéristiques géotechniques classiques

Les modes opératoires des principaux essais d'identification sont décrits en Annexe I.

Les caractéristiques géotechniques des trois sols sont représentées dans le Tableau I.2.2. :

|                  | $\gamma_h$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | $\gamma_d$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Wo | Sr | Wl | Wp | WR | Bleu<br>(g/100g) | Matières<br>Organi. % | Prof.<br>(m) | CaCO <sub>3</sub><br>% |
|------------------|------------------------------------|------------------------------------|----|----|----|----|----|------------------|-----------------------|--------------|------------------------|
| astique<br>ovins | 1,95                               | 1,56                               | 25 | 1  | 68 | 27 | 15 | 9,4              | 0,96                  | 5            | 0 %                    |
| es Glaises       | 1,85                               | 1,38                               | 34 | 1  | 73 | 44 | 17 | 17,7             | 1,03                  | 25           | 0 %                    |
| astique<br>iolée | 1,85                               | 1,40                               | 32 | 1  | 65 | 47 | 17 | 16,0             | 0,93                  | > 26         | 0 %                    |

Tableau I.2.2. - Caractéristiques géotechniques des Argiles Sparnaciennes

Ces trois sols ont des caractéristiques voisines sauf en ce qui concerne les résultats de "l'essai au bleu". Rappelons que le principe de cet essai (C. CUILLE, 1976) est d'estimer la capacité d'adsorption d'une couche monomoléculaire de bleu de méthylène par les surfaces des particules d'une quantité donnée de sol dans l'eau. Cette mesure est donc fonction de la capacité qu'a chaque argile de fixer des molécules polaires, et varie donc comme la surface spécifique totale du sol (surface externe + surface interne).

On remarque que les Fausses Glaises et l'Argile Plastique Bariolée ont un résultat à l'essai au bleu nettement supérieur à celui de l'Argile Plastique de Provins, attestant ainsi une surface spécifique beaucoup plus grande. Cette particularité est due à la présence d'interstratifiés illite-smectite dans les deux premiers sols et certainement aussi à une plus grande finesse des cristaux de kaolinite. Une mesure de la surface spécifique externe des Fausses Glaises par la méthode B.E.T. (désorption d'azote), donnant un résultat de 92 m<sup>2</sup>/g, confirme l'importance de la surface spécifique de ce matériau par rapport à un kaolin "ordinaire" (~ 30 m<sup>2</sup>/g).

#### I.2.1.2.2. - Granularité

La méthode de défloculation et d'analyse sédimentométrique des échantillons est présentée en Annexe I.2.

La granularité des 3 matériaux est précisée par les courbes granulométriques de la Figure I.2.2.

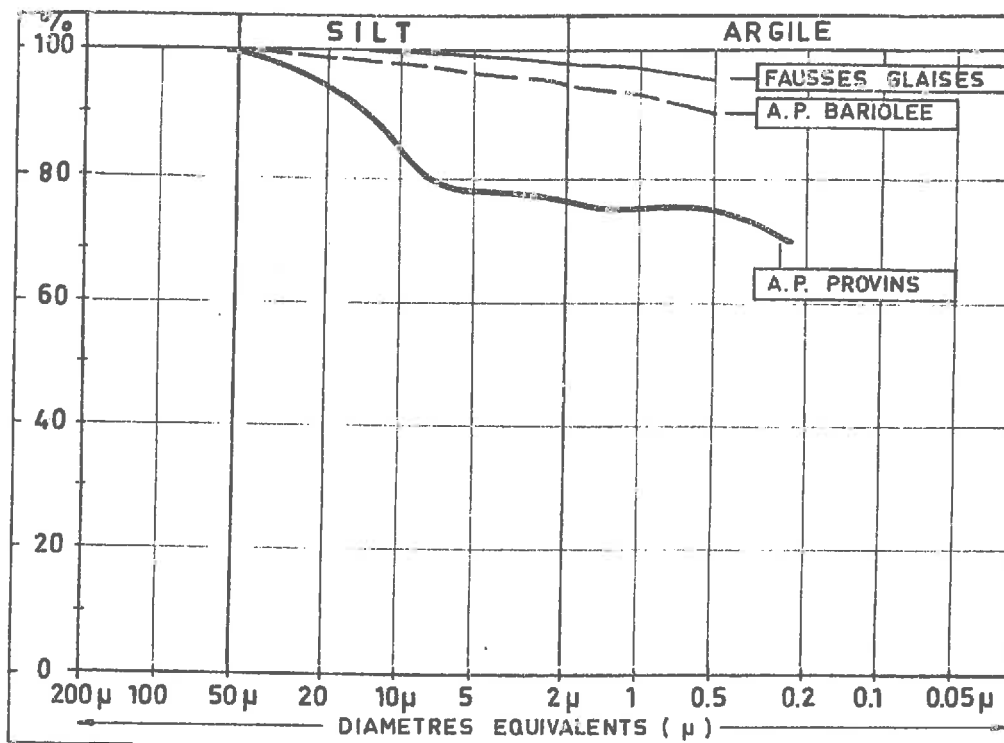


Fig.I.22. — Courbes granulométriques des Argiles sparnaciennes .

La différence entre Argiles de Provins d'une part, et Fausses Glaises et Argile Plastique Bariolée d'autre part, mise en évidence par l'essai au bleu se trouve confirmée par les courbes granulométriques qui montrent quantitativement une plus grande finesse des Fausses Glaises et de l'Argile Bariolée (96 et 90 % d'inférieur à 0,5 μ) par rapport à l'Argile de Provins (74 % d'inférieur à 0,5 μ).

#### I.2.1.2.3. - Critères indirects de gonflement

Dans le prochain chapitre un paragraphe sera consacré à l'étude bibliographique de la caractérisation du gonflement à partir de critères indirects. Nous nous contentons ici d'indiquer deux paramètres couramment utilisés : l'indice de gonflement libre et l'activité de gonflement.

##### - Indice de gonflement libre Ig

10 cm<sup>3</sup> foisonnés de sol sec, tamisés au tamis de 40 μ, sont versés dans 100 cm<sup>3</sup> d'eau. Ig est défini par :

$$Ig = \frac{V_f - V_i}{V_i} \times 100$$

|    | A. P. Provins | Faussees Glaises | A. P. Bariolée |
|----|---------------|------------------|----------------|
| Ig | 90            | 150              | 100            |

Tableau I.2.3. - Indice de gonflement libre des Argiles Sparnaciennes

Bien que HOLTZ ait montré que Ig est assez mal corrélé au taux de gonflement moyen d'un sol (pourcentage de soulèvement), il n'en reste pas moins que les Faussees Glaises présentent un indice de gonflement un peu supérieur aux deux autres sols.

- Activité de gonflement SA

L'activité de gonflement SA est définie, selon RANGANATHAM et SATY ANARAYANA (1965), par :

$$SA = \frac{Wl - Wr}{C} = \frac{Ir}{C}$$

où Wl est la limite de liquidité  
 Wr est la limite de retrait  
 C est le pourcentage d'inférieur à 2  $\mu$   
 Ir = Wl - Wr

|    | A. P. Provins | Faussees Glaises | A. P. Bariolée |
|----|---------------|------------------|----------------|
| SA | 0,70          | 0,57             | 0,51           |
| Ir | 53            | 56               | 48             |

Tableau I.2.4. - Activité de gonflement, Indice de retrait des Argiles Sparnaciennes

Il faut préciser ici que si la limite de liquidité Wl et la limite de plasticité Wp font l'objet d'un essai normalisé (voir Annexe I). Il n'en est pas de même pour la limite de retrait Wr.

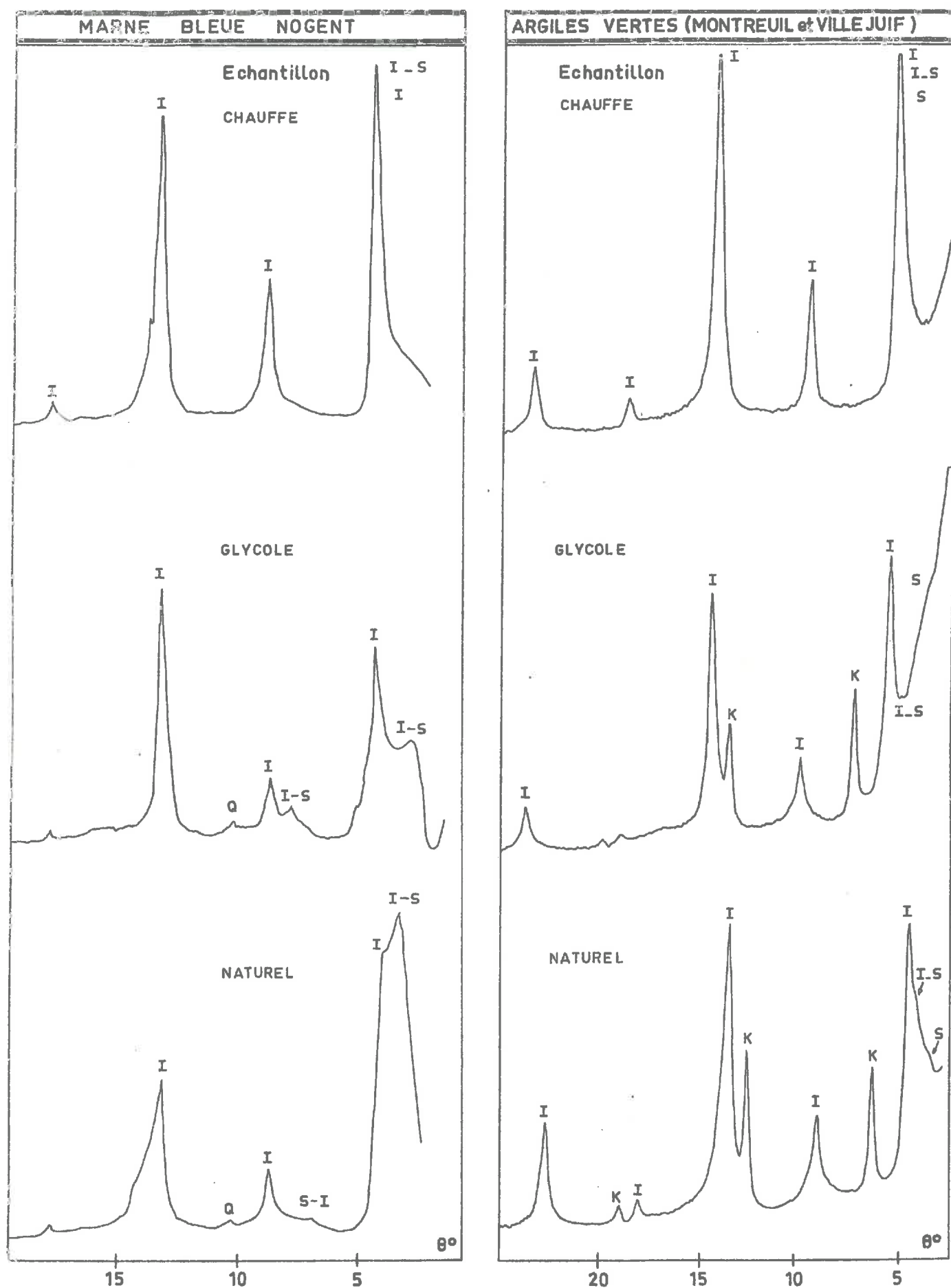


Fig. I. 2.3. — Diffractogrammes des Argiles vertes et de la Marne Bleue.

Nous avons donc dû mettre au point un essai de laboratoire pour la détermination de  $W_r$ , dont on trouvera la description et les principaux résultats en Annexe I.

Les résultats obtenus pour Ir et SA dans les trois cas permettent de classer ces trois matériaux dans les sols à gonflement moyen.

### I.2.2. - Argiles Vertes et Marnes Bleues du Bassin de Paris

D'origine plus récente que les Argiles Plastiques, les Argiles Vertes du Sannoisien constituent un dépôt laguno marin (cycle Stampien), et les Marnes Bleues supragypseuses sont à rattacher à l'épisode Ludien (Cycle Bartonien). Généralement les argiles vertes sont séparées des Marnes Bleues par un niveau de Glaïses à Cyrènes annonçant le cycle Stampien.

Trois types de gisements ont été étudiés, deux argiles vertes et une marne bleue :

- . Argile Verte de MONTREUIL
- . Argile Verte de VILLEJUIF
- . Marne Bleue de NOGENT

Dans les trois cas les échantillons ont été prélevés par carottage.

#### I.2.2.1. - Caractérisation minéralogique et chimique

##### I.2.2.1.1. - Composition minéralogique

Les échantillons préparés pour la diffraction X ont été préalablement décalcifiés, la détermination de la teneur en carbonates a donc fait l'objet d'une mesure spéciale.

Les diffractogrammes des trois types de sol sont présentés à la Figure I.2.3.

- . L'Argile Verte de MONTREUIL et l'Argile Verte de VILLEJUIF, présentant des diffractogrammes identiques, sont composées essentiellement d'illite et de kaolinite. On note également la présence, mais en faible importance, d'interstratifié illite-smectite et de smectite. Elles contiennent, de plus, 13 à 14 % de carbonates.



- . La Marne Bleue de NOGENT est composée essentiellement d'illite et d'un interstratifié illite-smectite. En faibles proportions existent également chlorite et quartz. Ce matériau contient de plus environ 30 % de carbonates, justifiant ainsi son appellation de Marne.

I.2.2.1.2. - Composition chimique : Fluorescence X et perte au feu

Le Tableau I.2.5. donne la composition chimique, déterminée par fluorescence X, des 3 sols étudiés.

|                | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO  | Ti <sub>2</sub> O | MgO  | P.F.  |
|----------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------|-------------------|------|-------|
| A.V. MONTREUIL | 58,50            | 16,55                          | 6,41                           | 4,38             | 8,46 | 0,89              | 1,9  | 9,96  |
| A.V. VILLEJUIF | 60,15            | 16,33                          | 6,92                           | 4,21             | 9,23 | 0,82              | 2,79 | 10,26 |
| M.B. NOGENT    | 45,20            | 13,80                          | 5,76                           | 0,26             | 14,7 | 0,34              | 3,07 | 16,87 |

Tableau I.2.5. - Compositions chimiques des Argiles Vertes et de la Marne Bleue

I.2.2.2. - Caractérisation géotechnique

I.2.2.2.1. - Caractéristiques géotechniques classiques

Elles sont regroupées dans le Tableau I.2.6.

|              | $\gamma_h$<br>g/cm <sup>3</sup> | $\gamma_d$<br>g/cm <sup>3</sup> | Wo | Sr | Wl | Wp | Wr | Bleu<br>g/100g | M. O.<br>% | Profondeur<br>m | CaCO <sub>3</sub><br>% |
|--------------|---------------------------------|---------------------------------|----|----|----|----|----|----------------|------------|-----------------|------------------------|
| V. Montreuil | 2,00                            | 1,54                            | 32 | 1  | 60 | 36 | 20 | 10,9           | 0,24       | 7,50            | 13                     |
| V. Villejuif | 1,96                            | 1,56                            | 26 | 1  | 60 | 35 | 20 | 11,4           | 0,30       | 10              | 14                     |
| B. Nogent    | 1,87                            | 1,50                            | 26 | 1  | 92 | 45 | 21 | 13,2           | 0,26       | 3               | 31                     |

Tableau I.2.6. - Caractéristiques géotechniques des Argiles Vertes et de la Marne Bleue

Ces trois sols ont des caractéristiques voisines, sauf en ce qui concerne la teneur en carbonate (la Marne Bleue est beaucoup plus carbonatée que les Argiles Vertes) et les indices de plasticité  $I_p = W_l - W_p$ , et de retrait  $I_r = W_c - W_r$ . En effet la Marne Bleue présente des indices  $I_p$  et  $I_r$  supérieurs aux Argiles Vertes, indiquant grossièrement un potentiel de gonflement légèrement plus important.

#### I.2.2.2.2. - Granularité

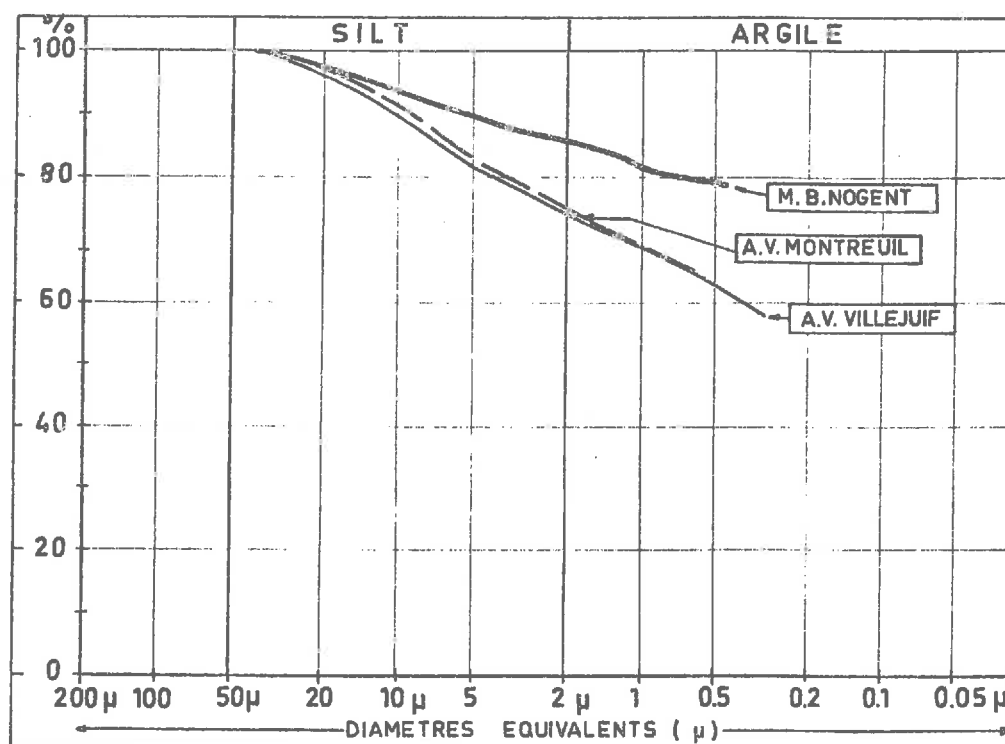


Fig.I.2.4. — Courbes granulométriques des Argiles Vertes (A.V.) et Marne Bleue (M.B.)

L'examen des courbes granulométriques (Figure I.2.4.) confirme la ressemblance entre les deux Argiles Vertes. La plus grande finesse de la Marne Bleue renforce le sentiment d'un potentiel de gonflement supérieur.

I.2.2.2.3. - Critères indirects de gonflement

. Indice de gonflement libre Ig

|    | A. V. Montreuil | A. V. Villejuif | M. B. Nogent |
|----|-----------------|-----------------|--------------|
| Ig | 110             | 100             | 90           |

Tableau n° I.2.7. - Indice de gonflement libre des Argiles Vertes et de la Marne Bleue

. Activité de gonflement

|    | A. V. Montreuil | A. V. Villejuif | M. B. Nogent |
|----|-----------------|-----------------|--------------|
| Ir | 38              | 40              | 71           |
| SA | 0,51            | 0,53            | 0,85         |

Tableau I.2.8. - Activité de gonflement et Indice de retrait des Argiles Vertes et de la Marne Bleue

L'ensemble des résultats des essais d'identification, identiques pour l'Argile Verte de VILLEJUIF et l'Argile Verte de MONTREUIL, tend à prouver l'exacte ressemblance entre ces deux gisements, appartenant à la même formation mais prélevés à plusieurs kilomètres de distance l'un de l'autre.

### I.2.3. - Argile Glaciaire d'Aix-Les-Bains

Ce matériau, d'âge Würmien, se présente macroscopiquement sous une forme anisotrope (voire varvée, alternance de bancs millimétriques gris clairs et gris foncés se débitant relativement bien), et est assez riche en minéraux non argileux.

Nous avons voulu l'étudier dans un but de comparaison avec les autres sols utilisés, beaucoup plus riches en argile.

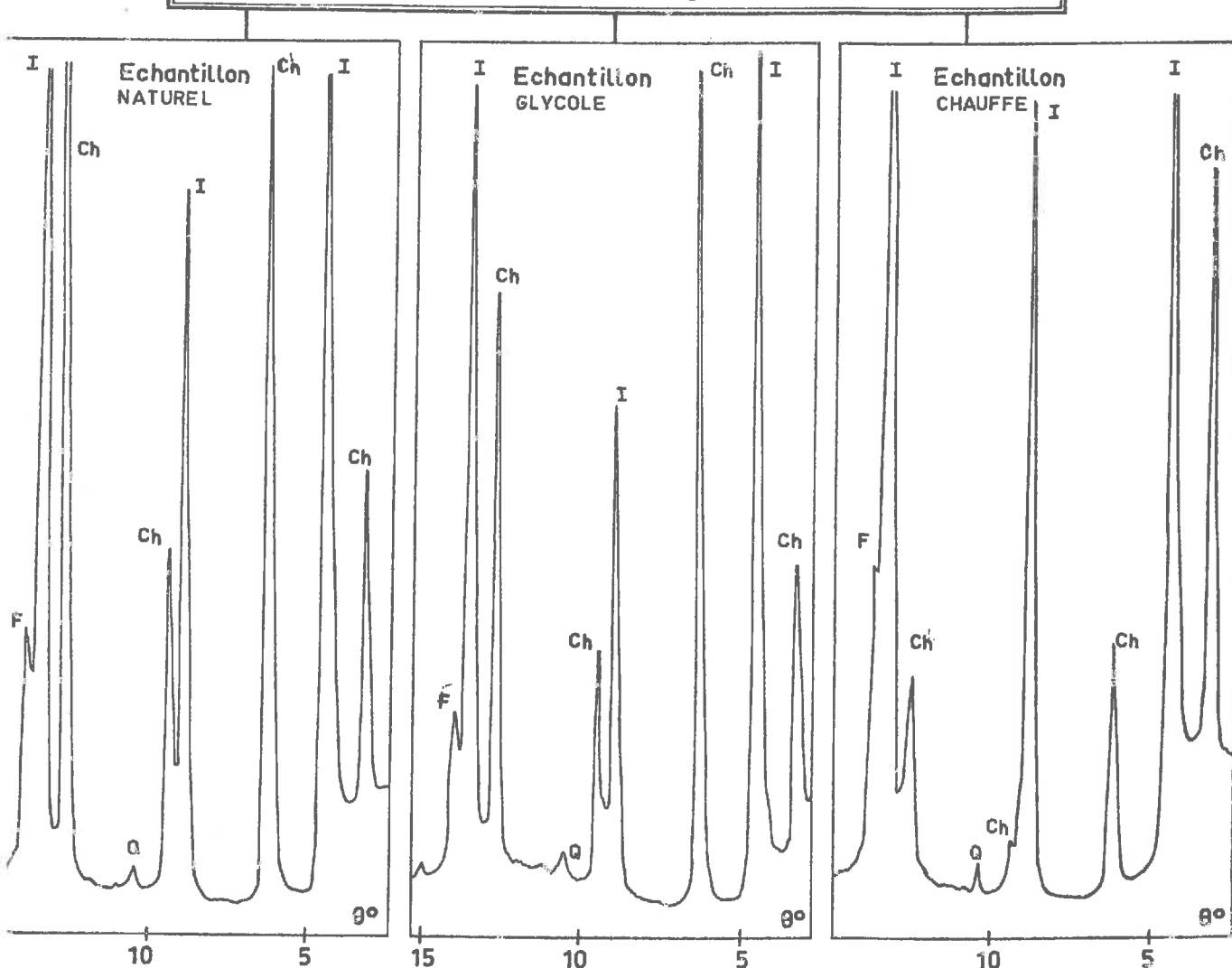
Il a été prélevé par carottage le long du Lac du Bourget (AIX-LES-BAINS).

#### I.2.3.1. - Caractérisation minéralogique et chimique

##### I.2.3.1.1. - Caractérisation minéralogique

Les diffractogrammes sont présentés à la Figure I.2.5. Ce matériau se compose essentiellement d'illite, de chlorite très bien cristallisée, de quartz et de feldspath. La teneur en carbonates est 20 %.

Fig.I.2.5.-Diffractogrammes de l'Argile d'Aix-les-Bains



Composition chimique : Fluorescence X et perte au feu

La composition chimique de ce matériau est donnée dans le Tableau I.2

|                      | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | K <sub>2</sub> O | CaO   | TiO <sub>2</sub> | MgO | P.F.  |
|----------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|-------|------------------|-----|-------|
| Argile Aix-Les-Bains | 49,95            | 12,03                          | 4,47                           | 1,75             | 28,88 | 0,49             | 2,5 | 20,28 |

Tableau I.2.9. Composition chimique de l'Argile d'Aix-Les-Bains

I.2.3.2. - Caractérisation géotechnique

I.2.3.2.1. - Caractéristiques géotechniques classiques

Elles sont présentées dans le Tableau I.2.10.

|                        | $\gamma_h$<br>g/cm <sup>3</sup> | $\gamma_d$<br>g/cm <sup>3</sup> | wo | Sr | Wl | Wp | Wr | Bleu<br>g/100g | M.O.<br>% | Profondeur<br>m | CaCO <sub>3</sub> |
|------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----|----|----|----|----|----------------|-----------|-----------------|-------------------|
| Argile d'Aix-Les-Bains | 2,00                            | 1,60                            | 25 | 1  | 36 | 30 | 22 | 1,13           | 0,80      | 6 m             | 20                |

Tableau I.2.10. - Caractéristiques géotechniques de l'Argile d'Aix-Les-Bains

Nous remarquons que ce matériau est très peu plastique ( $I_p = 6$ ), sa surface spécifique au bleu de méthylène est très faible (de 10 à 20 fois moins que les sols précédemment étudiés), et il est riche en carbonates.

I.2.3.2.2. - Granularité

La courbe granulométrique est présentée Figure I.2.6. ci-après. Ce matériau ne comporte que 40 % d'argile au sens granulométrique du terme (inférieur à 2  $\mu$ ). C'est en réalité un silt.

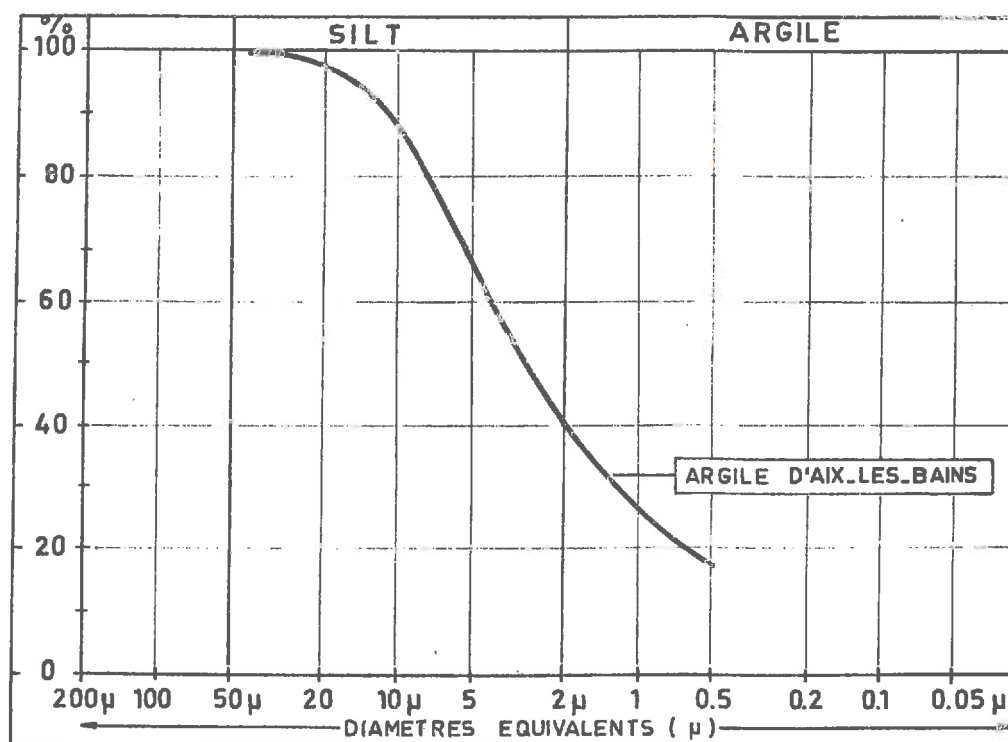


Fig.I.2.6. — Courbe granulométrique de l'Argile d'Aix-Les-Bains.

I.2.3.2.3. - Critères indirects de gonflement

- Indice de gonflement libre :  $I_g = 55$

C'est la plus faible teneur obtenue sur les sols étudiés.

- Activité de gonflement :  $SA = 0,35$

C'est aussi la plus faible valeur obtenue.

On peut donc s'attendre à ce que ce matériau présente un potentiel de gonflement inférieur aux autres.

## DEUXIEME CHAPITRE

---

### ETUDE DU GONFLEMENT A L'ECHELLE MACROSCOPIQUE

## PREAMBULE

---

L'étude macroscopique du gonflement vise à modéliser le comportement de couches argileuses afin de pouvoir estimer de façon fiable et en un temps relativement court les valeurs des différents paramètres de ce phénomène, que ce soit le taux de gonflement (% de soulèvement unidimensionnel), ou la pression de gonflement. Après une revue bibliographique concernant les points que nous n'avons pas étudiés directement, à savoir la pression de gonflement et la caractérisation du gonflement à partir de critères indirects (les propriétés géotechniques des sols), cette modélisation sera menée en quatre parties :

- 1 - L'étude de la cinétique du gonflement d'une couche argileuse dans son ensemble, c'est-à-dire la variation du taux de gonflement en fonction du temps pour un état du sol donné (sans faire varier les contraintes initiales et finales)
- 2 - L'étude de la propagation du gonflement à l'intérieur d'une couche argileuse (ou gonflement différentiel) pour un état du sol donné
- 3 - L'étude de l'influence de l'état du sol (contraintes initiales et finales) sur les paramètres de la loi de gonflement
- 4 - L'étude de la variation du gonflement en fonction de la succion du sol.

-----



## II.0 - PRESSION DE GONFLEMENT ET CRITERES INDIRECTS DE GONFLEMENT

### II.0.1. - Pression de gonflement

Il existe plusieurs définitions de la pression de gonflement déterminée expérimentalement mais on peut essentiellement en retenir deux :

- 1/ c'est la pression qui doit être appliquée à un sol pour qu'aucune variation de volume n'intervienne quand on le sature en eau,
- 2/ c'est la pression nécessaire pour ramener le sol à son volume initial après qu'il ait gonflé complètement.

Les pressions de gonflement ainsi définies sont classiquement mesurées à l'oedomètre ou à l'appareil de contraintes triaxiales.

Nous verrons (Chapitre II.-§ 4), qu'à ces deux définitions on peut ajouter une définition théorique à partir de la succion des sols, ainsi qu'une méthode de mesure expérimentale.

K.P. AGARWAL et S.C. SHARMA (1973) proposent un appareillage simple pour mesurer la pression de gonflement d'un échantillon de sol sans variation de volume, à partir d'un oedomètre placé sur un châssis triaxial asservi à un système de relais électrique mettant en marche le moteur du châssis pour ramener l'échantillon à sa hauteur initiale quand il a gonflé d'une hauteur  $\delta h$  considérée comme négligeable. La relation entre la pression de gonflement  $P_s$  ainsi mesurée et le temps est croissante (voir Figure II.0.1) et  $P_s$  se stabilise au bout de trois jours d'essai.

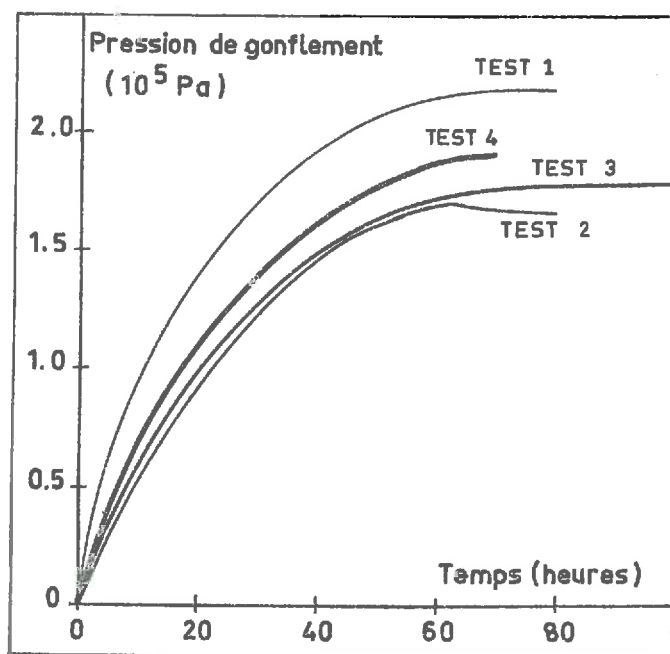


Figure II.0.1 - Pression de gonflement en fonction du temps  
(d'après AGARWAL et SHARMA, 1973)

La même définition de la pression de gonflement est utilisée par G. DIDIER (1973) pour étudier le gonflement d'argile hydratée par de l'eau vapeur ou liquide. La variation  $\Delta V/V$  considérée comme acceptable dans l'hypothèse théorique d'un volume constant est prise à 1/1000. L'échantillon, confiné latéralement, est placé entre un piston et un disque circulaire fin capable de se déformer sous pression, et la mesure de la déformation au centre du disque permet de suivre l'évolution de la pression de gonflement verticale. Il apparaît alors que la pression de gonflement mesurée dépend de la déformation  $\Delta V/V$  permise, et qu'une relation semi logarithmique linéaire décroissant existe entre la pression de gonflement finale et le pourcentage de gonflement.

Ce système, utilisable sur des échantillons remaniés et initialement anhydres, a été modifié par DIDIER, KASTNER, BOURDEAU (1980), pour l'appliquer à des échantillons naturels et pour mesurer également la perméabilité et la consolidation des sols.

Partant d'un raisonnement inverse, A. MYSLIVEC (1969) impose à des échantillons semblables des paliers de pression différents, et mesure soit le pourcentage de gonflement, soit le pourcentage de tassement. Il montre que la relation entre la variation de hauteur de l'échantillon et la pression appliquée est linéaire décroissante, et détermine graphiquement la pression de gonflement pour une variation de hauteur nulle (Figure II.0.2.).

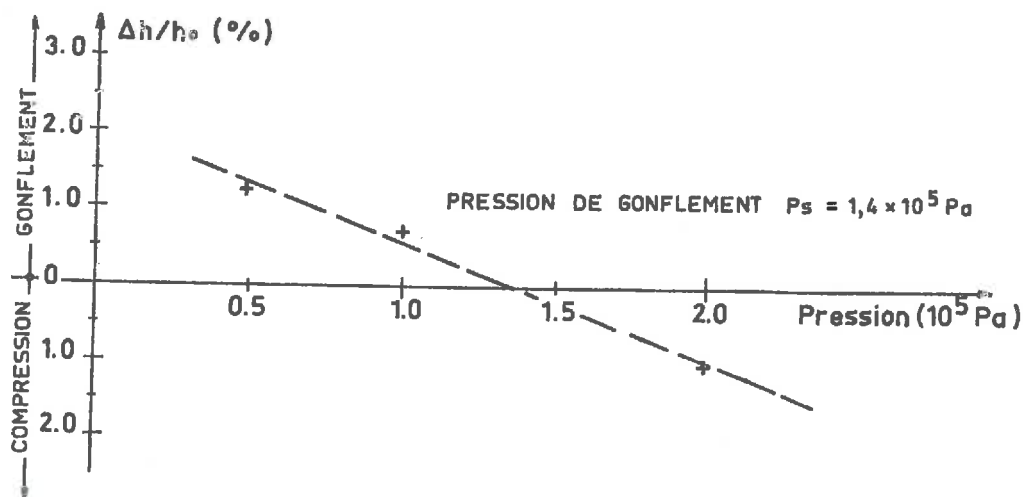


Figure II.0.2. - Détermination de la pression de gonflement (d'après A. MYSLIVEC, 1969)

On remarque ainsi que chaque auteur propose une méthode différente pour déterminer la pression de gonflement d'un sol, méthode qui dépend de la définition de la pression de gonflement choisie. Ces définitions sont avant tout pratiques, c'est-à-dire qu'elles ne reposent pas sur les causes du phénomène, mais sur la grandeur que l'on veut mesurer (et qui est généralement associée à un problème concret). Il ne faut donc pas s'étonner que les relations et les valeurs trouvées puissent être différentes d'une méthode à l'autre, les grandeurs mesurées n'étant rigoureusement pas les mêmes.

L'étude de la pression de gonflement basée sur la succion des sols a été volontairement laissée de côté, elle sera abordée au § II.4.

#### *II.0.2. - Caractérisation du gonflement à partir de critères indirects (les propriétés géotechniques)*

On entend par propriétés géotechniques des sols les limites d'ATTERBERG, la limite de retrait, les tests de gonflement libre, la fraction granulométrique inférieure à 2 microns, la teneur en eau, la densité sèche, etc... De nombreuses études ont été menées afin d'estimer le taux de gonflement et la pression de gonflement à partir de ces divers paramètres.

### II.0.2.1. - Limites d'ATTERBERG

Le taux de gonflement  $S$  d'un échantillon serti latéralement en présence d'eau sous une surcharge de  $0,07 \cdot 10^5$  Pa, et préalablement compacté à la teneur en eau optimum et à la densité maximum, est estimé par SEED, WOODWARD et LUNDGREN (GROMKO, G.J. 1974) en fonction de l'indice de plasticité  $I_p$  du sol  $S = 21,6 \cdot 10^{-5} I_p^{2,44}$ . Cette relation s'applique seulement aux sols contenant entre 8 % et 65 % d'argile.

Le Tableau II.0.2 donne la relation entre le taux de gonflement et l'indice de plasticité

| Taux de Gonflement | %       | $I_p$   |
|--------------------|---------|---------|
| Faible             | 0 - 1,5 | 0 - 10  |
| Moyen              | 1,5 - 5 | 10 - 20 |
| Elevé              | 5 - 25  | 20 - 35 |
| Très élevé         | > 25    | > 35    |

Tableau II.02 - Relation entre le taux de gonflement et l'indice de plasticité

VIJAYVERGIYA et GHAZZALY (1973) définissent à partir de  $I_p$  et de la limite de liquidité  $W_L$  une ligne "A" séparant les sols gonflants des sols non gonflants (Figure II.03).

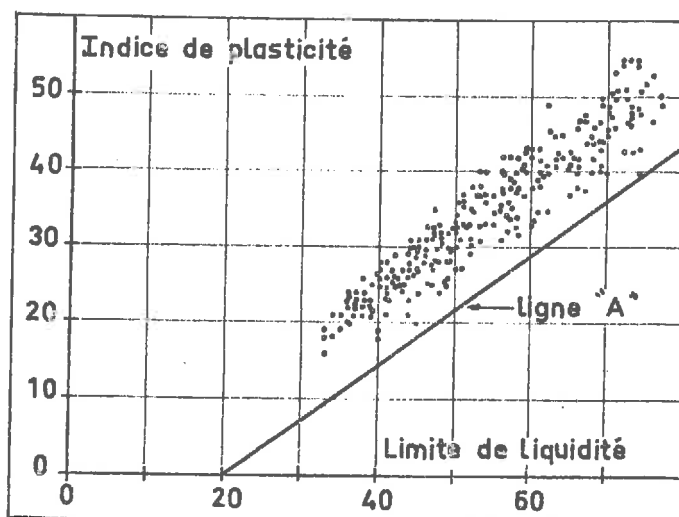


Figure II.0.3 - Caractérisation des sols gonflants  
(d'après VIJAYVERGIYA et GHAZZALI, 1973)

### II.0.2.2. - Retrait linéaire

Les sols argileux présentent un retrait volumique lors de l'évaporation de l'eau interstitielle. Le retrait volumique en fonction de la teneur en eau  $w$  est linéaire jusqu'à une teneur en eau  $w_R$  définie comme la limite de retrait et la teneur en eau de saturation du sol (voir Annexe I). La limite de retrait et l'indice de retrait  $I_R = W_L - w_R$  apparaissent comme des éléments fondamentaux pour l'étude des variations de volume des sols.

ALTMAYER (1955) a proposé une classification des sols en fonction de la limite de retrait (Tableau II.0.3.).

| $w_R$   | Potentiel de Gonflement |
|---------|-------------------------|
| < 10    | Fort                    |
| 10 - 12 | Critique                |
| > 12    | Faible                  |

Tableau II.0.3. - Relation entre potentiel de gonflement et limite de retrait (d'après ALTMAYER, 1955)

RANGANATHAM et SATYANARAYANA (1965) déterminent une relation entre l'indice de retrait  $I_R$  et le potentiel de gonflement  $S$  pour des sols naturels compactés à l'optimum, et sous une surcharge de  $0,07 \cdot 10^{-5}$  Pa:  $S = 41,13 \cdot 10^{-5} \cdot I_R^{2,67}$

Cette relation leur permet de classer le potentiel de gonflement d'un sol en fonction de son indice de retrait (Tableau II.0.4.).

| $I_R$   | Potentiel de Gonflement |
|---------|-------------------------|
| 0 - 20  | Faible                  |
| 20 - 30 | Moyen                   |
| 30 - 60 | Fort                    |
| > 60    | Très Fort               |

Tableau II.0.4. - Relation entre potentiel de gonflement et indice de retrait (d'après RANGANATHAM et SATYANARAYANA, 1965)

### II.0.2.3. - Fraction argileuse, activité de gonflement

On définit l'activité de gonflement SA d'un sol par le rapport de l'indice de retrait  $I_R$  à la fraction  $C$  inférieure à  $2 \mu$  (exprimée en %) :

$$SA = \frac{I_R}{C}$$

Le taux de gonflement d'un sol  $S$  augmente avec la fraction inférieure à  $2 \mu$ . Une relation entre  $S$  et  $C$  est établie par SEEDS, WOODWARD et LUNDGREN (1962)  $S = KC^x$ ,  $x$  et  $K$  dépendant du type de sol étudié. Le coefficient  $K$  a été relié à l'activité de gonflement SA par RANGANATHAM et SATYANAYARANA.

$$K = \alpha (SA)^y$$

### II.0.2.4. - Indice de gonflement libre

$10 \text{ cm}^3$  de sol sec tamisés à  $40 \mu$  et non compactés étant versés dans  $100 \text{ cm}^3$  d'eau, l'indice de gonflement  $I_G$  est défini par :

$$I_G = \frac{V_F - V_I}{V_I} \times 100$$

$V_I$  étant le volume de sol initial ( $10 \text{ cm}^3$ )

$V_F$  étant le volume de sol final (après essai)

Ce test est très simple à réaliser, mais HOLTZ (VAYSSADE, 1978) a montré que la valeur de  $I_G$  est assez mal corrélée au potentiel de gonflement réel des sols, il est donc à employer avec prudence.

### II.0.2.5. - Classification

A partir des caractéristiques géotechniques précédemment décrites, HOLTZ (G.J. GROMKO, 1974) propose une classification du potentiel de gonflement des sols (Tableau II.0.5).

| $\% < 1 \mu$ | $I_p$     | $W_R$     | Taux de (%)<br>Gonflement | Potentiel de<br>Gonflement |
|--------------|-----------|-----------|---------------------------|----------------------------|
| $> 28$       | $> 35$    | $< 11$    | $> 30$                    | Très Fort                  |
| $20 - 31$    | $25 - 41$ | $7 - 12$  | $20 - 30$                 | Fort                       |
| $13 - 23$    | $15 - 28$ | $10 - 16$ | $10 - 20$                 | Moyen                      |
| $< 15$       | $< 18$    | $> 15$    | $< 10$                    | Faible                     |

Tableau II.0.5. - Classification du potentiel de gonflement des sols en fonction des principales caractéristiques géotechniques (d'après HOLTZ)

II.0.2.6. - Influence de la teneur en eau et de la densité sèche

VIJAYVERGIYA et GHAZZALY (1973) montrent que pour des échantillons remaniés, le taux de gonflement  $S$  et la pression de gonflement  $P_s$  d'un sol sont des fonctions semi-logarithmiques linéaires décroissantes de la teneur en eau  $W$  et linéaires croissantes de la densité sèche  $\gamma_d$ , pour une limite de liquidité donnée :

$$\log S = (1/12) \cdot (0,4 W_L - w + 5,5)$$

$$\log S = (1/19,5) \cdot (\gamma_d + 0,65 W_L - 130,5)$$

$$\log P_s = (1/12) \cdot (0,4 W_L - w - 0,4)$$

$$\log P_s = (1/19,5) \cdot (\gamma_d + 0,65 W_L - 139,5)$$

De même CHEN (1973), s'appuyant sur les travaux de KASSIF et BAKER, conclut que la pression de gonflement n'est pas affectée par la teneur en eau pourvu que la densité sèche soit constante.

Plus récemment, DAVID et KOMORNIK (1980) proposent une estimation de la pression de gonflement tenant compte à la fois de  $\gamma_d$  et  $w$  :

$$\log P_s = 0,0208 W_L + 0,000665 \gamma_d - 0,0269 w - 1,868$$

Enfin DONALDSON (1980), reprenant les travaux de BRACKLEY, indique une relation générale du taux de gonflement en fonction des principales caractéristiques du sol :

$$S = (5,3 - \frac{147e}{I_p} - \log P) \cdot (0,525 I_p + 4,08 - 0,85w)$$

e : indice des vides

w : teneur en eau

P : pression de surcharge

L'état initial du sol est ainsi pris en compte, par l'intermédiaire de e et w, ainsi que la pression de surcharge.

La pression de gonflement Ps est alors définie, pour un taux de gonflement nul, par :

$$\log Ps = 5,3 - \frac{147 \cdot e}{I_p}$$

#### II.0.2.7. - Conclusions

L'exposé précédent, qui n'est pas exhaustif, montre le grand nombre de méthodes et de lois différentes mises au point pour estimer le gonflement des sols de façon indirecte, c'est-à-dire sans faire d'essai de gonflement.

Le plus souvent ces méthodes restent grossières et différencient seulement les sols à fort potentiel de gonflement des sols à faible potentiel de gonflement. Les relations sont en général déterminées à partir d'échantillons remaniés dont le comportement n'est pas identique à celui d'échantillons naturels. De plus, il nous semble que les lois mathématiques citées sont certes significatives quand elles sont appliquées à un grand nombre de sols très différents minéralogiquement et granulométriquement, mais il faudrait se garder de les utiliser spécifiquement sur quelques sols de natures voisines.

Enfin les variations d'état d'un même sol sont rarement prises en compte, et le plus souvent un sol est caractérisé par "un" potentiel de gonflement.

Ces critères de gonflement sont donc très utiles en tant qu'indicateurs du potentiel de gonflement des sols (faible, moyen ou fort), et sont significatifs lors d'études statistiques sur des sols très différents, mais en aucun cas ils ne peuvent remplacer les essais directs de gonflement lors de l'étude pratique d'un seul sol.



## II.1. - ETUDE DE LA CINETIQUE DU GONFLEMENT D'UNE COUCHE ARGILEUSE DANS SON ENSEMBLE

Le gonflement des sols argileux est un phénomène très lent, en raison de la faible perméabilité des argiles et de la diminution continue en fonction du temps, du gradient qui tend à drainer l'eau dans le sol. Il est donc fondamental de commencer l'étude du gonflement par l'étude de la cinétique, c'est-à-dire la relation existant entre le taux de gonflement et le temps.

### II.1.1. - Revue bibliographique

#### I.1.1.1. - Essai de gonflement unidimensionnel

L'essai de gonflement unidimensionnel en fonction du temps est effectué classiquement à l'aide d'un appareillage de type oedométrique. L'usage de l'appareil de contraintes triaxiales est en général utilisé pour des essais de gonflement tridimensionnel, problème qui ne sera pas abordé dans le cadre du présent travail.

La représentation graphique du taux de gonflement vertical (pourcentage de gonflement unidimensionnel  $\frac{\Delta h}{h_0}$ ) en fonction du logarithme du temps est une courbe en "S" présentant 2 portions droites, la première caractérisant le gonflement primaire et la seconde le gonflement secondaire (Figure II.1.1.)

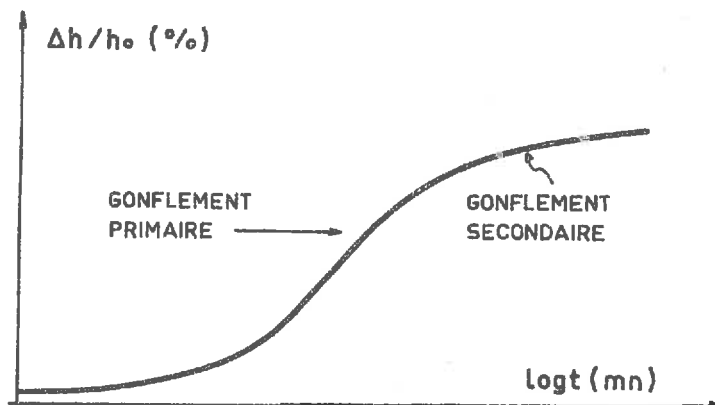


Figure II.1.1. - Représentation du taux de gonflement unidimensionnel en fonction du logarithme du temps

Le plus souvent le gonflement secondaire est négligeable, néanmoins MYSLIVEC (1969) présente les résultats d'essais de gonflement sur une Argile Tertiaire pour lesquels le gonflement secondaire, non négligeable, commence à partir de deux mois d'essais et semble se poursuivre au-delà de 250 jours. ULLRICH (1975) obtient, à partir d'essais sur des shales très surconsolidés et reconstitués un gonflement secondaire très significatif, le rapport de l'indice de gonflement secondaire à l'indice de gonflement primaire pouvant aller jusqu'à 0,4, ce rapport augmentant avec le taux de surconsolidation.

#### II.1.1.2. - Cinétique du gonflement

Etudier la cinétique du gonflement revient à déterminer une loi entre le taux de gonflement unidimensionnel  $\frac{\Delta h}{h_0}$  (en pourcentage) et le temps. Notre étude s'appuie sur des bases acquises par les travaux de MM. V. DAKSHANAMURTHY (1978) et B. VAYSSADE (1978).

A partir d'essais de laboratoire il a été déterminé une loi hyperbolique entre le taux de gonflement d'un échantillon d'épaisseur  $h_0$  et le temps :

$$\frac{\Delta h}{h_0} = G \cdot \frac{t}{B + t} \quad (1)$$

G représente le taux de gonflement final  $(\frac{\Delta h}{h_0})_f$  obtenu pour un temps infini, et B le temps de demi-gonflement  $T_{0.5}$ , c'est-à-dire le temps au bout duquel le sol a gonflé de la moitié de son taux de gonflement final.

Dans le système de coordonnées  $(t, t/\frac{\Delta h}{h_0})$  la relation (1) est équivalente à la droite :

$$t/\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{1}{G} t + \frac{B}{G} \quad (2)$$

Il est donc possible de déterminer graphiquement G et B à partir des caractéristiques pente et ordonnée à l'origine de la droite (2), G étant l'inverse de la pente et B le produit de G par l'ordonnée à l'origine.

## II.1.2. - But de l'étude et moyens mis en oeuvre

### II.1.2.1. - But de l'étude

Toutes choses égales par ailleurs, l'épaisseur de la couche argileuse soumise au gonflement est un paramètre déterminant de la cinétique du gonflement. Dans la relation (1), le coefficient représentatif de la vitesse de gonflement est le coefficient B ou temps de demi-gonflement.

Notre étude se déroule donc en deux temps :

- . vérifier que le gonflement en fonction du temps suit bien une loi hyperbolique, c'est-à-dire que la relation (2) est une droite.
- . déterminer une relation entre B et l'épaisseur de la couche argileuse  $h_0$ .

### II.1.2.2. - Mode opératoire

Les essais de gonflement ont été effectués à l'aide de moules cylindriques en plexiglass similaires à l'oedomètre (Figure II.1.2.) mais permettant de travailler sur des échantillons plus épais, et présentant l'avantage d'être transparents, ce qui nous a permis de constater certaines anomalies de l'essai oedométrique, en particulier le piégeage excessif de bulles d'air dans le système lors du gonflement d'échantillons non préalablement consolidés.

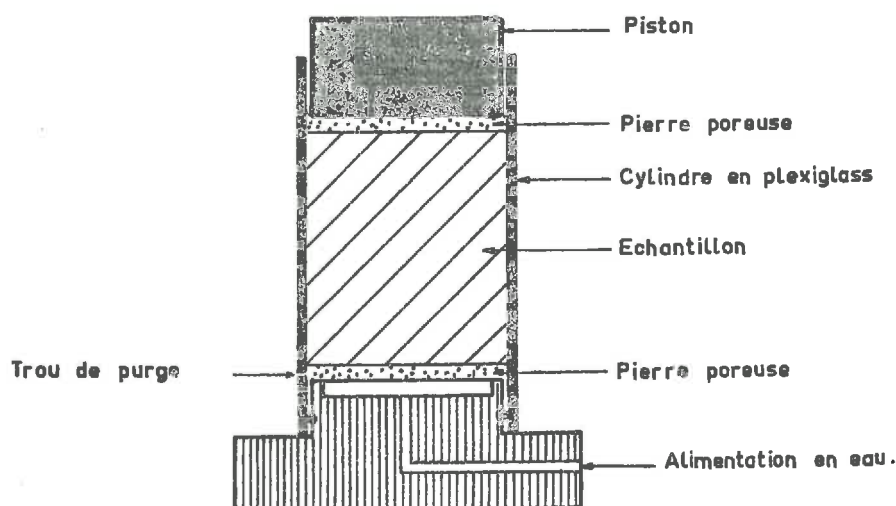


Figure II.1.2. - Schéma du moule utilisé pour les essais de gonflement unidimensionnel

Les pierres poreuses placées dans le cylindre au-dessus et en-dessous de l'échantillon sont désaérées par ébullition pendant trente minutes. L'évolution du gonflement unidimensionnel (variations de hauteur d'échantillon) est appréciée à l'aide de capteurs de déplacement au 1/100 de mm.

Les mesures de déplacement vertical du capteur sont prises soit à la main, soit enregistrées électroniquement, à des intervalles de temps croissants.

Il faut enfin préciser que les échantillons sont taillés au diamètre  $\varnothing$  70 mm à l'aide d'un carottier de laboratoire, de façon à obtenir une surface rigoureusement cylindrique. Le carottage est effectué dans des blocs de dimension supérieure à  $\varnothing$  70 mm, et pour éviter un remaniement surfacique important, le bloc est maintenu dans un cylindre en PVC de dimension équivalente, de façon à équilibrer la contrainte induite par le carottage.

Une fois taillé, l'échantillon est introduit dans le moule cylindrique et alimenté en eau par le haut et par le bas. Le gonflement est libre car le poids du piston en plexiglass est négligeable (inférieur à 0,2 Kg, donc contrainte maxi résiduelle  $0,005 \cdot 10^5$  Pa). Le paramètre étudié ici est d'épaisseur  $h_0$  de l'échantillon que nous avons fait varier le plus souvent entre 2 et 10 cm.

Deux types d'essais ont été effectués :

- . des essais de gonflement libre sans consolidation préalable
- . des essais de gonflement libre après une consolidation intermédiaire

Néanmoins la dispersion des résultats sur les échantillons non consolidés, due à des variations de conditions initiales, nous a amené à insister sur les essais comportant une consolidation préalable destinée à ramener tous les échantillons aux mêmes conditions initiales.

Nous avons effectué des essais sur cinq sols différents :

- . 1'Argile Plastique de Provins, composée de kaolinite et de quartz, qui a fait l'objet de deux séries d'essais :
  - . une série d'essais de gonflement sans consolidation préalable (gonflement 1)
  - . une série d'essais après un premier gonflement et une consolidation intermédiaire sous  $1,3 \cdot 10^5$  Pa (Gonflement 2)
- . 1'Argile Plastique Bariolée, composée de kaolinite et d'interstratifié illite-smectite, qui a fait l'objet d'une série d'essais préalablement consolidés sous  $0,7 \cdot 10^5$  Pa.
- . Les Fausses Glaises, composées essentiellement de kaolinite, d'interstratifié illite-smectite et de quartz, qui a fait l'objet d'une série d'essais préalablement consolidés sous  $6,5 \cdot 10^5$  Pa.

- . L'Argile Verte de Montreuil, composée essentiellement d'illite, de kaolinite et de calcite, qui a fait l'objet d'une série d'essais préalablement consolidés sous  $5,2 \cdot 10^5$  Pa.
- . L'Argile d'Aix-Les-Bains, composée d'illite et de chlorite très bien cristallisées, de calcite, de quartz et de feldspath, qui a fait l'objet d'une série d'essais préalablement consolidés sous  $2,6 \cdot 10^5$  Pa.

### II.1.3. - Résultats des essais

Les points de mesure expérimentaux de tous les essais sont énumérés en Annexe II.1.

Les résultats numériques des divers essais sont regroupés par type de sol dans le Tableau II.1.1.

Nous avons préféré utiliser le paramètre taux de gonflement  $\frac{\Delta h}{h_0}$  plutôt que l'indice des vides  $e$  classiquement utilisé en consolidation, car il nous donne directement l'estimation quantitative du phénomène étudié.

L'indice des vides est de toutes façons très simplement relié au taux de gonflement par :

$$\frac{\Delta e}{1+e_0} = \frac{\Delta h}{h_0}$$

avec 
$$e_0 = \frac{\gamma_s (w_0 + 1)}{\gamma_h} - 1$$

$\gamma_s$  : poids spécifique des grains du sol  
 $\gamma_h$  : "densité" humide  
 $w_0$  : teneur en eau initiale

Pour les essais de gonflement libre sans consolidation préalable nous donnons les teneurs en eau initiale  $w_0$  et finale  $w_f$  mesurées, et pour les essais avec consolidation préalable nous donnons la teneur en eau finale  $w_f$  mesurée, et initiale  $w_0$  calculée à l'aide la relation :

$$w_0 = \frac{w_f - \frac{\Delta h}{h_0} \cdot \frac{\gamma_w}{\gamma_s}}{\frac{\Delta h}{h_0} + 1}$$

Les représentations graphiques utilisées pour l'interprétation des essais sont les suivantes :

- . relation  $\frac{\Delta h}{h_0} = f(\log t)$  - représentation classique qui permet d'apprécier gonflement primaire et gonflement secondaire, et de déterminer le temps de demi-gonflement  $T_{0.5}$  et le taux de gonflement final  $\left(\frac{\Delta h}{h_0}\right)_f$  expérimentaux
- . relation  $\frac{\Delta h}{h_0} = g(t)$  : représentation directe du taux de gonflement en fonction du temps
- . relation  $t / \left(\frac{\Delta h}{h_0}\right) = h(t)$  : permet de vérifier ou éventuellement d'infirmer la loi hyperbolique  $\frac{\Delta h}{h_0} = G \frac{t}{B+t}$  postulée et d'en calculer les paramètres B et G.

Vu le nombre d'essais effectués (44) les représentations graphiques sont présentées sous forme groupée à raison d'une figure par relation et par type de sol.

De plus, la relation  $\frac{\Delta h}{h_0} = g(t)$ , qui n'est pas utilisée directement dans l'interprétation des essais, n'est illustrée que par quelques exemples concernant l'Argile Plastique de Provins.

Relation  $\frac{\Delta h}{h_0} = f(\log t)$  ..... Fig. II.1.3. (a) à II.1.3. (f)

Relation  $\frac{\Delta h}{h_0} = g(t)$  ..... Fig. II.1.4.

Relation  $t / \left(\frac{\Delta h}{h_0}\right) = h(t)$  ..... Fig. II.1.5. (a) à II.1.5. (f)

(a) Argile de Provins - sans consolidation préalable : Gonflement 1

| Echantillon | Epaisseur<br>ho (mm) | Wo %  | Wf %  | To <sup>5</sup> (mm) | B (mm) | $\left(-\frac{\Delta h}{ho}\right)_f$ % | G %   |
|-------------|----------------------|-------|-------|----------------------|--------|-----------------------------------------|-------|
| 1.1         | 40.50                | 23,26 | 29,88 | 850                  | 970    | 13,31                                   | 13,89 |
| 1.2         | 25.10                | 23,26 | 31,91 | 400                  | 640    | 13,31                                   | 13,89 |
| 1.3         | 19.08                | 22,89 | 34,00 | 190                  | 340    | 16,75                                   | 16,95 |
| 1.4         | 20.71                | 21,24 | 34,86 | 800                  | 880    | 28,20                                   | 29,41 |
| 2.1         | 18.10                | 21,94 | 36,31 | 177                  | 170    | 16,85                                   | 17,24 |
| 2.2         | 24.70                | 21,56 | 36,90 | 388                  | 280    | 18,58                                   | 18,87 |
| 2.3         | 31.35                | 25,80 | 36,31 | 533                  | 480    | 15,87                                   | 16,13 |
| 3.1.1       | 41.40                | 26,42 | 28,55 | 1081                 | 1490   | 3,32                                    | 4,03  |
| 3.2.1       | 30.05                | 27,80 | 30,60 | 945                  | 670    | 4,26                                    | 4,48  |
| 3.3.1       | 14.85                | 25,65 | 32,38 | 394                  | 320    | 10,61                                   | 10,75 |
| 3.4.1       | 40.05                | 25,08 | 27,50 | 1096                 | 1340   | 3,85                                    | 4,46  |
| 4.1.1       | 33.35                | 27,91 | 33,03 | 1025                 | 1100   | 7,80                                    | 8,20  |
| 4.2.1       | 33.30                | 30,05 | 35,32 | 996                  | 840    | 7,78                                    | 8,40  |
| 4.3.1       | 34.25                | 27,02 | 34,32 | 534                  | 350    | 11,27                                   | 11,63 |
| 5.1.1       | 63.16                | 23,92 | 28,50 | 2700                 | 3450   | 7,42                                    | 10,31 |
| 5.4         | 65.10                | 24,33 | 25,51 | 1678                 | 2159   | 5,22                                    | 5,68  |
| 1           | 78.10                | 26,38 | 32,00 | 3190                 | 3770   | 8,68                                    | 9,43  |
| 2           | 80.00                | 26,81 | 34,00 | 2700                 | 3100   | 10,90                                   | 11,90 |

Tableau II.1.1. - Résultats numériques des essais de gonflement libre unidimensionnel

(b) Argile de Provins avec consolidation préalable sous  $1,3 \cdot 10^5$  Pa; Gonflement 2

| Echantillon | Epaisseur<br>$h_o$ (mm) | $W_o$ % | $W_f$ % | $T_{o5}$ (mm) | B (mm) | $\left(\frac{\Delta h}{h_o}\right)_f$ % | G %  |
|-------------|-------------------------|---------|---------|---------------|--------|-----------------------------------------|------|
| 3.1.2       | 41.03                   | 28.50   | 30.59   | 406           | 670    | 3.20                                    | 3.55 |
| 3.2.2       | 29.12                   | 27.23   | 30.89   | 367           | 600    | 5.63                                    | 5.95 |
| 3.3.2       | 15.07                   | 26.02   | 29.66   | 235           | 290    | 5.71                                    | 5.88 |
| 3.4.2       | 40.30                   | 25.80   | 27.03   | 389           | 680    | 1.97                                    | 2.27 |
| 4.1.2       | 33.28                   | 26.00   | 29.64   | 400           | 780    | 5.86                                    | 5.99 |
| 4.2.2       | 32.38                   | 33.64   | 39.07   | 360           | 570    | 7.61                                    | 7.58 |
| 4.3.2       | 34.33                   | 30.70   | 36.00   | 420           | 760    | 7.62                                    | 7.58 |
| 5.1.2       | 66.19                   | 25.87   | 28.50   | 1465          | 1360   | 4.00                                    | 3.79 |
| 5.2.2       | 54.74                   | 26.02   | 28.50   | 611           | 790    | 3.67                                    | 3.94 |

Tableau II.1.1. - Résultats numériques des essais de gonflement libre unidimensionnel



| (c) Argile d'Aix-Les-Bains - Consolidation préalable sous $2,6 \cdot 10^5$ Pa             |                         |         |         |               |        |                                         |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------|---------|---------------|--------|-----------------------------------------|------|
| Echantillon                                                                               | Epaisseur<br>$h_o$ (mm) | $W_o$ % | $W_f$ % | $T_{o5}$ (mm) | B (mm) | $\left(\frac{\Delta h}{h_o}\right)_f$ % | G %  |
| 6.1                                                                                       | 55.34                   | 26.00   | 29.53   | 50            | 380    | 5.55                                    | 5.70 |
| 6.2                                                                                       | 31.34                   | 24.80   | 27.52   | 17            | 190    | 4.34                                    | 4.39 |
| 6.3                                                                                       | 28.89                   | 26.00   | 29.15   | 15            | 110    | 5.11                                    | 5.00 |
| 6.4                                                                                       | 23.78                   |         |         | 28            | 240    | 6.20                                    | 6.10 |
| 6.5                                                                                       | 46.13                   | 25.00   | 29.40   | 74            | 320    | 6.76                                    | 6.80 |
| (d) Argile Plastique Bariolée (La Défense) - Consolidation préalable $0,70 \cdot 10^5$ Pa |                         |         |         |               |        |                                         |      |
| 8.2                                                                                       | 62.09                   | 32.80   | 35.00   | 407           | 430    | 3.14                                    | 3.18 |
| 8.3                                                                                       | 50.18                   | 32.03   | 35.00   | 351           | 347    | 4.25                                    | 4.35 |
| 8.4                                                                                       | 66.97                   | 32.52   | 36.35   | 780           | 450    | 5.45                                    | 5.56 |
| 8.5                                                                                       | 41.25                   | 35.25   | 36.80   | 870           | 310    | 2.12                                    | 2.08 |
| 8.6                                                                                       | 33.28                   | 31.51   | 35.42   | 245           | 250    | 5.64                                    | 5.59 |

Tableau II.1.1. - Résultats numériques des essais de gonflement libre unidimensionnel

| (e) Argile Verte de Montreuil - Consolidation préalable sous $5,2 \cdot 10^5$ Pa |                         |         |         |                |        |                                         |       |
|----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------|---------|----------------|--------|-----------------------------------------|-------|
| Echantillon                                                                      | Epaisseur<br>$h_o$ (mm) | $W_o$ % | $W_f$ % | $T_{o.5}$ (mn) | B (mn) | $\left(\frac{\Delta h}{h_o}\right)_f$ % | G %   |
| 5                                                                                | 46.80                   | 31.23   | 40.66   | 2450           | 2600   | 13.68                                   | 14.40 |
| 6                                                                                | 81.70                   | 29.13   | 35.22   | 4650           | 5200   | 9.11                                    | 10.00 |
| 7                                                                                | 69.58                   | 31.97   | 37.20   | 3700           | 4200   | 7.50                                    | 8.00  |
| 7 b.                                                                             | 59.06                   | 31.60   | 37.70   | 3700           | 4200   | 8.80                                    | 9.50  |
| 8                                                                                | 92.03                   | 27.00   |         | 4700           | 6000   | 7,30                                    | 8.00  |

| (f) Fausses Glaises (La Défense) - Consolidation préalable sous $6,5 \cdot 10^5$ Pa |        |       |       |      |      |       |       |
|-------------------------------------------------------------------------------------|--------|-------|-------|------|------|-------|-------|
| 2                                                                                   | 90.47  | 33.00 | 41.60 | 600  | 1200 | 12.21 | 12.50 |
| 3                                                                                   | 64.92  | 33.70 | 43.00 | 340  | 300  | 13.02 | 13.50 |
| 4                                                                                   | 125.16 | 33.80 | 39.83 | 1180 | 2400 | 8.41  | 8.70  |

Tableau II.1.1. - Résultats numériques des essais de gonflement libre unidimensionnel

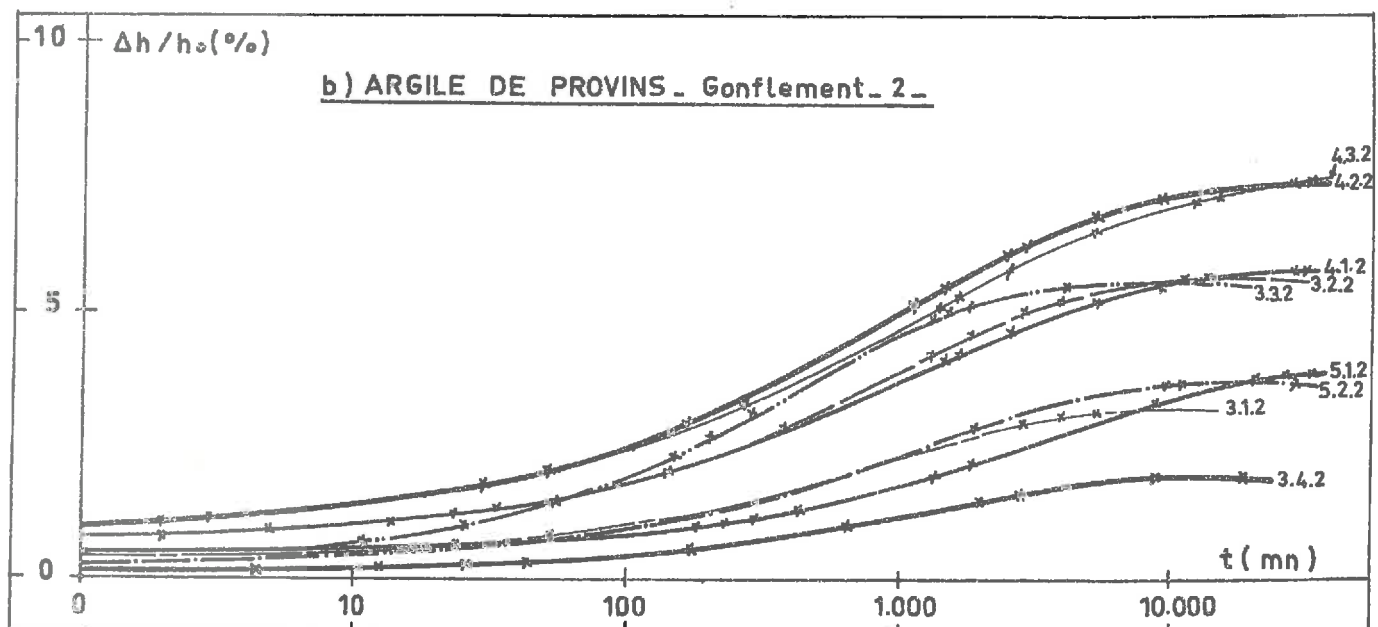
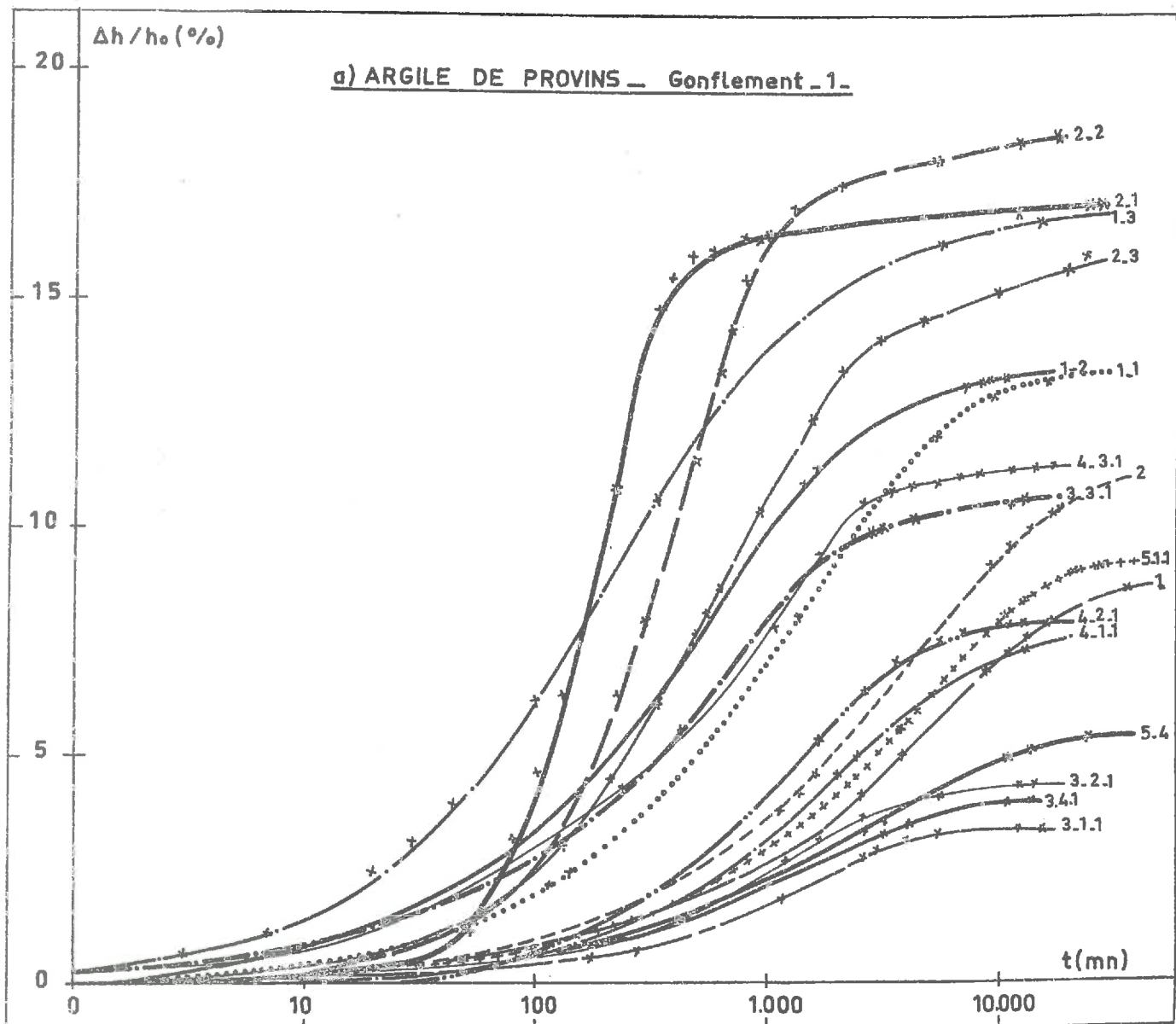


Fig. II.1.3 — Cinétique du gonflement — Relation  $\Delta h / h_0 = f(\log t)$  .

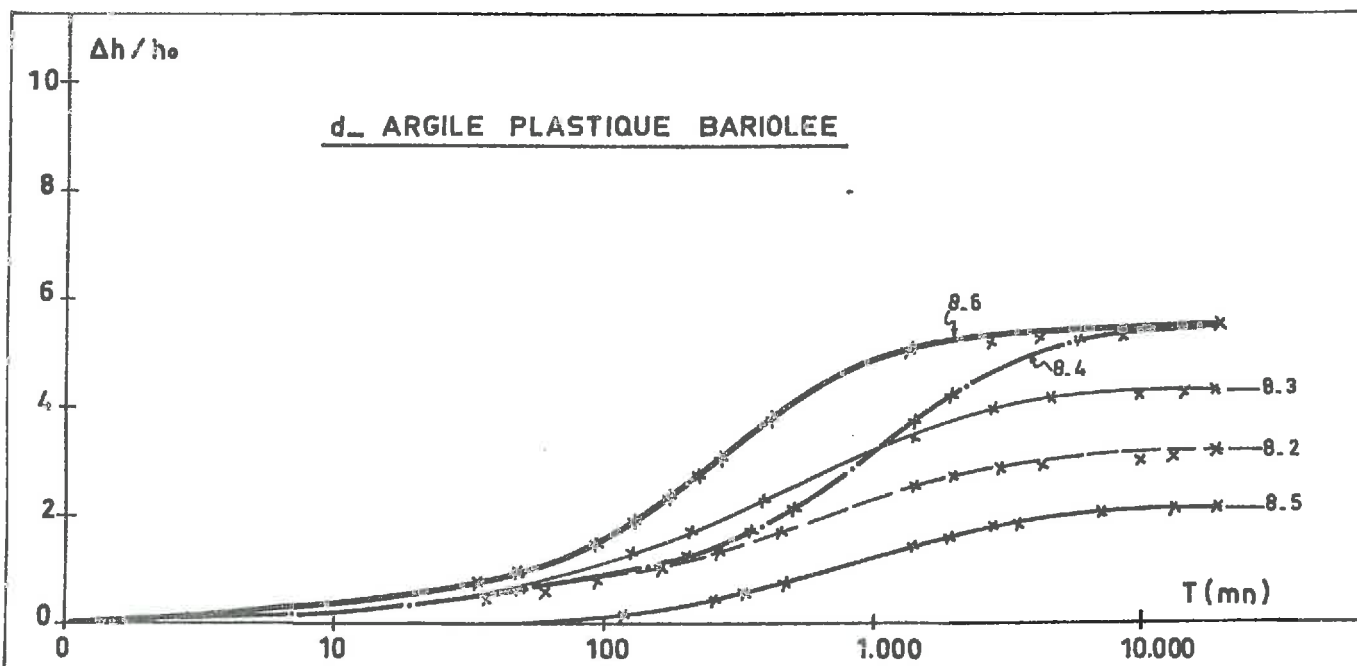
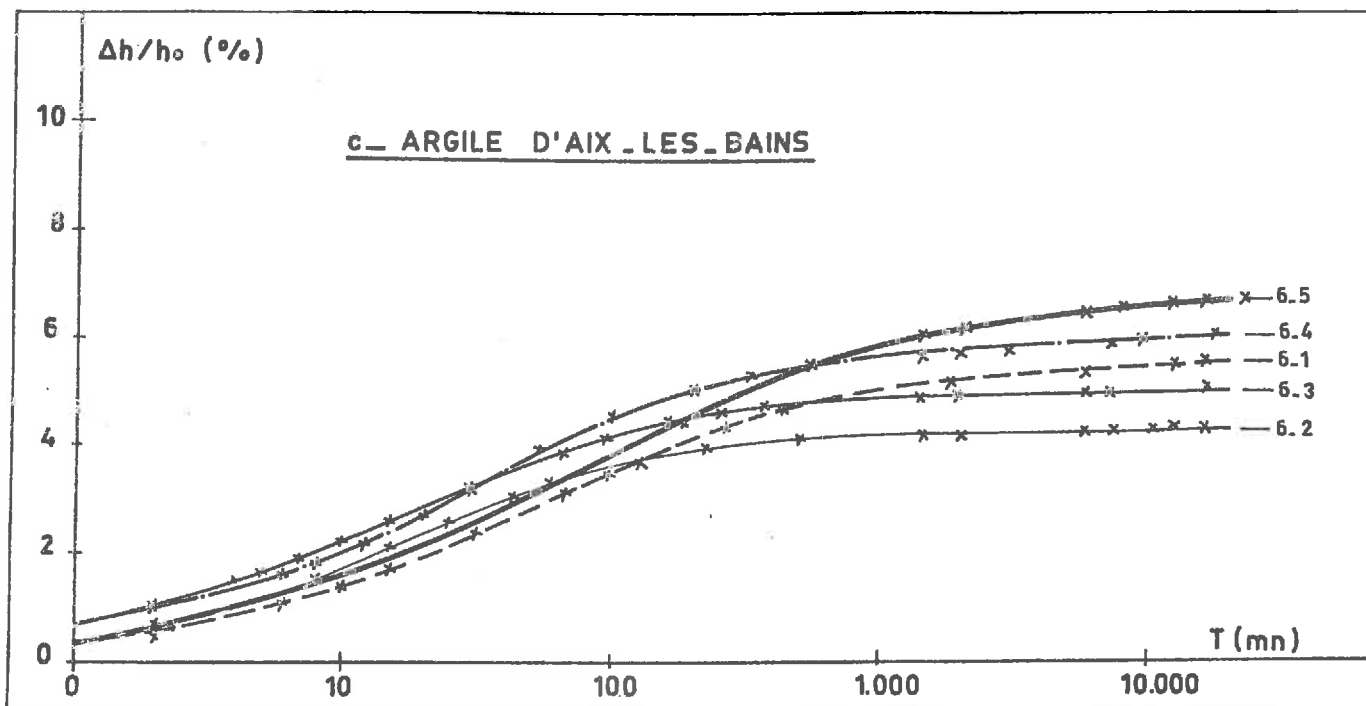


Fig. II.1.3\_ Cinétique du gonflement\_ Relation  $\Delta h/h_0 = f(\log t)$ .

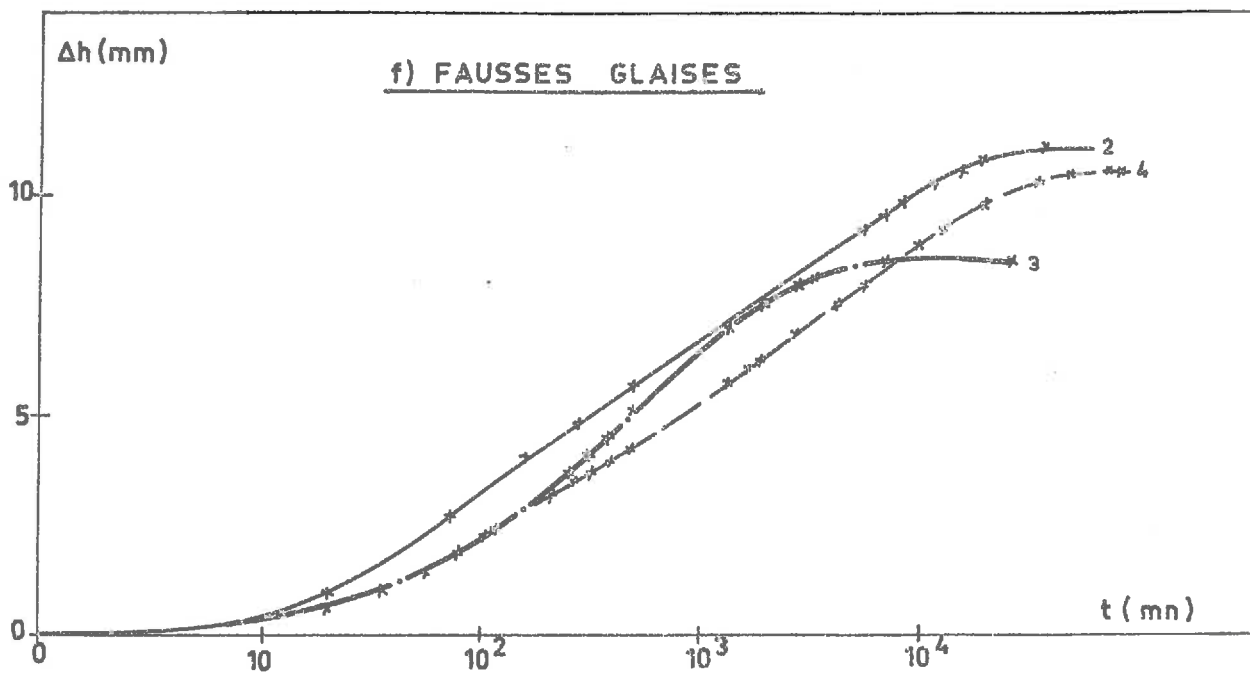
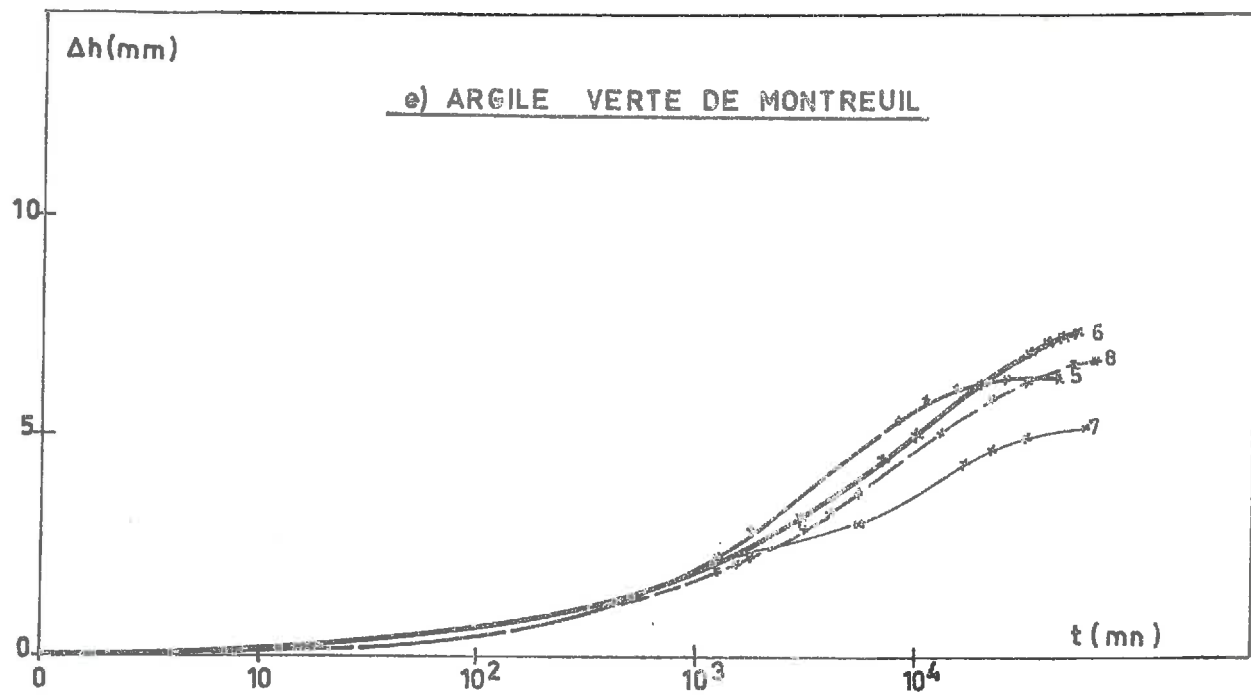


Fig. II.1.3. — Cinétique du gonflement — Relation  $\Delta h = f(\log t)$ .

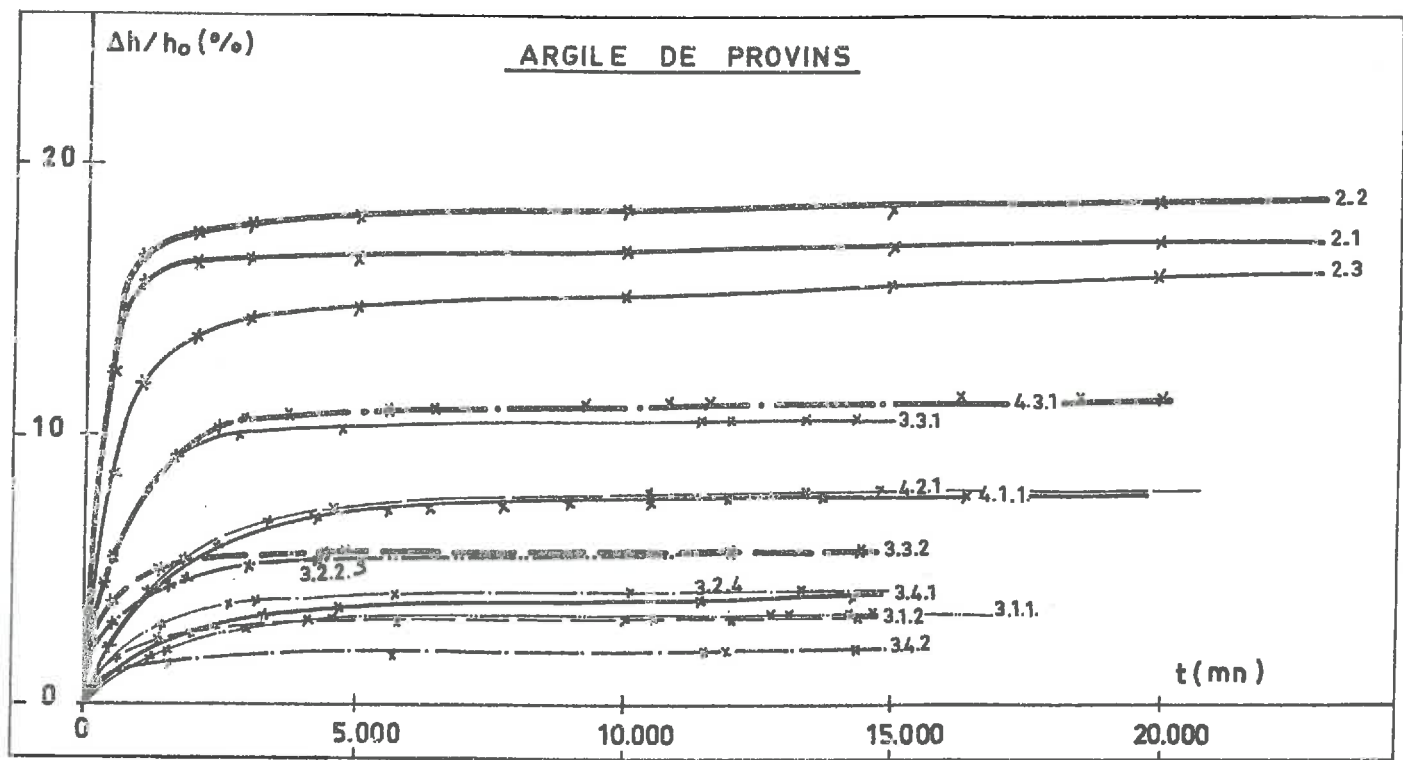


Fig. II.1.4. — Cinétique du gonflement - Relation  $\Delta h/h_0 = g(t)$ .

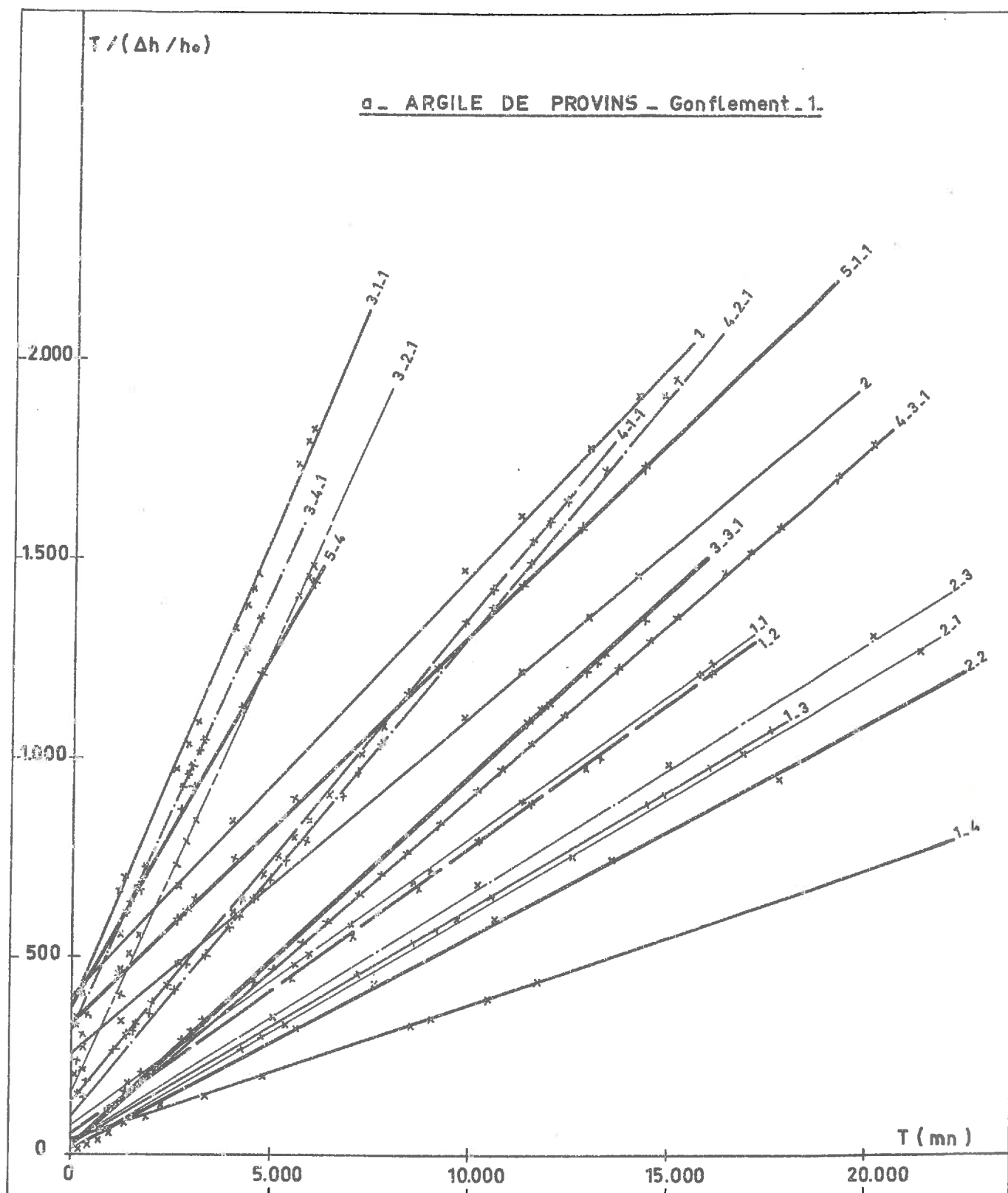


Fig. II.1.5. — Cinétique du gonflement — Relation  $T / (\Delta h / h_0) = h(t)$ .

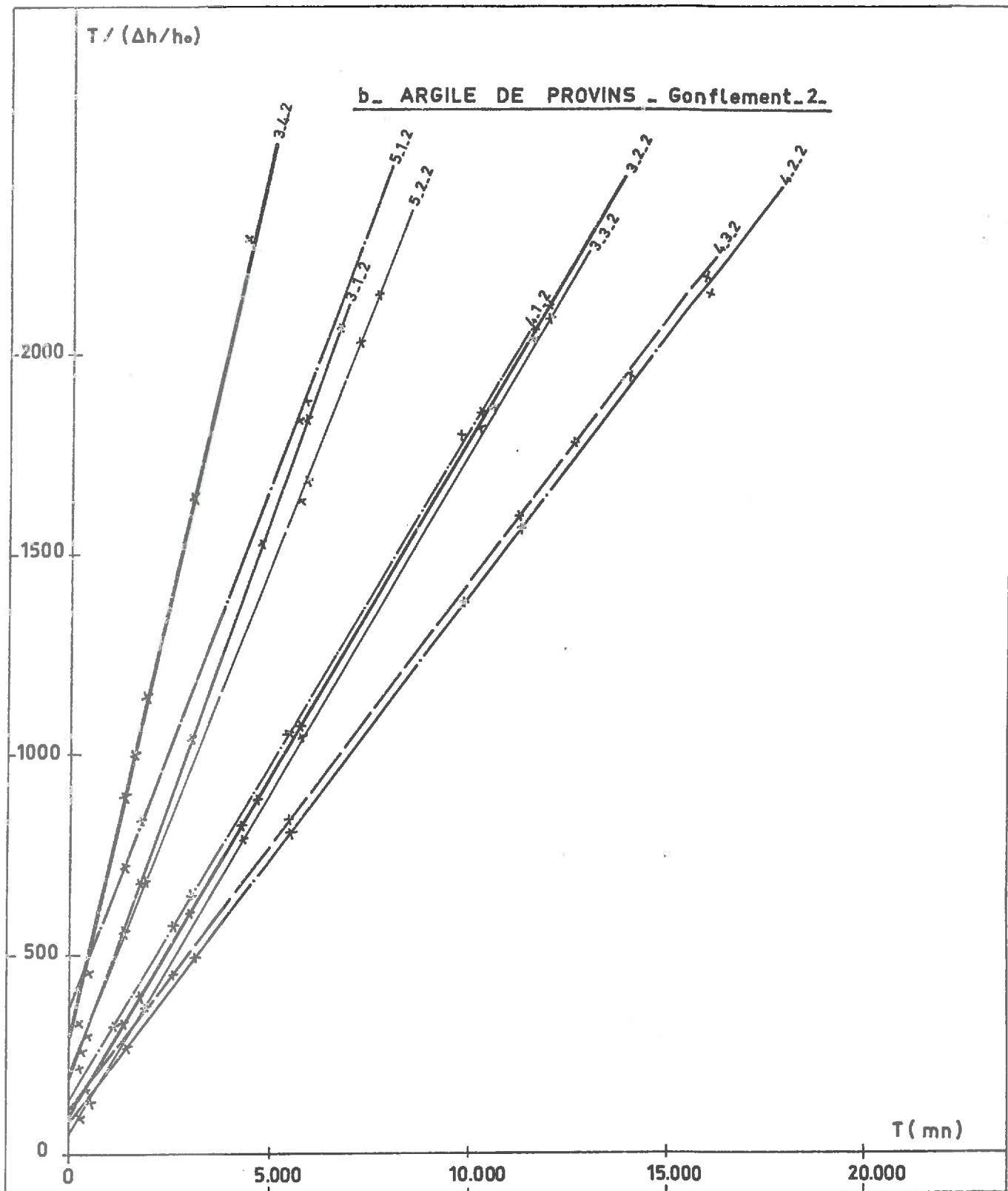


Fig. II. 1\_5. — Cinétique du gonflement — Relation  $T / (\Delta h / h_0) = h(t)$ .



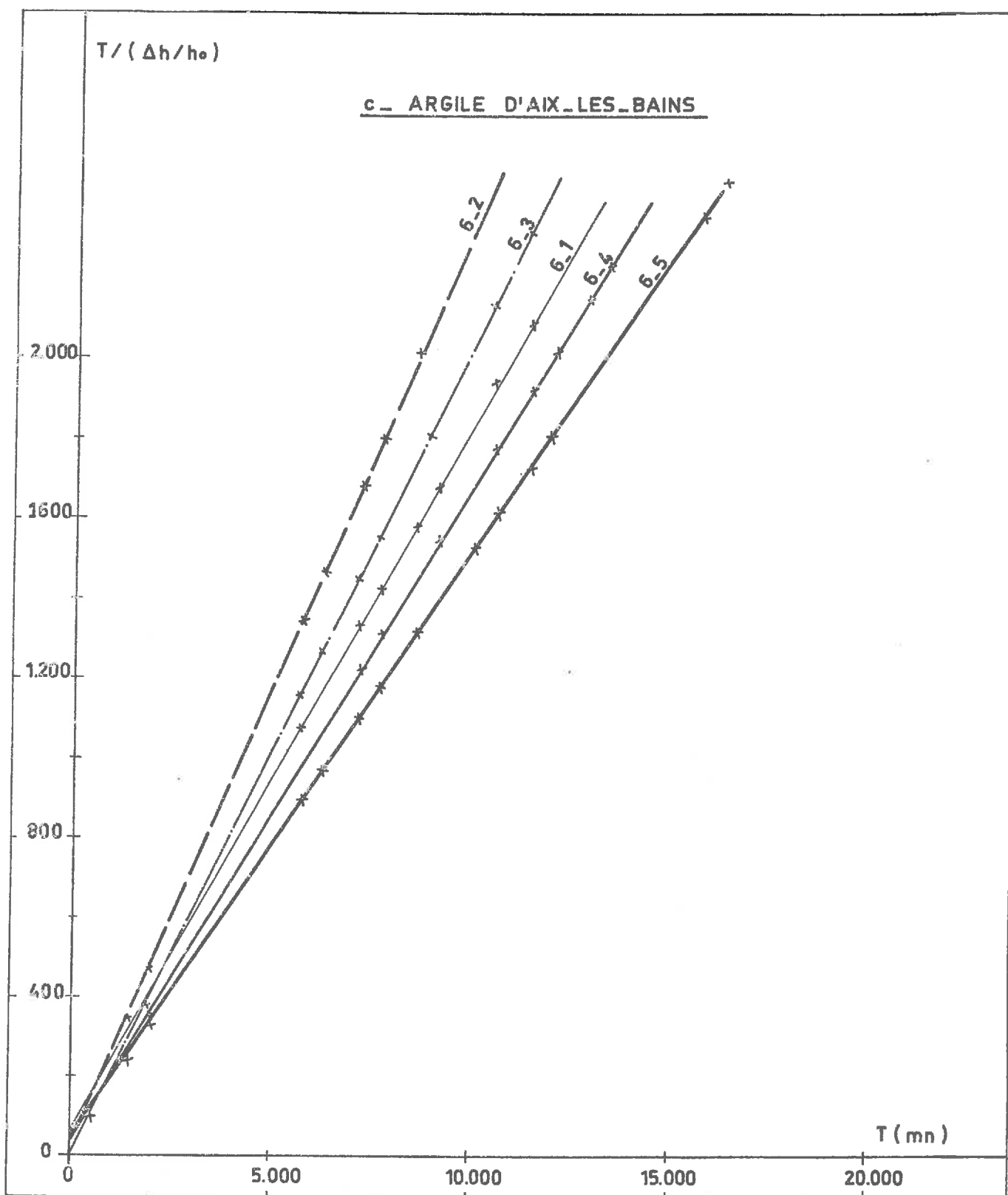


Fig. II.1.5. — Cinétique du gonflement — Relation  $T / (\Delta h / h_0) = h(t)$  .

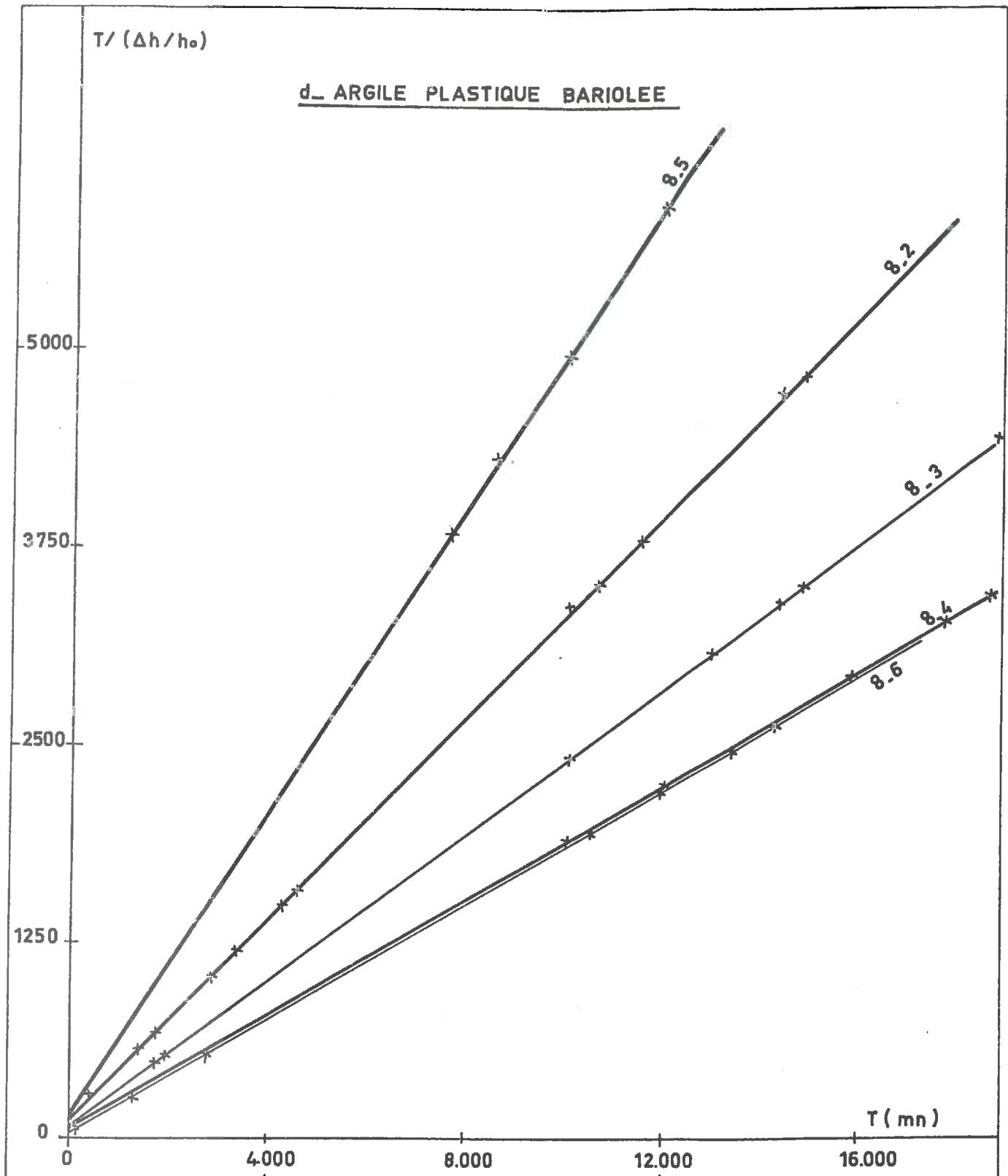


Fig. II.1.5. — Cinétique du gonflement — Relation  $T / (\Delta h / h_0) = h(t)$ .

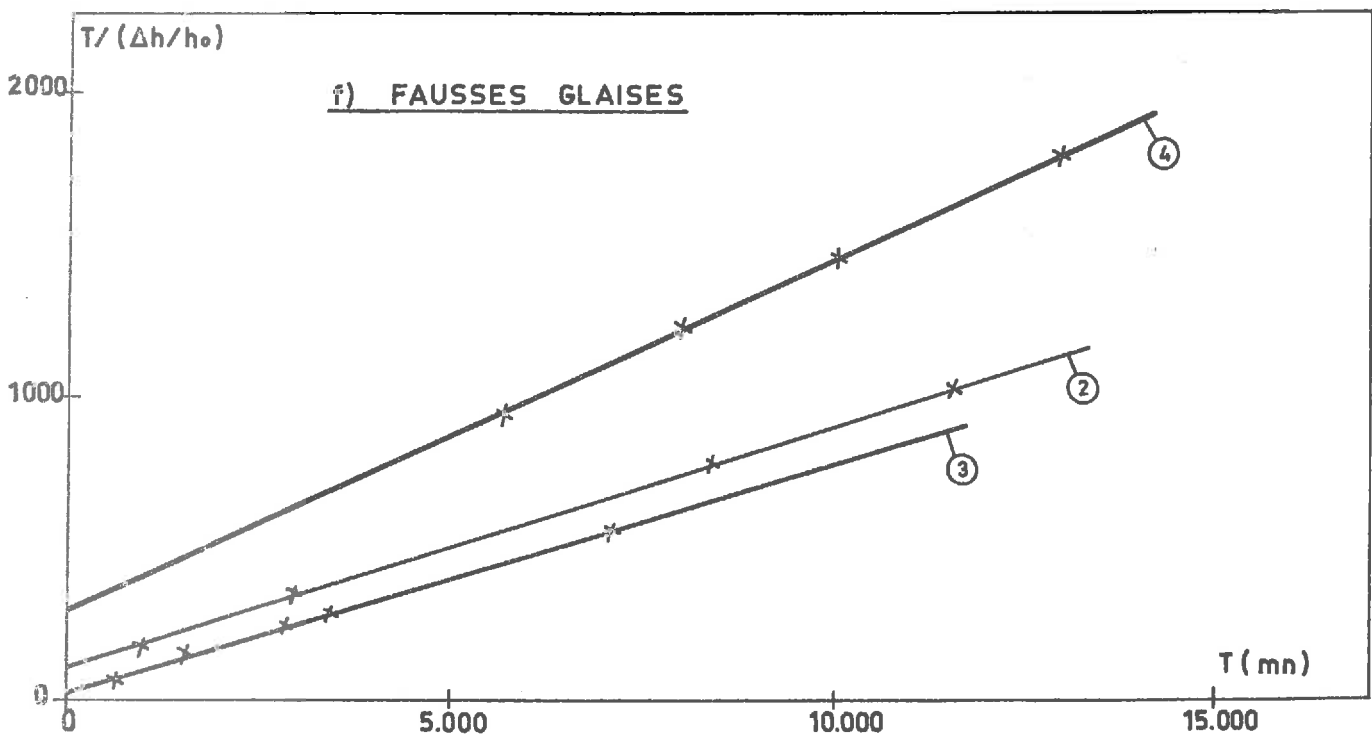
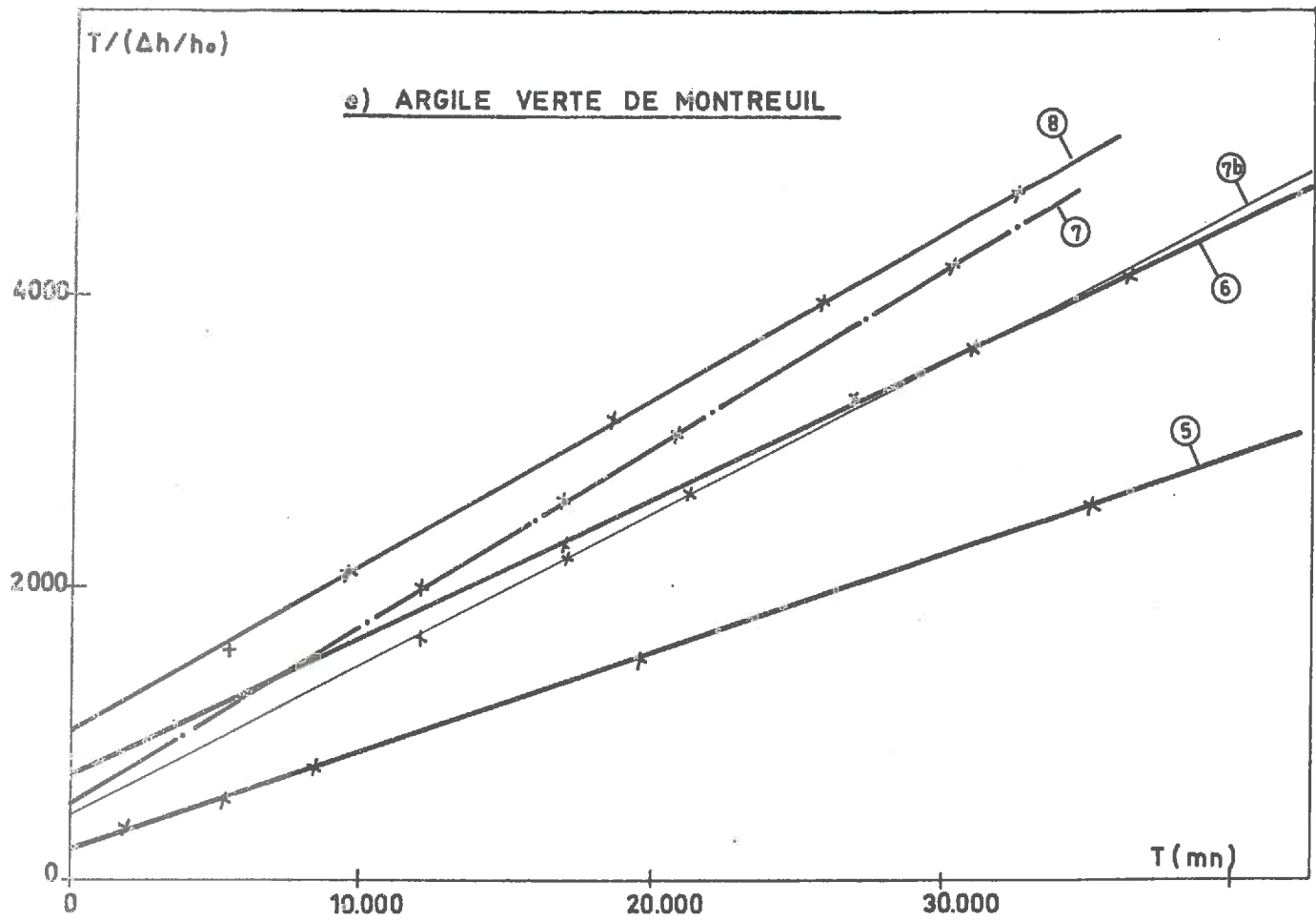


Fig. II.1.5. — Cinétique du gonflement - Relation  $T/(\Delta h/h_0) = f(t)$ .

#### II.1.4. - Modélisation du gonflement par une loi hyperbolique

On remarque tout d'abord que nous obtenons des relations  $\left(\frac{\Delta h}{h_0}\right) = f(\log t)$  (Figure II.1.3. a à f) en forme de "f", où le gonflement secondaire est très faible devant le gonflement primaire. Il est donc plausible de dire que l'essentiel du gonflement est réalisé quand les essais sont stoppés.

Les exemples de relation  $\frac{\Delta h}{h_0} = f(t)$  donnés (Figure II.1.4.) présentent une allure globale hyperbolique à asymptote parallèle à l'axe des temps.

Pour tous les essais effectués, les relations  $t/\frac{\Delta h}{h_0} = f(t)$  (Figure II.1.5. a à f) sont bien corrélées à des droites. On peut donc en conclure que le taux de gonflement suit la loi hyperbolique :

$$\frac{\Delta h}{h_0} = G \cdot \frac{t}{B+t}$$

On constate néanmoins que les débuts d'essais présentent une période d'anomalie, dont la durée varie selon les sols, mais dépasse rarement 1000 minutes, et qui est certainement inhérente à la technique de manipulation elle-même (dissolution des bulles d'air piégées, contraintes latérales, état des surfaces).

Le taux de gonflement final déterminé graphiquement par la loi hyperbolique soit G, est pratiquement égal au taux de gonflement final mesuré expérimentalement,  $\left(\frac{\Delta h}{h_0}\right)_f$  (Figure II.1.6.).

Par contre il existe une différence sensible entre le temps de demi-gonflement déterminé graphiquement B et le temps de demi-gonflement mesuré expérimentalement T0.5 (Figure II.1.7.). Cette différence est due à la cinétique "anormale" de début d'essai, qui a une grande influence sur T0.5 (obtenu au bout d'un temps relativement court) alors qu'elle n'en a aucune sur B déterminé uniquement à partir de la loi hyperbolique corrigée par rapport à cette anomalie.

Il est donc clair que dans l'optique modélisatrice que nous nous sommes fixée, les coefficients à prendre en compte sont les coefficients obtenus graphiquement G et B, à partir des données expérimentales, plutôt que les coefficients mesurés directement  $\left(\frac{\Delta h}{h_0}\right)_f$  et T0.5.

#### II.1.5. - Dispersion des taux de gonflement finaux

Si pour un même sol, tous les échantillons utilisés avaient rigoureusement le même état initial et si la technique opératoire était

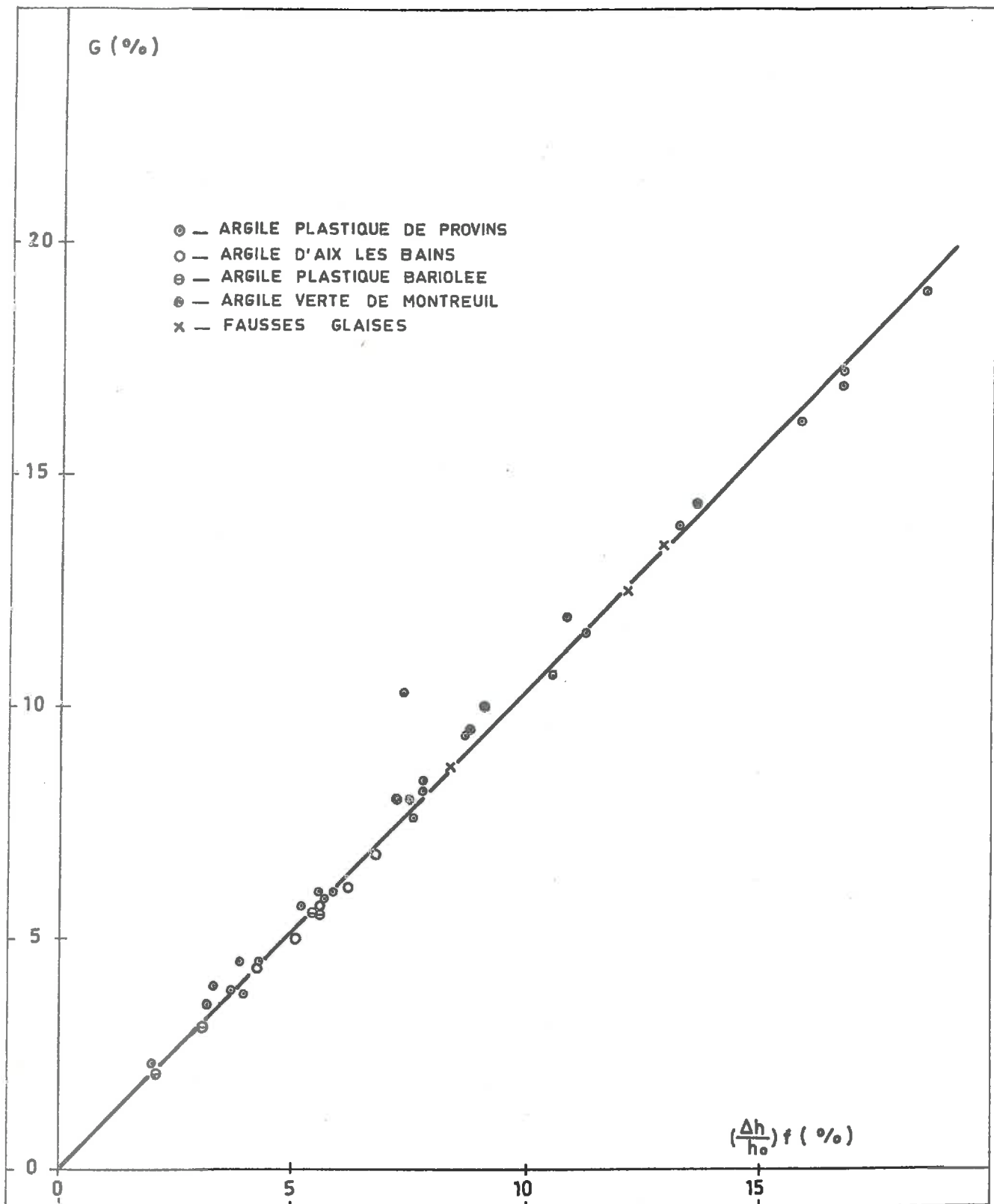


Fig.II.1.6.—Relation entre les taux de gonflements mesurés  $(\frac{\Delta h}{h_0})f$  et calculés  $G$  (tous sols confondus).

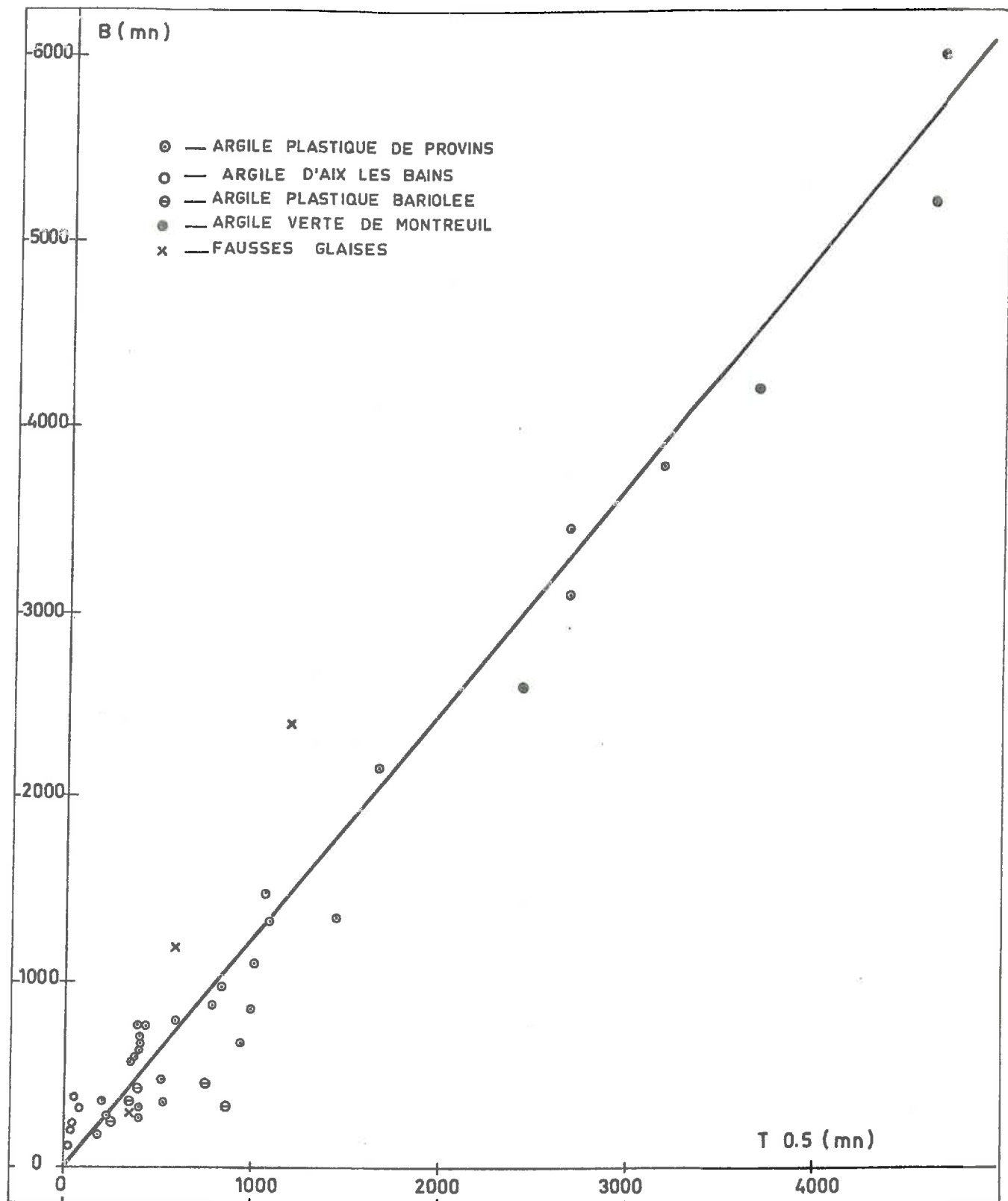


Fig.II.17.-Relation entre les temps de demi gonflement mesuré T 0.5 et calculé B (tous sols confondus ).

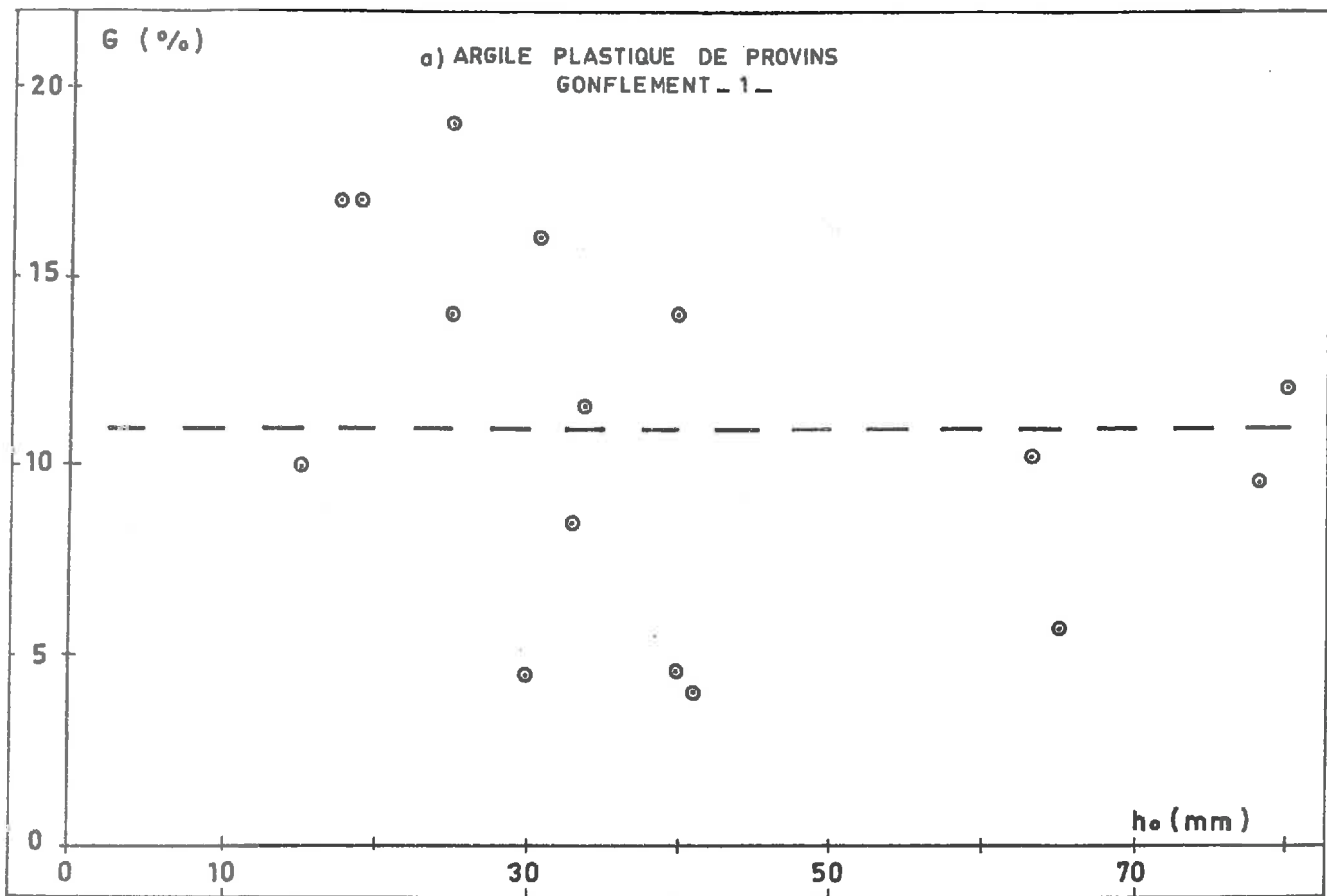
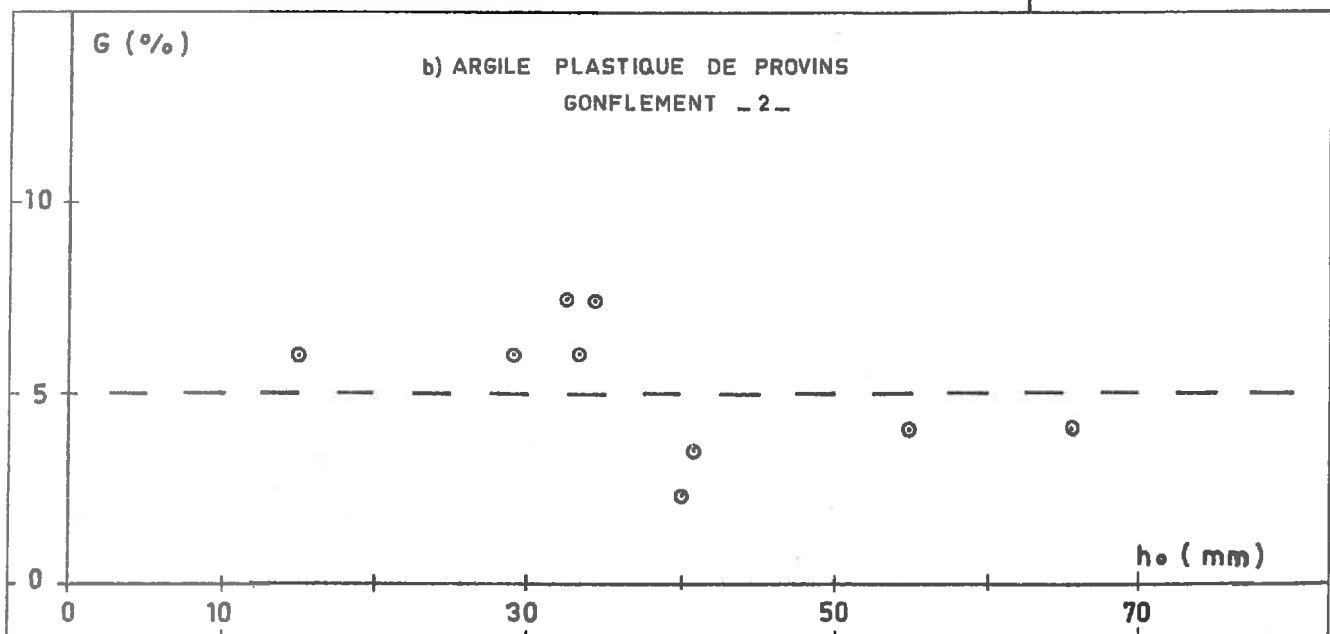


Fig.II.18. — Dispersion des résultats de taux de gonflement final .



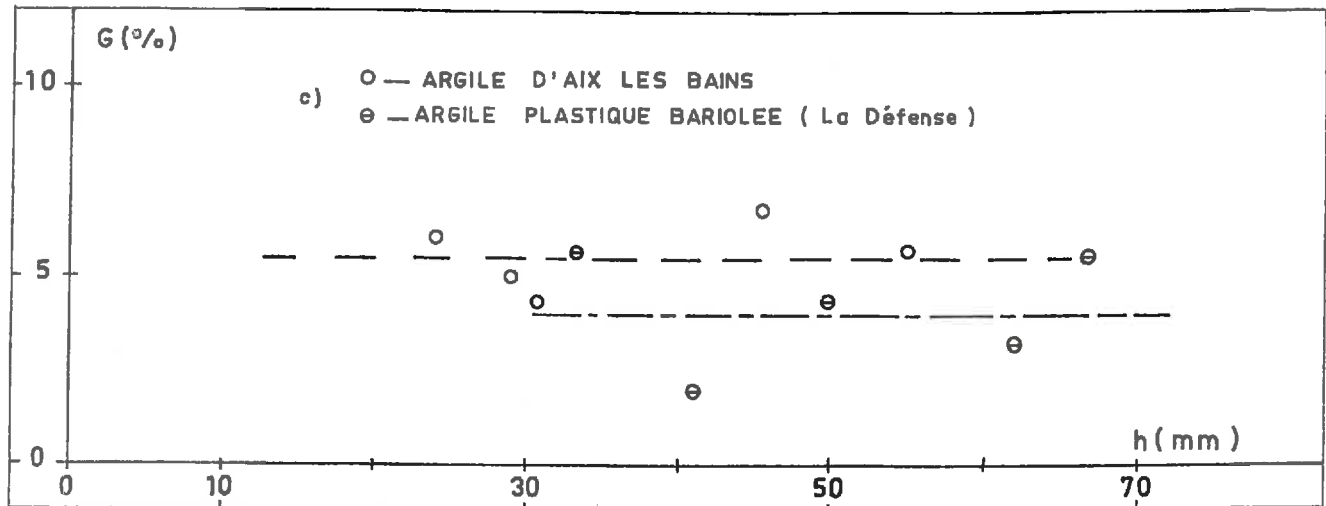
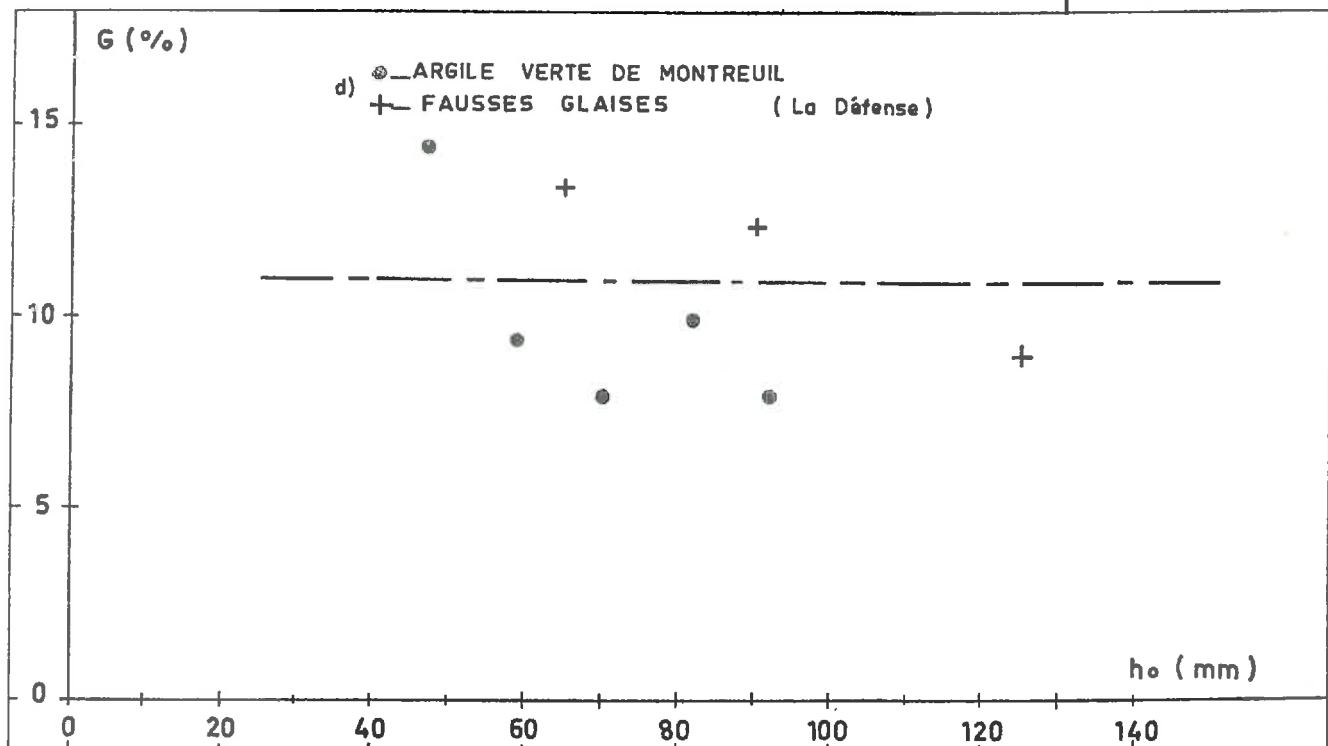


Fig.II.1.8.— Dispersion des résultats de taux de gonflement final





"parfaite", nous devrions obtenir le même taux de gonflement final  $G$  quelle que soit l'épaisseur de l'échantillon. Ce taux de gonflement unique représenterait le taux de gonflement d'un sol donné, dans un état initial donné, en présence d'eau.

Malheureusement, des échantillons prélevés côte à côte dans des blocs ou carottes "homogènes" présentent des conditions initiales différentes, appréhendées ici par la teneur en eau initiale (Tableau II.1.2.).

| sol<br>dispersion<br>des teneurs<br>en eau | A.P. Provins<br>ss consoli-<br>dation | A.P. Provins<br>avec conso-<br>lidation pré-<br>alable | A.P. Bariolée<br>avec consoli-<br>dation | Fausses Glaises<br>avec consolida-<br>tion | Ar.d'Aix-<br>avec con-<br>solidat. | A.V.Montré<br>avec consoli-<br>dation |
|--------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| minimum %                                  | 21                                    | 26                                                     | 31                                       | 33                                         | 24                                 | 27                                    |
| maximum %                                  | 30                                    | 33                                                     | 35                                       | 34                                         | 26                                 | 32                                    |

Tableau II.1.2. - Dispersion des teneurs en eau initiales

Cette dispersion des teneurs en eau initiales est d'ailleurs plus importante pour des échantillons non consolidés préalablement (Argile Plastique de Provins sans consolidation) que pour des échantillons consolidés préalablement (toutes les autres séries).

Les différences de conditions initiales ajoutées aux variations inhérentes à un appareillage expérimental d'un essai à l'autre entraînent une dispersion du taux de gonflement final observé. Nous avons représenté le taux de gonflement final  $G$  en fonction de l'épaisseur des échantillons  $h_0$ , pour chaque série d'essai effectué (Figure II.1.8. - a à d).

On note une assez grande dispersion des résultats, la plus forte dispersion étant obtenue pour la série d'essais sans consolidation préalable effectuée sur l'Argile Plastique de Provins.

Néanmoins pour chaque série d'essais le taux de gonflement oscille autour d'une valeur moyenne constante en fonction de l'épaisseur des échantillons (droite de corrélation parallèle à l'axe des épaisseurs) montrant que le taux de gonflement d'un sol ne dépend pas de l'épaisseur de la couche.

De plus ce taux de gonflement moyen varie selon les séries d'essais (Tableau II.1.3.)

|                                    | G moyen (%) |
|------------------------------------|-------------|
| A.P. Provins sans consolidation    | 11          |
| A.P. Provins avec consolidation    | 5           |
| A.P. Bariolée avec consolidation   | 4           |
| Fausses Glaises avec consolidation | 11          |
| Argile d'Aix avec consolidation    | 5,5         |
| A.V. Montreuil avec consolidation  | 11          |

Tableau II.1.3. - Taux de gonflement moyen pour chaque série d'essais

Il est clair que cette dispersion du taux de gonflement final doit s'accompagner d'une variation de cinétique des essais et d'une dispersion des temps de demi-gonflement, paramètre dont nous désirons étudier le comportement en fonction de l'épaisseur des échantillons.

Une difficulté est donc introduite dans l'interprétation des résultats. C'est pourquoi après une méthode directe d'étude du temps de demi-gonflement en fonction de l'épaisseur, nous utiliserons dans un cas, celui de l'Argile Plastique de Provins, une méthode indirecte, minimisant l'influence de la dispersion naturelle des résultats, afin de vérifier nos conclusions.

#### II.1.6. - Etude du temps de demi-gonflement B en fonction de l'épaisseur $h_0$ de la couche

La relation existant entre le temps de demi-gonflement B et l'épaisseur  $h_0$  des échantillons a été représentée graphiquement pour chaque type de sol étudié sur les Figures II.1.9. a à II.1.9. f.

Nous avons déterminé cette relation avec un nombre de points relativement important pour un type de sol, l'Argile de Provins, et nous l'avons ensuite vérifié sur les autres sols étudiés avec un nombre de points plus restreint.

##### II.1.6.1. - Argile de Provins

Deux séries d'essais ont été effectuées : une série d'essais de gonflement sans consolidation préalable (Gonflement I) et une série d'essais de gonflement après un premier gonflement et une consolidation

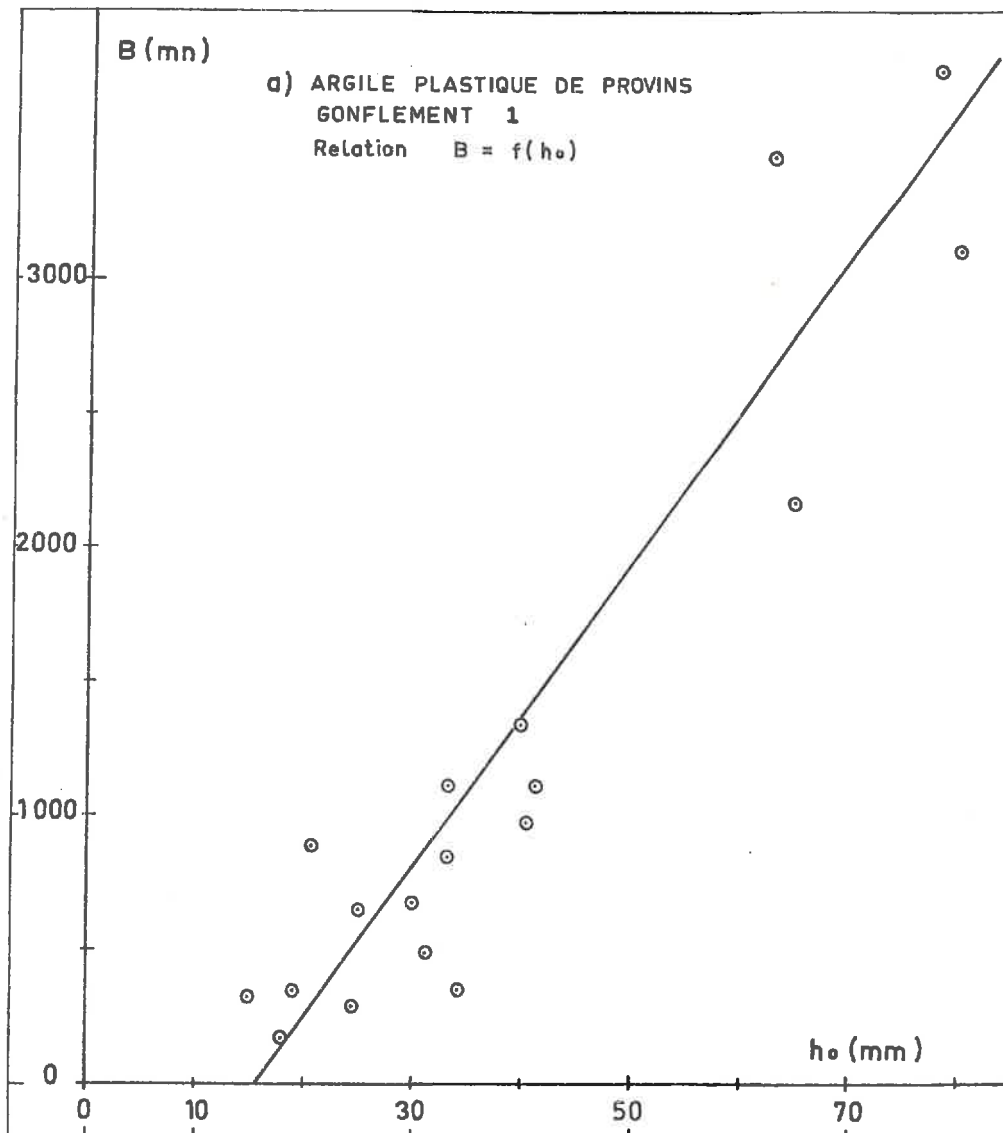
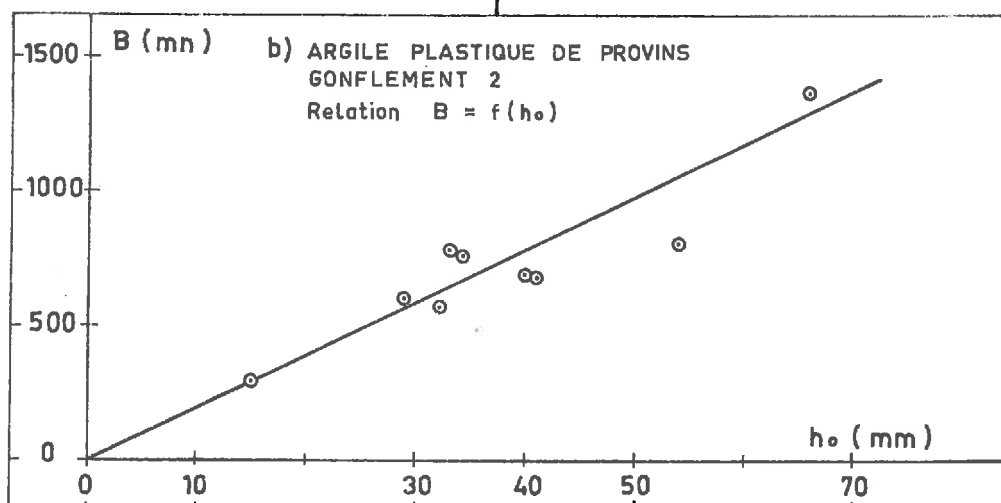


Fig.I.1.9. Relation entre  $B \text{ (mn)}$  et  $h_o \text{ (mm)}$



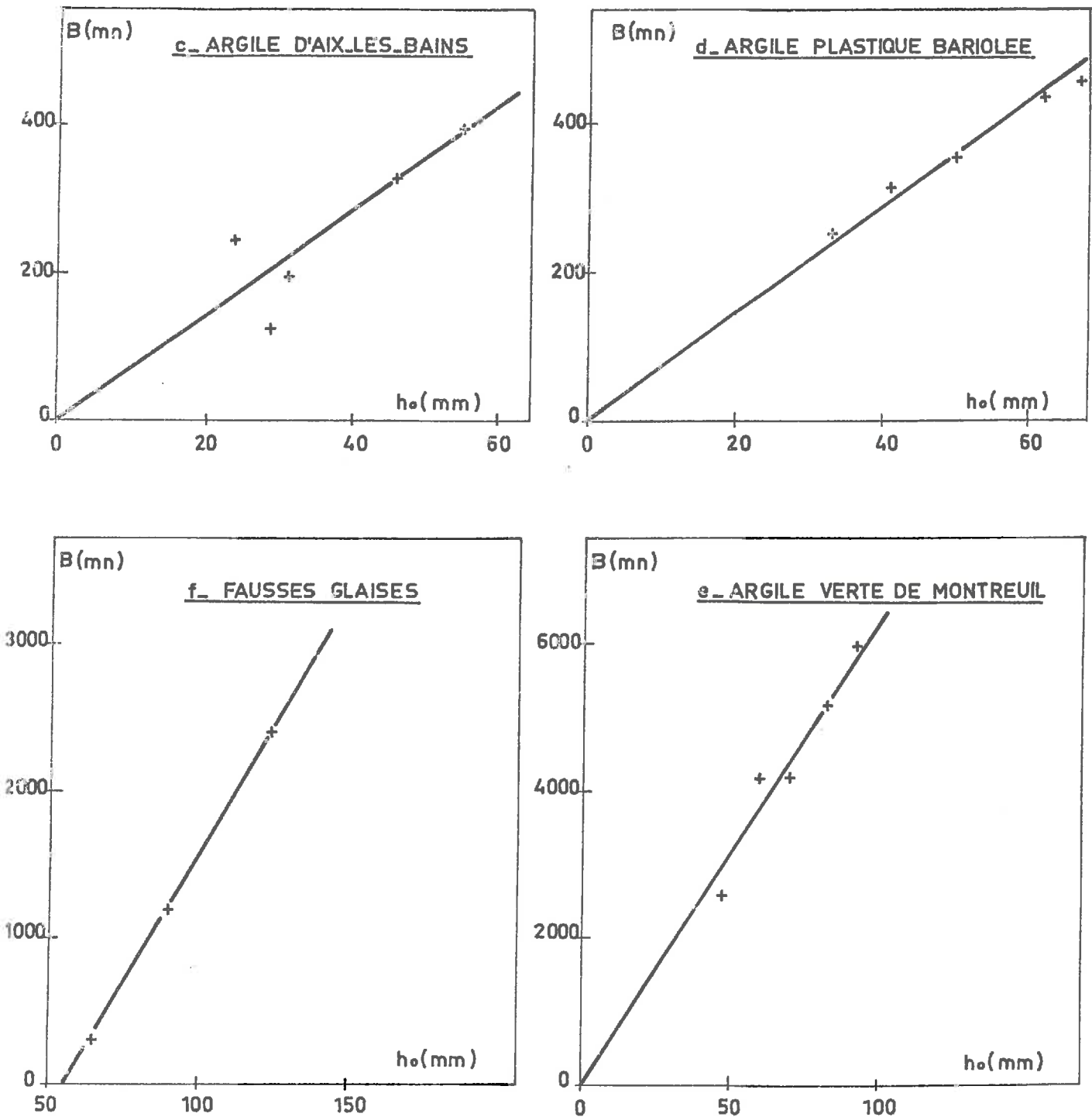


Fig. II.1.9 .— Relation entre  $B(mn)$  et  $h_0(mm)$  .

intermédiaire sous  $1,3 \cdot 10^5$  (Gonflement 2).

Pour les essais de Gonflement 2 la relation  $B = f(h_0)$  est, avec une assez bonne corrélation, une droite passant par l'origine  $B = c h_0$  (Figure II.1.9. b).

Pour les essais de Gonflement 1, la dispersion des résultats est beaucoup plus grande, et la relation  $B = f(h_0)$  est, avec une moins bonne corrélation, une droite passant au voisinage de l'origine (Figure II.1.9. - a).

Cette dispersion est due avant tout aux différences de conditions initiales des échantillons non consolidés, bien qu'ils aient été prélevés dans des blocs homogènes.

Au contraire une consolidation préalable a tendance à diminuer les variations des conditions initiales et donc à réduire la dispersion des résultats.

Deux conclusions majeures ressortent de ces deux séries d'essais :

- 1/ - le temps de demi-gonflement  $B$  est proportionnel à l'épaisseur de la couche argileuse  $h_0$  :  $B = c h_0$
- 2/ - une consolidation préalable diminue la dispersion des résultats des essais de gonflement.

La conclusion 1 a été vérifiée sur 4 autres sols à partir d'essais de gonflement préalablement consolidés.

#### II.1.6.2. - Vérification de la conclusion $B = c h_0$

Pour les quatre sols étudiés, Argile d'Aix-Les-Bains (Figure II.1.9. c), Argile Plastique Bariolée (Figure II.1.9. d), Argile Verte de Montreuil (Figure II.1.9. e), et Fausses Glaises (Figure II.1.9. f), la relation  $B = f(c h_0)$  est une droite. Pour les trois premiers d'entre eux cette droite passe par l'origine, pour le quatrième, les Fausses Glaises, la droite ne passe pas par l'origine (l'abscisse à l'origine est voisine de 5cm).

Le comportement des Fausses Glaises présente une anomalie par rapport au comportement général des autres sols étudiés, mais le caractère linéaire de la relation est conservé pour des échantillons très épais (13 cm), et de plus les essais de gonflement différentiel effectués (cf. § II. 2) montrent qu'en-dessous de 5 cm la dispersion obtenue sur le temps de demi-gonflement est très grande. Ceci nous amène à conclure que pour les Fausses Glaises le temps de demi-gonflement  $B$  varie linéairement avec l'épaisseur de

l'échantillon à partir d'une épaisseur voisine de 5 cm, qui est l'épaisseur minimale à utiliser pour étudier un tel sol, et que pour les épaisseurs courantes in situ, B est quasiment proportionnel à l'épaisseur :  $B \approx h_0$ . Le comportement des Fausses Glaises sera de toutes façons réexaminé lors de l'étude de la propagation du gonflement à l'intérieur d'une couche argileuse (Paragraphe II.2.).

#### II.1.7. - Méthodes indirectes pour déterminer la relation $B = c h_0$ - Application à l'Argile Plastique de Provins

La dispersion des résultats dans le cas d'essais de gonflement sans consolidation préalable (Argile Plastique de Provins Gonflement 1) nous a amené à utiliser également deux méthodes indirectes pour vérifier la proportionnalité entre B et  $h_0$ . Nous avons appliqué ces méthodes indirectes aux deux séries de gonflement de l'Argile Plastique de Provins (Gonflement 1 sans consolidation préalable et Gonflement 2 avec consolidation préalable).

##### II.1.7.1. - Première méthode indirecte

L'expression  $\frac{\Delta h}{h_0} = G \frac{t}{B+t}$  est équivalente à

$$G / \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{B}{t} + 1.$$

Une condition nécessaire et suffisante pour que le temps de demi-gonflement B soit proportionnel à l'épaisseur initiale  $h_0$  ( $B = c h_0$ ) est donc que la relation  $G / \frac{\Delta h}{h_0} = f(h_0)$ , dans le système de coordonnées  $(h_0, G / \frac{\Delta h}{h_0})$ , soit une droite d'équation :

$$G / \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{c}{t} h_0 + 1$$

où c est une constante, et ce pour toute valeur t du temps.

Nous avons représenté graphiquement la relation  $G / \frac{\Delta h}{h_0} = f(h_0)$  pour les valeurs de t suivantes :

$$t = 120 \text{ mn}, 180 \text{ mn}, 240 \text{ mn}, 300 \text{ mn}, 1500 \text{ mn}, 3000 \text{ mn}$$

pour les deux séries d'essais effectués sur l'Argile Plastique de Provins (Figure II.1.10. a et b).

a) RELATION  $G/\frac{\Delta h}{h_0} = f(h_0)$   
GONFLEMENT -1-

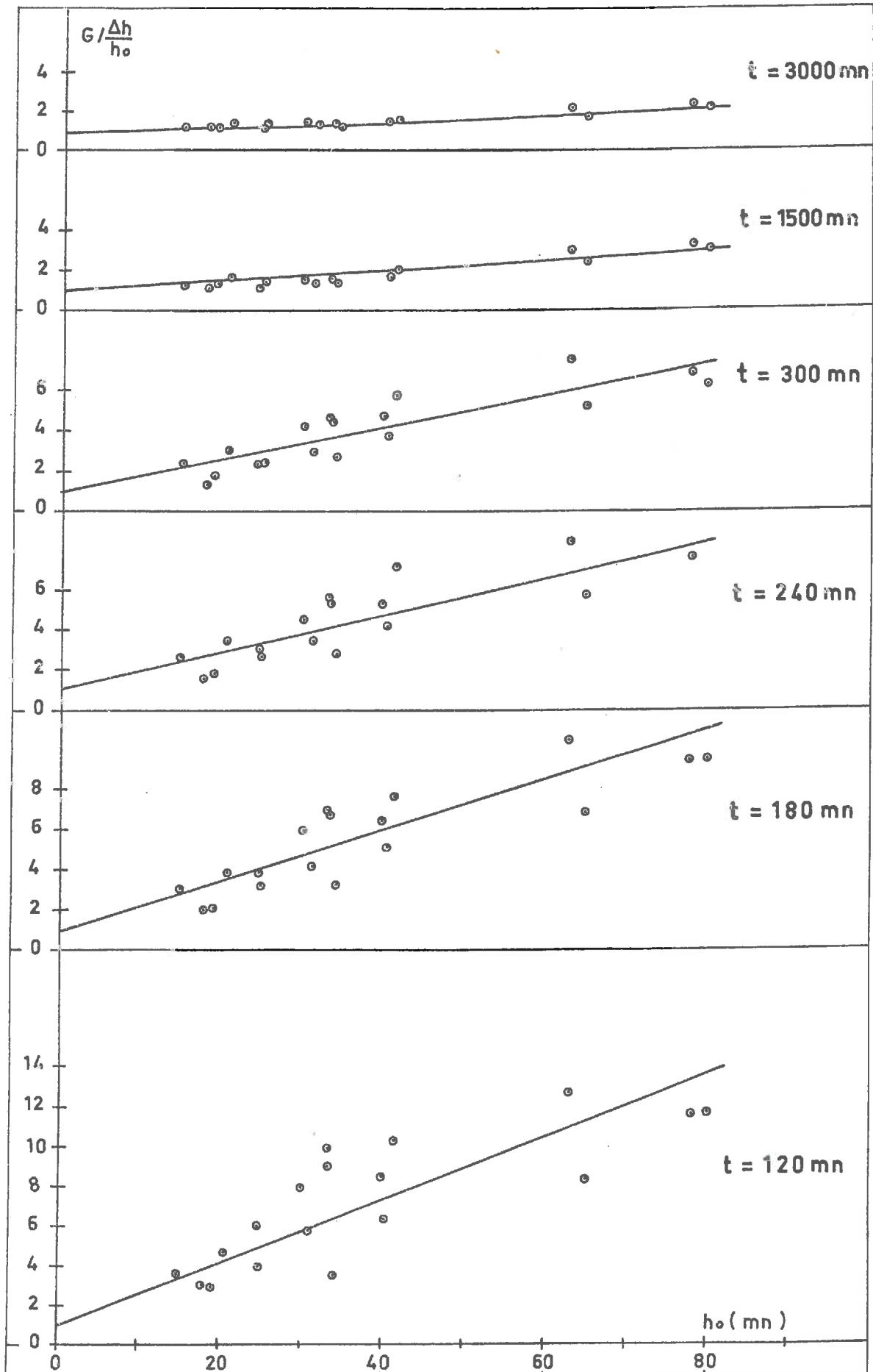


Fig.II.110.—Vérification de la relation  $B = Ch_0$  — Méthode Indirecte — Argile plastique de Provins.

b) RELATION  $G/\frac{\Delta h}{h_0} = f(h_0)$   
GONFLEMENT - 2 -

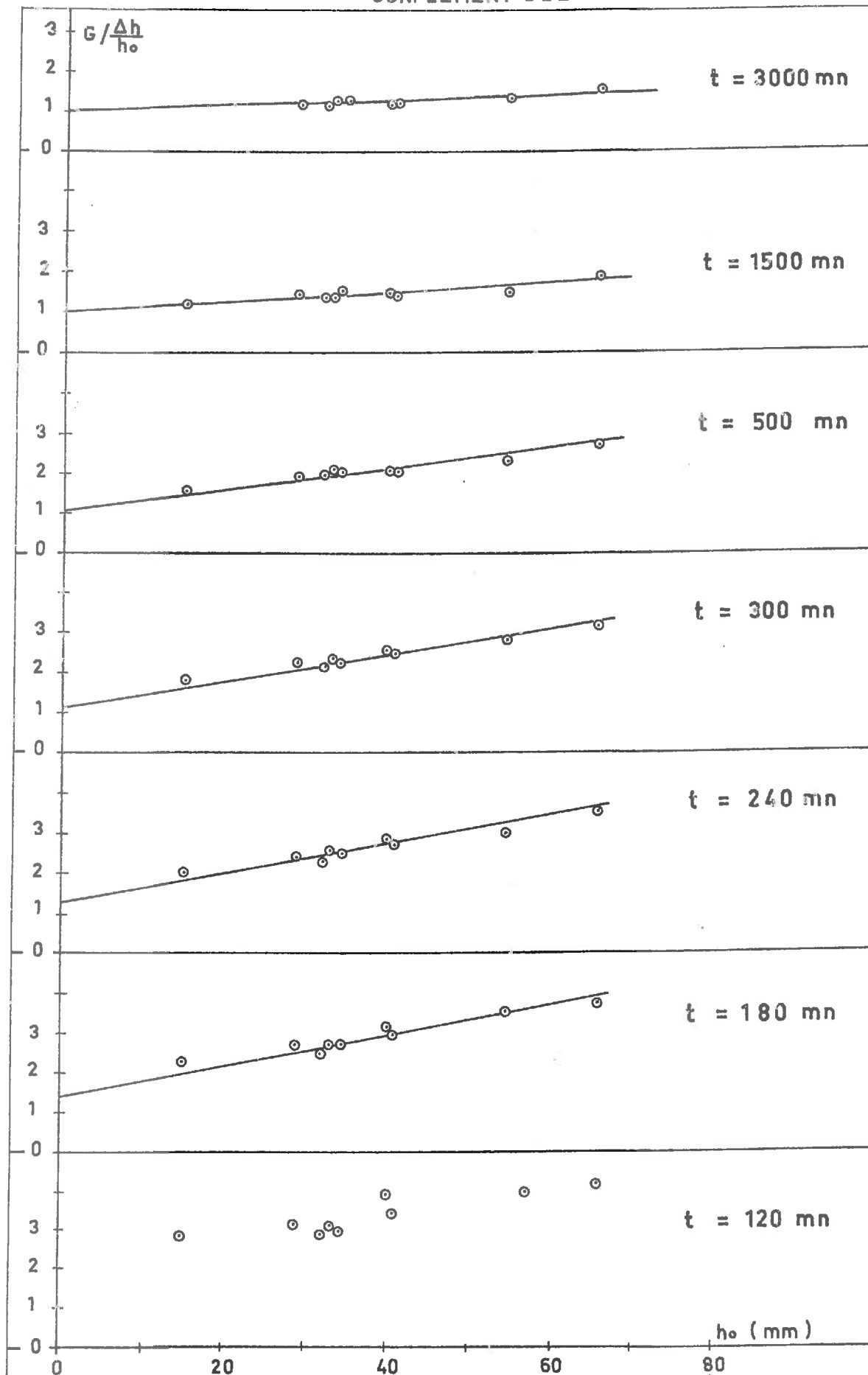


Fig.II.1.10. Vérification de la relation  $B = Ch_0$ . Méthode Indirecte - Argile plastique de Provins.



Chaque série d'essais permet d'obtenir aussi un ensemble de droites d'ordonnées à l'origine 1, confirmant la proportionnalité entre le temps de demi-gonflement B et l'épaisseur de l'échantillon  $h_0$ .

II.1.7.2. - Deuxième méthode indirecte : Influence de l'épaisseur de l'échantillon sur le gonflement absolu au temps t

Le taux de gonflement final  $(\frac{\Delta h}{h_0})_f$  variant d'un échantillon à l'autre, on ne peut comparer les gonflements absolus  $\Delta h$  des divers échantillons que si on les ramène à un taux de gonflement uniforme.

On s'intéresse donc à la relation  $\Delta h / (\frac{\Delta h}{h_0})_f = f(h_0)$  à un instant t fixé.

Nous avons représenté cette relation graphiquement, pour les deux séries d'essais sur l'Argile Plastique de Provins, et pour les valeurs du temps suivantes :

$t = 60 \text{ mn}, 120 \text{ mn}, 180 \text{ mn}, 240 \text{ mn}, 1500 \text{ mn}, 3000 \text{ mn}$

(voir Figure II.1.11. a et b)

Nous obtenons, pour chaque série d'essais, un réseau de courbes de pente initiale croissant avec le temps, et limité, quand le temps tend vers l'infini, par la première bissectrice des axes (Figure II.1.12.).

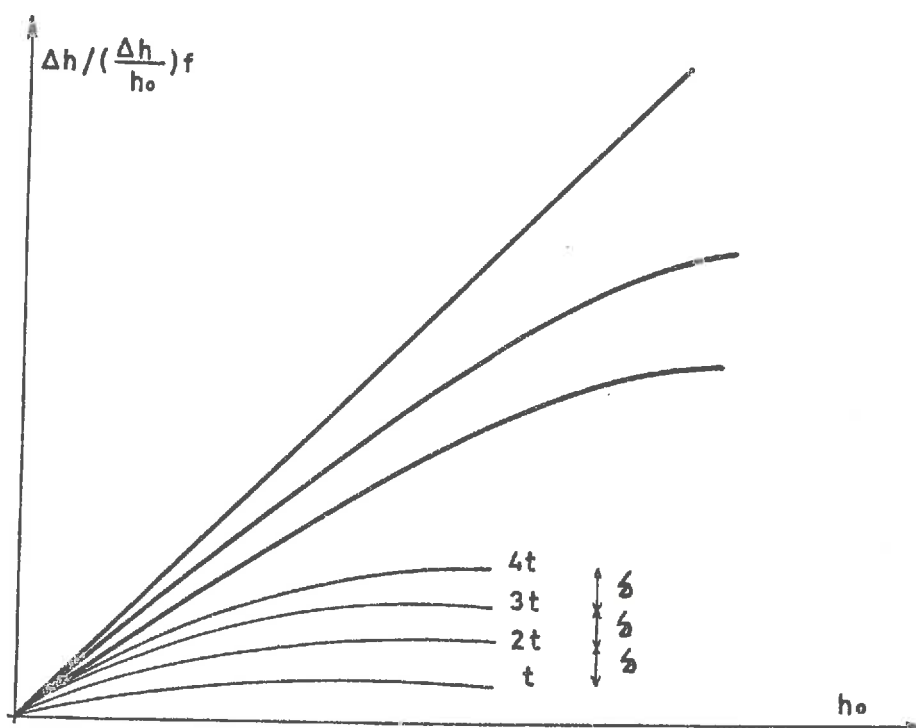
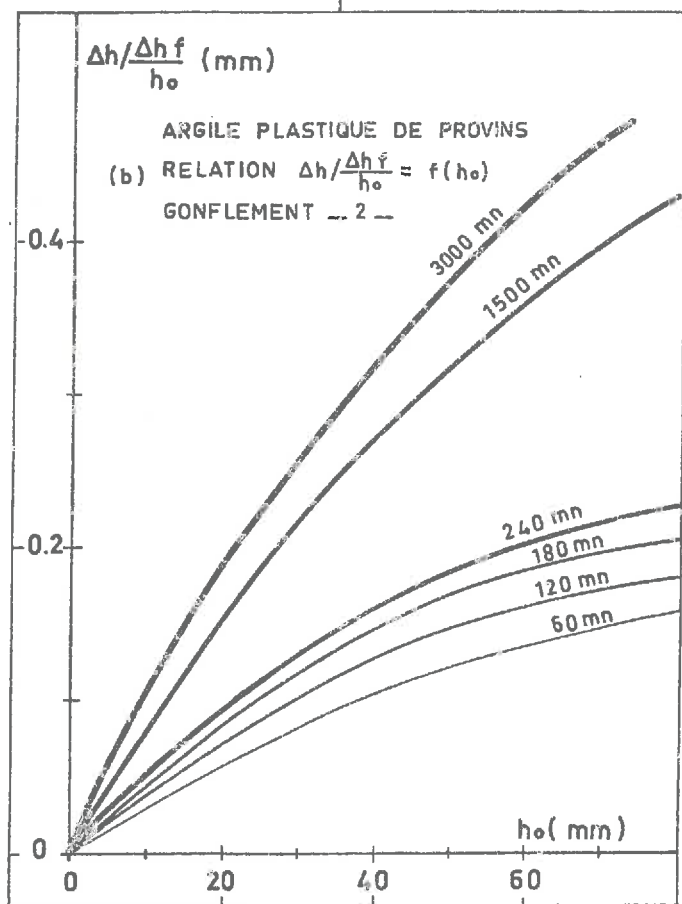
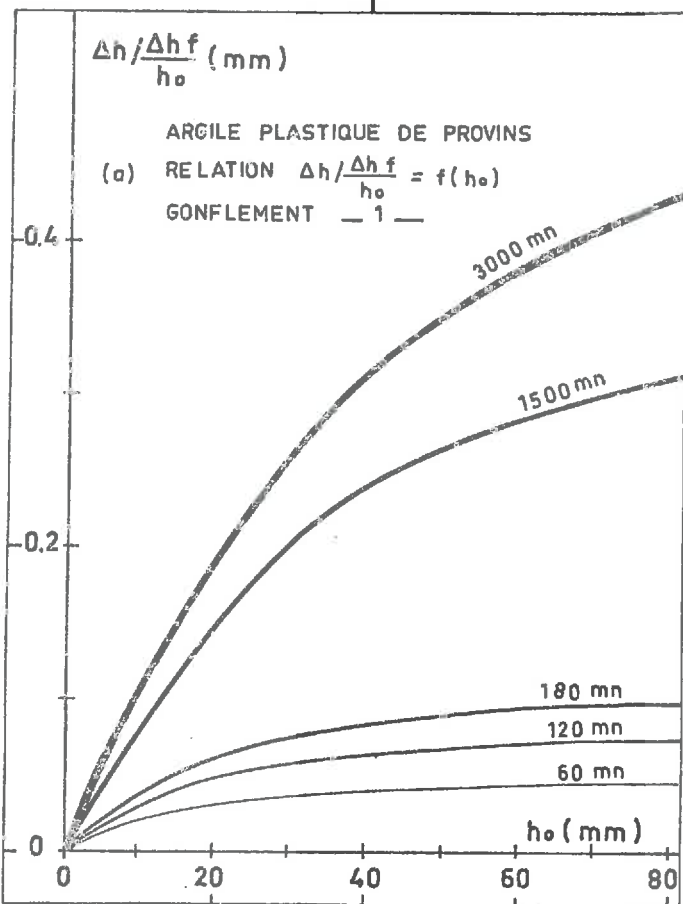


Figure II.1.2. - Schématisation de l'influence de l'épaisseur  $h_0$  sur le gonflement absolu au temps t

Fig II.112. Influence de l'épaisseur  $h_0$  sur le gonflement absolu au temps  $t$ 

Chaque courbe est elle-même une fonction croissante de l'épaisseur et tend vers une asymptote pour les fortes épaisseurs.

De plus, pour un intervalle de temps  $t$  fixé, les courbes obtenues pour  $t$ ,  $2t$ ,  $3t$ ... sont distantes d'un écart  $\delta$  constant quand on se place vers l'asymptote.

Ces courbes ont donc un profil hyperbolique général de la forme :

$$\frac{\Delta h}{(\frac{\Delta h}{ho})_f} = \frac{a h_o + b}{c h_o + d} \quad \text{où } a, b, c, d \text{ dépendent de } t$$

rappelons les conditions géométriques constatées et les conditions aux limites :

$$\text{quand : } h_o = 0 \quad \frac{\Delta h}{(\frac{\Delta h}{ho})_f} = 0 \quad \text{d'où} \quad \frac{\Delta h}{(\frac{\Delta h}{ho})_f} = \frac{h_o}{c h_o + d}$$

- pour un intervalle de temps  $t$  fixé les courbes sont distantes de  $\delta$  à l'asymptote d'où :

$$\frac{\Delta h}{(\frac{\Delta h}{ho})_f} = \frac{h_o \cdot t}{c h_o + d} \quad \text{où } c \text{ est constant et } d \text{ dépend de } t$$

- quand  $t$  tend vers l'infini la courbe est la première bissectrice des axes :

$$\frac{\Delta h}{(\frac{\Delta h}{ho})_f} = h_o$$

d'où

$$\frac{\Delta h}{(\frac{\Delta h}{ho})_f} = \frac{h_o \cdot t}{c h_o + t}$$

$$\text{ou encore} \quad \frac{\Delta h}{h_o} = (\frac{\Delta h}{ho})_f \cdot \frac{t}{c h_o + t} = G \cdot \frac{t}{B + t}$$

soit  $B = c h_o$

Nous vérifions ainsi indirectement que le temps de demi-gonflement est proportionnel à l'épaisseur de l'échantillon.

II.1.8. - Variation des valeurs numériques du coefficient C (avec  $C = \frac{B}{ho}$ )

Nous avons calculé les valeurs numériques du coefficient de proportionnalité C entre B et  $ho$  pour les divers sols étudiés (Tableau II.1.4.)

|                                    | C (s/m)     |
|------------------------------------|-------------|
| A.P. Provins sans consolidation    | $3,36.10^6$ |
| A.P. Provins avec consolidation    | $1,20.10^6$ |
| A.P. Bariolée avec consolidation   | $0,42.10^6$ |
| Fausses Glaises avec consolidation | $2,10.10^6$ |
| Argile d'Aix avec consolidation    | $0,42.10^6$ |
| A.V. Montreuil avec consolidation  | $3,84.10^6$ |

Tableau II.1.4. - Pente de la droite  $B = cho$

On remarque tout d'abord que les valeurs de C sont très diverses selon les sols considérés. Il est clair que la nature minéralogique et granulométrique des sols doit avoir une influence considérable sur C.

De plus pour un même sol, l'Argile Plastique de Provins, C à des valeurs différentes pour des états de contraintes initiales différentes :  $C = 3,36.10^6$  s/m pour un gonflement à partir d'un état normalement consolidé sous  $1,3.10^5$  Pa. Or il faut savoir que si  $1,3.10^5$  Pa représente le poids des terres in situ sus-jacentes aux échantillons prélevés, la contrainte effective appliquée aux grains du sol à l'état naturel est supérieure à  $1,3.10^5$  Pa (phénomène de surconsolidation), en raison d'un déchargement d'une quinzaine de m. d'épaisseur de matériau (soit environ  $3.10^5$  Pa) effectué plusieurs années auparavant. Par conséquent, à l'état naturel, la contrainte initiale appliquée aux grains est différente (et supérieure) de la contrainte de consolidation imposée à la deuxième série d'essais de gonflement.

Ceci nous permet de supposer que le coefficient C, donc le temps de demi-gonflement, doit dépendre également des états de contraintes appliqués au sol.

### II.1.9. - Conclusions

Nous avons vérifié que le taux de gonflement unidimensionnel  $\frac{\Delta h}{h_0}$  d'une couche argileuse d'épaisseur  $h_0$  suit une loi hyperbolique en fonction du temps de la forme :

$$\frac{\Delta h}{h_0} = G \frac{t}{B + t}$$

G, taux de gonflement final, et B, temps de demi-gonflement, sont déterminés graphiquement à partir des caractéristiques géométriques de la droite

$$t / \frac{\Delta h}{h_0} = \frac{1}{G} t + \frac{B}{G}$$

De plus le temps de demi-gonflement B est proportionnel à l'épaisseur  $h_0$  de la courbe considérée:  $B = Ch_0$ .

Il est donc possible de prédire le gonflement d'une couche argileuse à partir d'essais assez courts (3 à 4 jours) sur des échantillons d'épaisseur assez faible. Généralement l'épaisseur minimale représentative est de l'ordre de 2 à 3 cm, mais parfois elle peut être un peu supérieure (nous avons vu que pour les Fausses Glaises cette épaisseur minimale est d'environ 5 cm).

Le coefficient de proportionnalité C, et donc le temps de demi-gonflement B, est certes fonction de la nature du sol étudié, mais pour un même sol il varie avec les contraintes initiales et finales appliquées au sol. Il en est certainement de même du taux de gonflement G. C'est ce que nous nous proposons d'étudier dans la troisième partie de cette étude macroscopique (Paragraphe II.3.).

Enfin, si nous pouvons maintenant estimer le gonflement d'ensemble d'une couche argileuse, il est de première importance d'étudier la progression du phénomène à l'intérieur de la couche. Ce point fait l'objet du prochain paragraphe (II.2.).

## II.2. - PROPAGATION DU GONFLEMENT A L'INTERIEUR D'UNE COUCHE ARGILEUSE

### II.2.1. - But de l'étude et revue bibliographique

Nous avons étudié précédemment le comportement d'une couche argileuse dans son ensemble, en essayant de dégager les principaux paramètres caractéristiques du gonflement, taux de gonflement maximum G et temps de demi-gonflement B.

Nous allons maintenant nous intéresser à la propagation de l'eau à l'intérieur d'une carotte argileuse en fonction du temps.

Peu d'auteurs se sont posés le problème de la propagation de l'eau et/ou du gonflement à l'intérieur d'une couche argileuse, et en tout cas, à notre connaissance, personne en ce qui concerne les sols saturés.

WONG et YONG (1973), à partir d'échantillons remaniés et non saturés, ont montré qu'il existe une relation entre la propagation du front d'eau et la racine carrée du temps, propagation plus rapide dans le cas d'un échantillon confiné (pouvant gonfler), que dans le cas d'un échantillon non confiné (sans possibilité de variation de volume). Mais leurs résultats sont compliqués par le fait qu'ils se trouvent en présence de deux phénomènes de gonflement superposés, gonflement interfoliaire et gonflement interparticulaire, en raison de la nature minéralogique de leurs sols (montmorillonite et chlorite gonflante).

Reprenant les résultats de WONG et YONG dans le cas d'un sol confiné, UZAN (1976) montre que la propagation du front d'eau dans une colonne de sol confiné entraîne la propagation d'une zone plus humide que l'ensemble de la carotte au voisinage du front d'eau, accompagnée d'une compression du reste de la colonne.

### II.2.2. - Mode opératoire

La difficulté d'un tel essai consiste à pouvoir diviser l'échantillon de sol en "tranches" de façon à visualiser la progression de l'eau, tout en le remaniant le moins possible.

La solution consistant à placer des repères électromagnétiques à l'intérieur de l'échantillon a été écartée en raison de l'environnement électromagnétique

perturbateur inhérent à tout laboratoire de mécanique des sols.

Nous avons donc préféré la solution optique, à savoir repérer visuellement différents niveaux dans la carotte à l'aide d'un lecteur optique de type cathétomètre BOUTY n° 70010.2.

Pour ce faire il était nécessaire d'une part que le moule à échantillons soit transparent, d'autre part que l'échantillon lui-même soit assorti de repères visuels se déplaçant avec lui pendant les mouvements dus au gonflement.

Le problème de la transparence a été résolu par l'utilisation de moules cylindriques en plexiglass placés sur des embases métalliques de type oedométrique.

Quant à la réalisation de repères visuels dans l'échantillon, nous avons dû choisir entre deux possibilités. La première, consistant à découper véritablement l'échantillon en tranches et à interposer entre chaque tranche un niveau visible, papier-filtre ou couche argileuse de couleur différente, a été écartée en raison de la trop grande perturbation apportée au sol étudié et des possibilités de comportement différent au niveau des "joints" (accumulation d'eau, perméabilité différente...). La solution retenue a été d'introduire dans l'échantillon, et sur tout son rayon, des aiguilles rigides à tête de couleur (Figure II.2.1.).

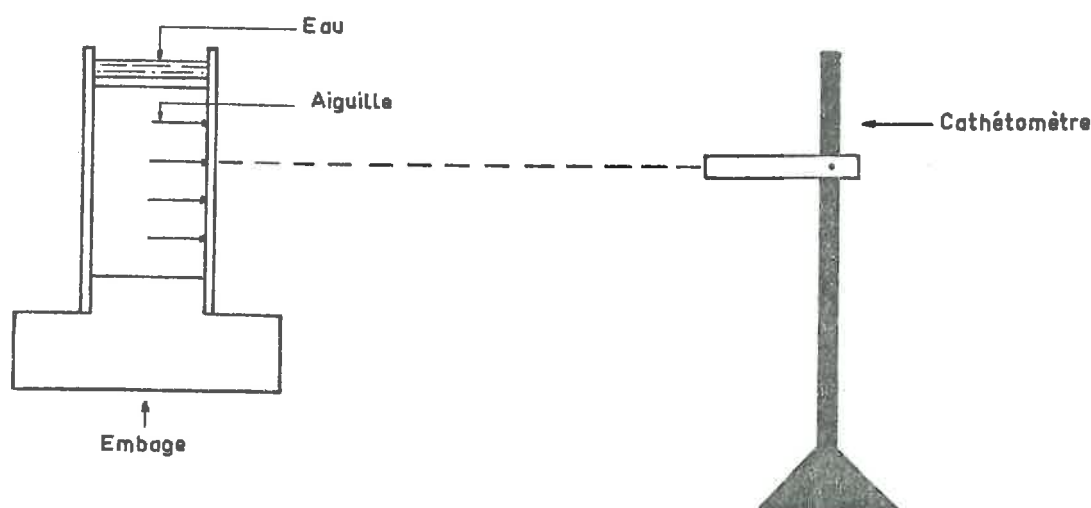


Figure II.2.1. - Schéma de l'appareillage utilisé pour l'étude de la propagation du gonflement

Chaque tranche comprise entre deux aiguilles représente un élément unitaire.

Les aiguilles ont été introduites rigoureusement perpendiculairement à l'axe de l'échantillon à l'aide d'un dispositif spécial (Figure II.2.2.).

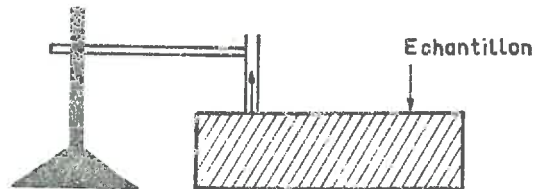


Figure II.2.2. - Schéma de l'introduction des aiguilles dans la carotte

L'intérêt d'aller jusqu'au coeur de l'échantillon réside dans la volonté de minimiser les éventuelles différences de déformation entre le bord et le coeur de la carotte. Il faut enfin ajouter que les carottes cylindriques ont été soigneusement taillées à l'aide d'un tour WYKHAM, procédé assez long mais apportant le minimum de perturbation à l'échantillon y compris à ses bords.

### II.2.3. - Essais effectués - Matériaux utilisés

Nous avons testé 4 sols différents à l'aide de ce dispositif :

- . l'Argile Plastique de Provins à kaolinite
- . les Fausses Glaises à kaolinite et interstratifié illite-smectite
- . l'Argile Verte de Montreuil à illite, interstratifié illite-smectite et calcite
- . la Marne Bleue de Nogent à illite, interstratifié illite-smectite et calcite

Les échantillons, une fois préparés et placés dans le moule, ont été remis au poids des terres in situ pendant deux jours, puis déchargés et mis à gonfler librement avec une alimentation en eau par la face supérieure seulement. En effet pour pouvoir visualiser la progression du phénomène dans la carotte il est nécessaire que le gonflement ne se développe qu'à partir d'une seule extrémité. Bien évidemment ce fait a augmenté considérablement la durée des essais, d'autant plus que les épaisseurs de carottes étudiées étaient assez importantes (entre 50 et 150 mm).



C'est pourquoi nous n'avons pu multiplier le nombre des essais. De plus la face d'alimentation choisie a été, malgré l'influence de la gravité, la face supérieure, en raison du phénomène de piégeage de bulles d'air plus facile à éviter de cette manière qu'à partir de la face inférieure emprisonnée dans le moule. Quoiqu'il en soit on peut considérer que l'influence de la gravité est négligeable devant l'influence de la succion du sol, pour la propagation de l'eau dans le sol.

A partir du temps initial  $t = 0$  de début de gonflement libre, les échantillons sont examinés à des dates connues et les mouvements des aiguilles repérés à l'aide du cathétomètre. L'erreur absolue de lecture est d'environ 5/100 mm, ce qui est faible par rapport au gonflement total moyen d'un échantillon, entre 5 et 10 mm, mais ce qui peut être parfois plus important par rapport au gonflement moyen d'une tranche, entre 0,5 et 3 mm. Le déplacement vertical d'une aiguille représente évidemment le gonflement de tout le volume de sol qui lui est inférieur. La différence de déplacement entre 2 aiguilles représente le gonflement de la tranche de sol comprise entre ces deux aiguilles. Enfin on postulera que dès que le front d'eau atteint le sommet d'une tranche celle-ci se met à gonfler, ce qui est très près de la vérité puisqu'on a remarqué lors des essais de gonflement effectués précédemment que le gonflement démarre soit dès l'introduction de l'eau, soit au plus tard quelques minutes après. Ce fait nous permettra de visualiser la progression du front d'eau dans la couche, puisque dès qu'une aiguille commencera à se déplacer verticalement, c'est que le front d'eau aura atteint sa cote.

10 essais ont été effectués sur des carottes d'épaisseur variables comprises entre 60 et 150 mm :

- . 1 essai sur l'Argile Plastique de Provins
- . 3 essais sur les Fausses Glaises
- . 4 essais sur l'Argile Verte de Montreuil
- . 2 essais sur la Marne Bleue de Nogent

La liste exhaustive des points de mesure expérimentaux est portée en Annexe II.2.

#### II.2.4. - Modélisations des divers sous-échantillons constitutifs d'un même échantillon

Etant donné un échantillon de sol divisé en  $n-1$  tranches par l'intermédiaire de  $n$  niveaux repères et alimenté en eau par la face supérieure, trois types de modélisations en sous-échantillons sont possibles et seront utilisés pour l'interprétation des essais (Figure II.2.3.).

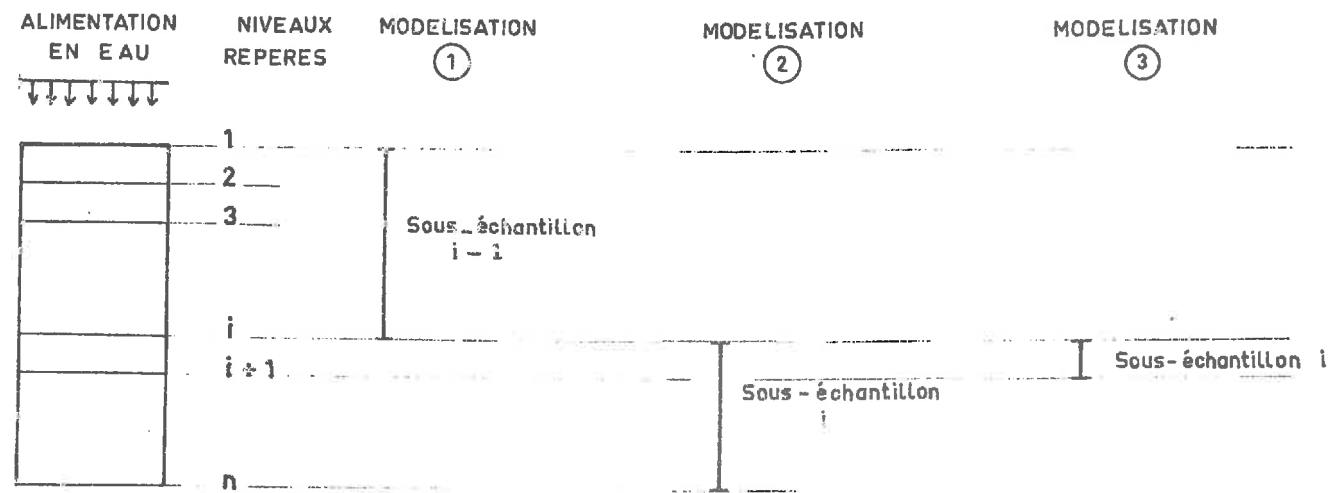


Figure n° II.2.3. - Modélisations d'un échantillon en sous-échantillons

- . Modélisation 1 par gonflements cumulés à partir de la face supérieure  
Soit le niveau repère numéro  $i$ , le volume de sol situé au-dessus constitue le sous-échantillon numéro  $i-1$ , l'échantillon complet étant appelé sous-échantillon  $n-1$ . Les valeurs du gonflement du sous-échantillon  $i-1$  sont obtenues en retranchant le déplacement  $\delta_i$  du niveau repère  $i$  au déplacement  $\delta_1$  du niveau repère 1. Nous sommes alors en présence de  $n-1$  sous-échantillons d'épaisseur variable, commençant leur gonflement au même instant initial, et dont il est possible d'étudier la cinétique comparativement.
- . Modélisation 2 par gonflements cumulés à partir de la face inférieure sèche  
Soit le niveau repère numéro  $i$ , le volume de sol situé au-dessous constitue le sous-échantillon numéro  $i$ , l'échantillon complet étant le sous-échantillon numéro 1. Les valeurs du gonflement du sous-échantillon  $i$  sont obtenues directement par le déplacement  $\delta_i$  du niveau repère  $i$ .

Nous avons dans ce cas une indétermination sur le temps initial de gonflement de chaque sous-échantillon (sauf pour le sous-échantillon 1) qui nous empêche d'étudier précisément la cinétique de chaque sous-échantillon (car cette étude nécessite la détermination très exacte du temps initial de gonflement), mais qui n'empêche pas d'étudier la propagation du front d'eau à l'intérieur de la couche.

- . Modélisation 3 par tranches  
Soit les niveaux repères numéro  $i$  et  $i+1$ , le volume de sol situé entre les deux constitue le sous-échantillon numéro  $i$ . Le gonflement du sous-échantillon numéro  $i$  est obtenu en retranchant le déplacement  $\delta_{i+1}$  du niveau repère  $i+1$  au déplacement  $\delta_i$  du niveau repère  $i$ . Cette modélisation permet d'étudier la répartition des pourcentages de gonflement et des teneurs en eau en fin d'essai, bien que l'erreur relative de mesure commise puisse être plus importante que pour les autres modélisations en raison de la faible épaisseur des tranches.

II.2.5. - Comparaison entre les pourcentages de gonflement mesurés à l'aide des repères visuels et les teneurs en eau

Avant d'entrer plus avant dans l'interprétation des essais, il est bon, en raison de la spécificité de l'appareillage de mesure utilisé, de vérifier la concordance entre les gonflements mesurés et les gonflements "réels".

La seule possibilité que nous ayons d'approcher le gonflement réel d'une tranche est la mesure de la teneur en eau en fin d'essai. Bien entendu il faut savoir que les mesures de teneur en eau sont elles aussi entachées d'erreur, et que les variations possibles de teneur en eau à l'intérieur d'un même petit volume de sol font qu'un très faible défaut de représentativité du volume testé peut entraîner une dispersion plus grande entre gonflement mesuré et teneur en eau.

Comme nous l'avons déjà indiqué, dans le cas d'un gonflement unidimensionnel il existe une relation linéaire entre le pourcentage de gonflement et la teneur en eau :

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{W - W_0}{W_0 + \frac{\gamma W}{\gamma_s}}$$

$W_0$  : teneur en eau initiale (correspondant à un gonflement nul)  
 $\gamma_s$  : poids spécifique des grains du sol  
 $\gamma W$  : poids spécifique de l'eau

Pour chaque essai effectué, le gonflement d'une tranche est obtenu (modélisation 3) en retranchant le déplacement du niveau repère inférieur au déplacement du niveau repère supérieur, et en divisant cette différence par l'épaisseur de la tranche considérée.

Nous avons porté (Figure II.2.4. a à d) les pourcentages de gonflement mesurés optiquement des différentes tranches des divers essais en fonction de leur teneur en eau mesurée en fin d'essai, et ce pour chaque type de sol. Nous notons une relation linéaire entre le gonflement et la teneur en eau pour les 4 sols étudiés.

De plus les teneurs en eau déterminées graphiquement à partir des relations obtenues pour un gonflement nul sont très voisines des teneurs en eau initiales mesurées (Tableau II.2.1 .).

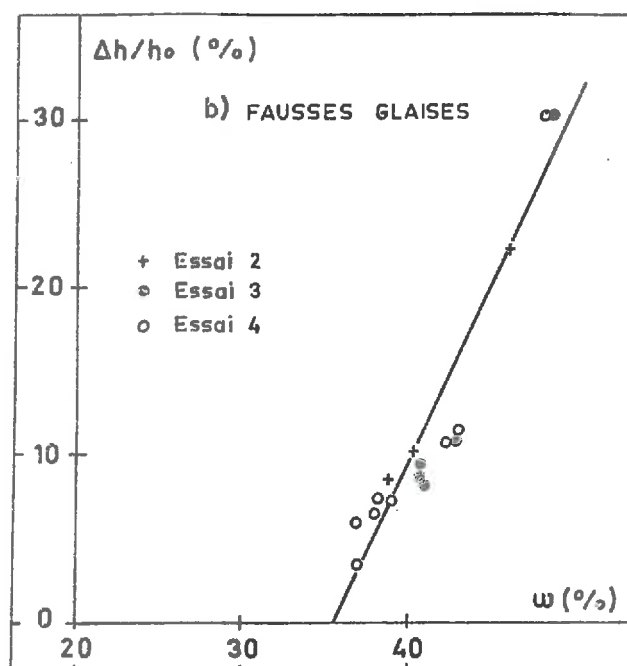
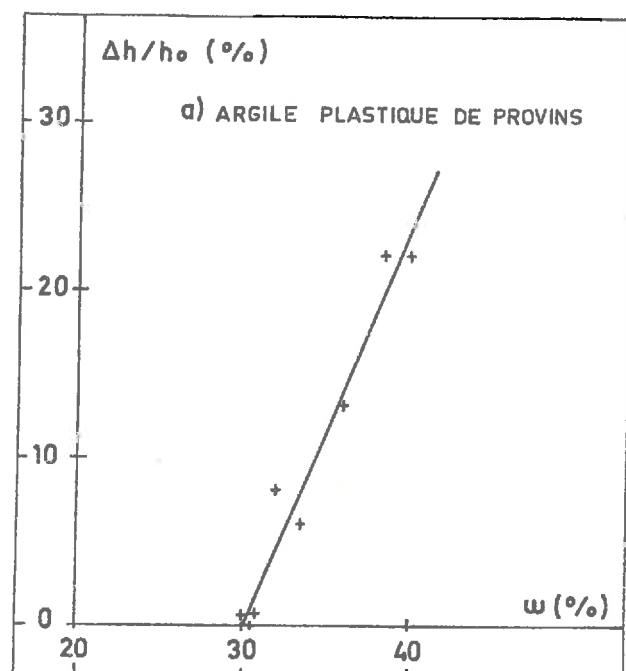
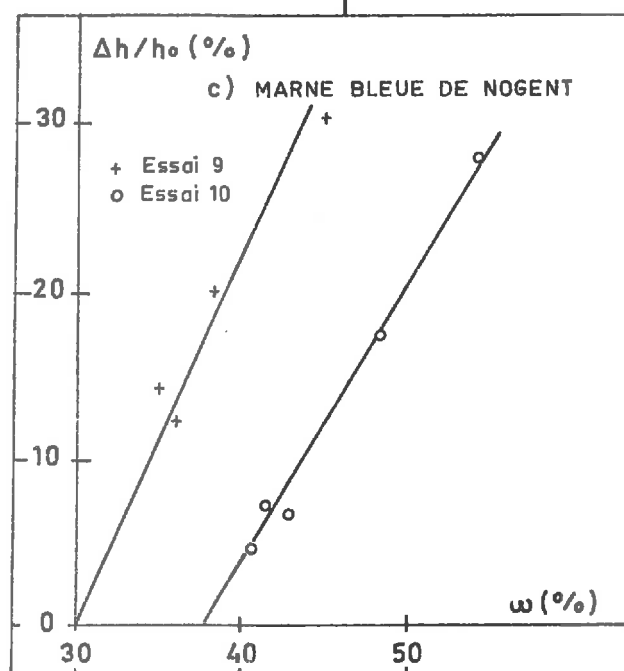
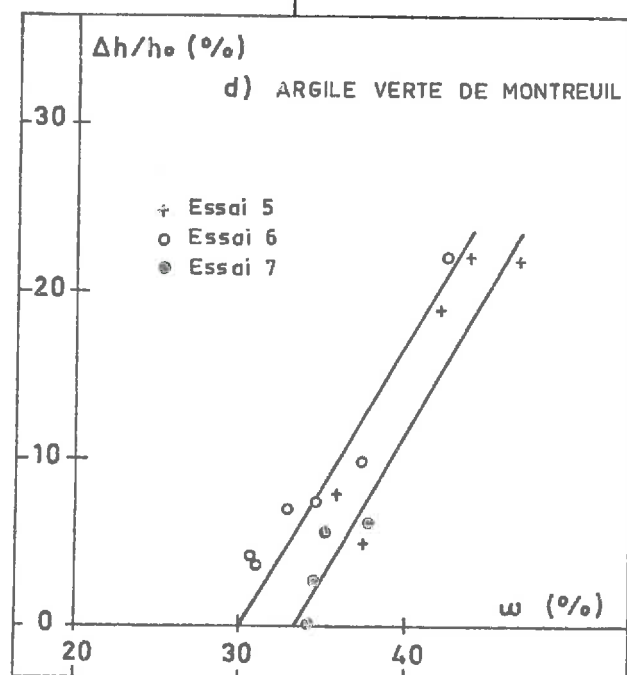


Fig.II.2.4. — Comparaison entre la teneur en eau des tranches et leur taux de gonflement observé.



| Teneur en eau \ Sol                          | Argile Plastique de Provins | Argile Plastique Grise | Marne Bleue Nogent es.9 | Marne Bleue de Nogent Essai 10 | Argile Verte d Montreuil |
|----------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------|
| Wo initiale %                                | 29                          | 35                     | 36                      | 31                             | 33                       |
| W déterminée pour $\frac{\Delta h}{h_0} = 0$ | 30                          | 36                     | 38                      | 30                             | 32                       |

Tableau II.2.1. - Comparaison entre teneur en eau initiale mesurée et teneur en eau déterminée graphiquement par un taux de gonflement nul

Au sujet du Tableau II.2.1. précédent il est intéressant de remarquer que les deux essais effectués sur la Marne Bleue de Nogent présentaient des teneurs en eau initiales différentes alors que les deux échantillons ont été prélevés dans la même carotte à 15 cm de distance. Nous vérifions ainsi l'hétérogénéité possible de la distribution de la teneur en eau à l'intérieur d'un même échantillon de sol.

Les considérations précédentes (linéarité de la relation pourcentage de gonflement-teneur en eau, voisinage entre la teneur en eau initiale et la teneur en eau déterminée graphiquement pour un pourcentage de gonflement nul) nous permettent de conclure à la validité des mesures de gonflement effectuées avec la méthode décrite précédemment.

II.2.6. - Cinétique du gonflement des sous-échantillons constitutifs d'un même échantillon : Modélisation 1 par gonflements cumulés à partir de la face supérieure

Soit un échantillon divisé en  $n-1$  sous-échantillons par la modélisation 1 (Figure II.2.5.), il est possible d'étudier l'évolution en fonction du temps de chaque sous-échantillon, et de comparer les résultats obtenus.

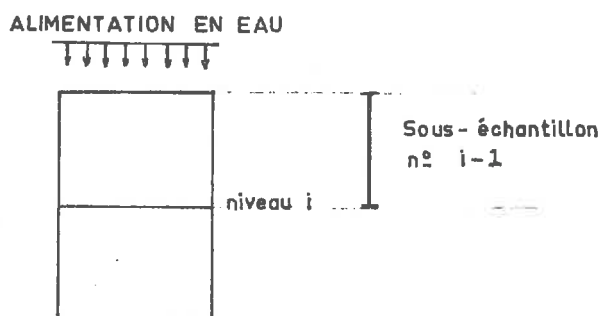


Figure II.2.5. - Modélisation 1

Nous avons représenté les courbes  $\Delta h = f(\log t)$  et  $t/\frac{\Delta h}{h_0} = f(t)$  pour chaque sous-échantillon de chaque essai sur les figures II.2.6. a à j et II.2.7.a à j. Chaque sous échantillon présente une courbe  $\Delta h = f(\log t)$  en "J" typique du gonflement d'un échantillon complet, et la représentation  $t/\frac{\Delta h}{h_0} = f(t)$  est une droite caractéristique d'un gonflement hyperbolique en fonction du temps de la forme :

$$\frac{\Delta h}{h_0} = G \frac{t}{B + t}$$

Nous pouvons donc d'ores et déjà affirmer que la cinétique du gonflement d'un sous-échantillon est globalement analogue à celle d'un échantillon complet.

Nous avons en plus déterminé graphiquement le temps de demi-gonflement B de chaque sous-échantillon (Tableau II.2.2.), et étudié la relation entre B et l'épaisseur  $h_0$  de chaque sous-échantillon (Figure II.2.8. a à d) pour chaque type de sol.

Fig.I.2.6. — Gonflement des sous-échantillons constitutifs d'un même échantillon.

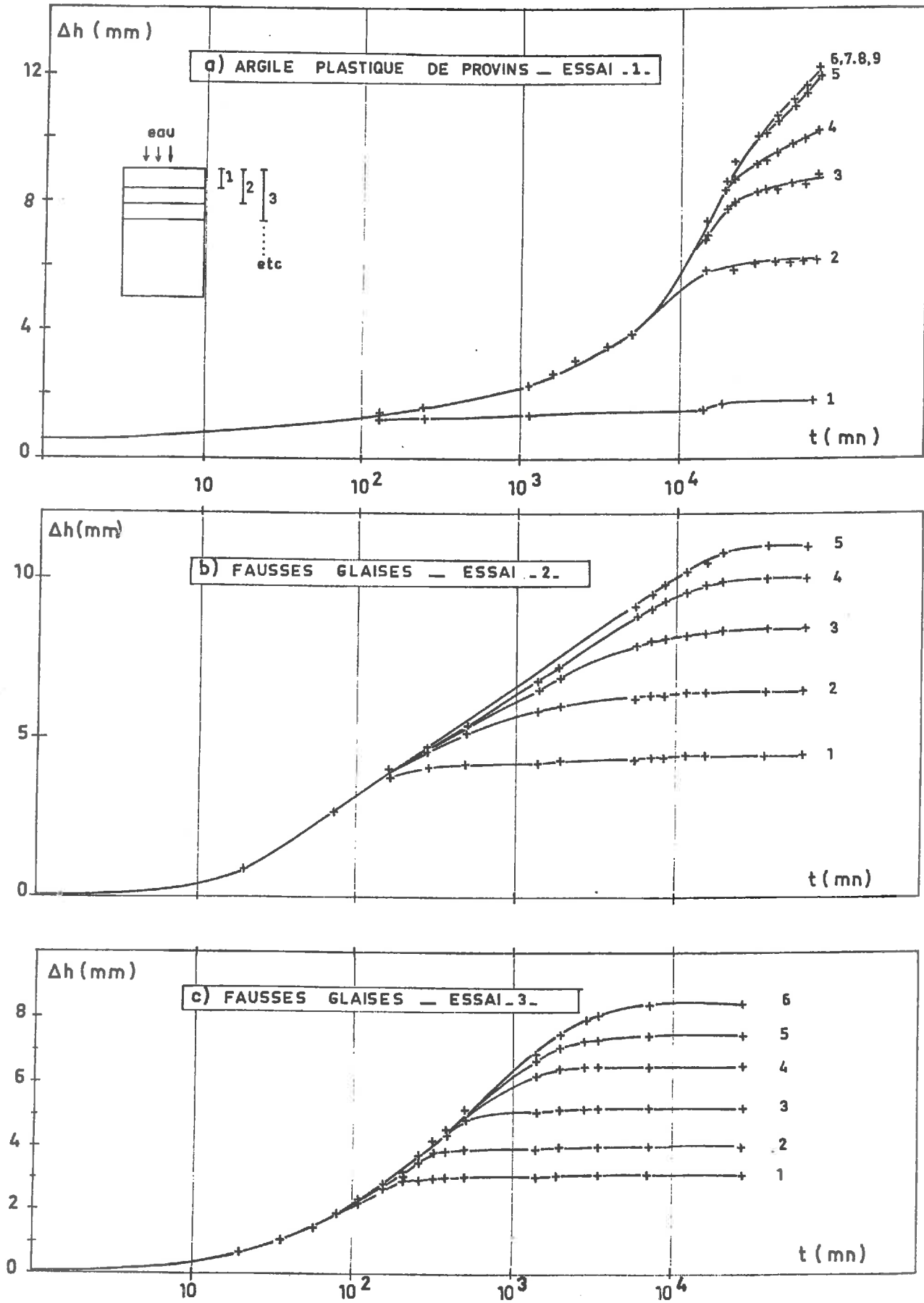


Fig.II.2.6. — Gonflement des sous-échantillons constitutifs d'un même échantillon.

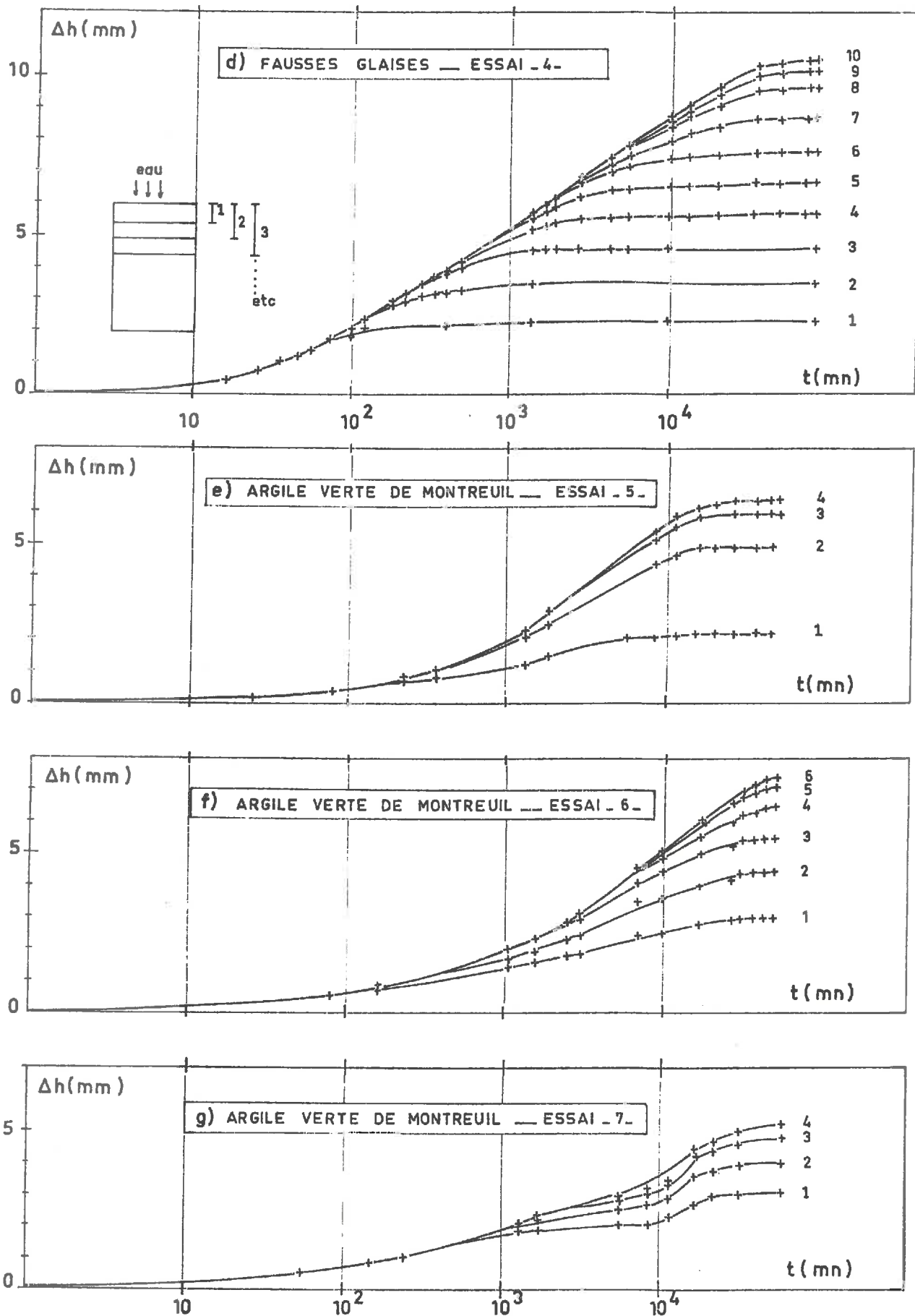
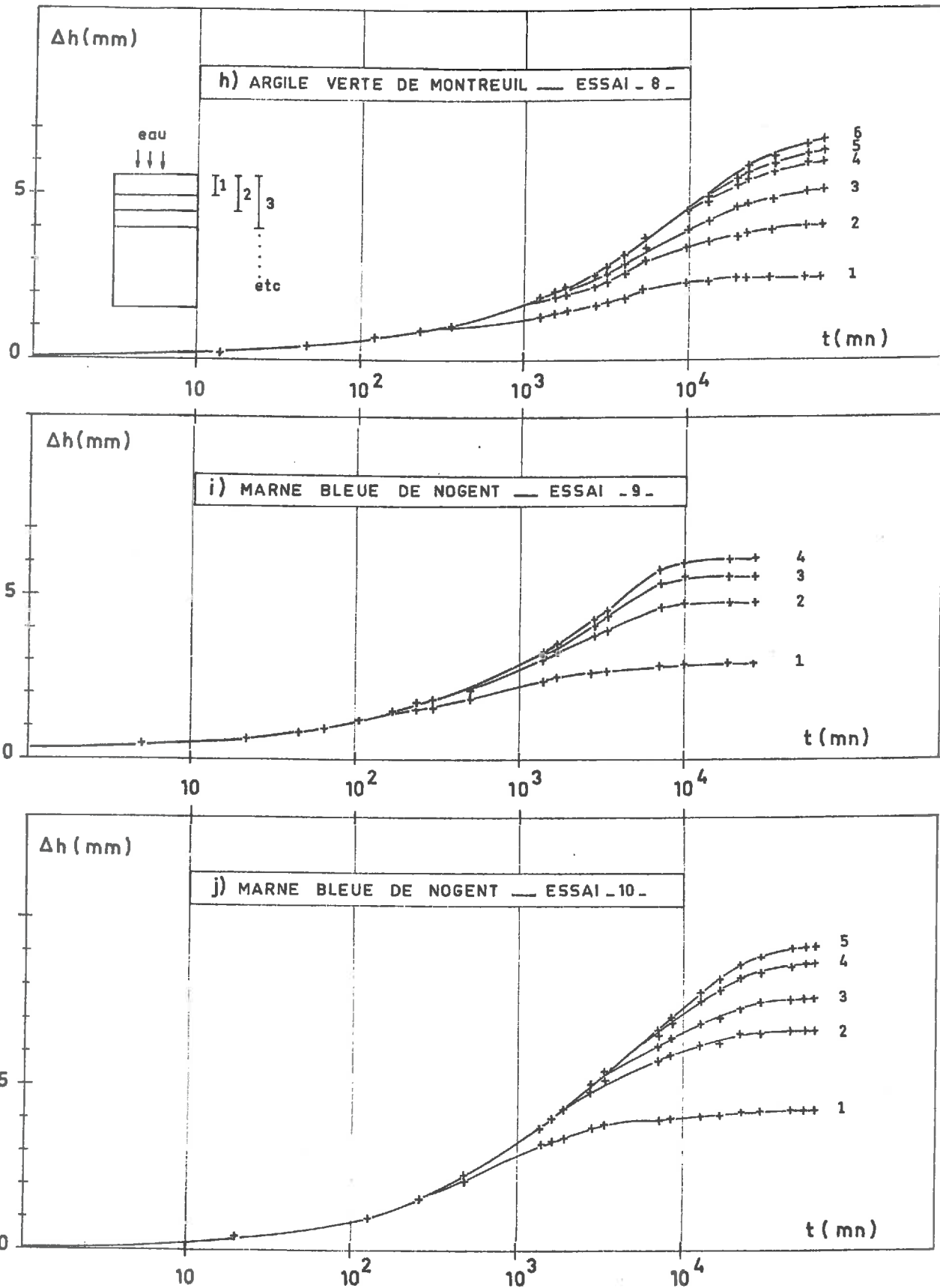




Fig. II.2.6. — Gonflement des sous-échantillons constitutifs d'un même échantillon .



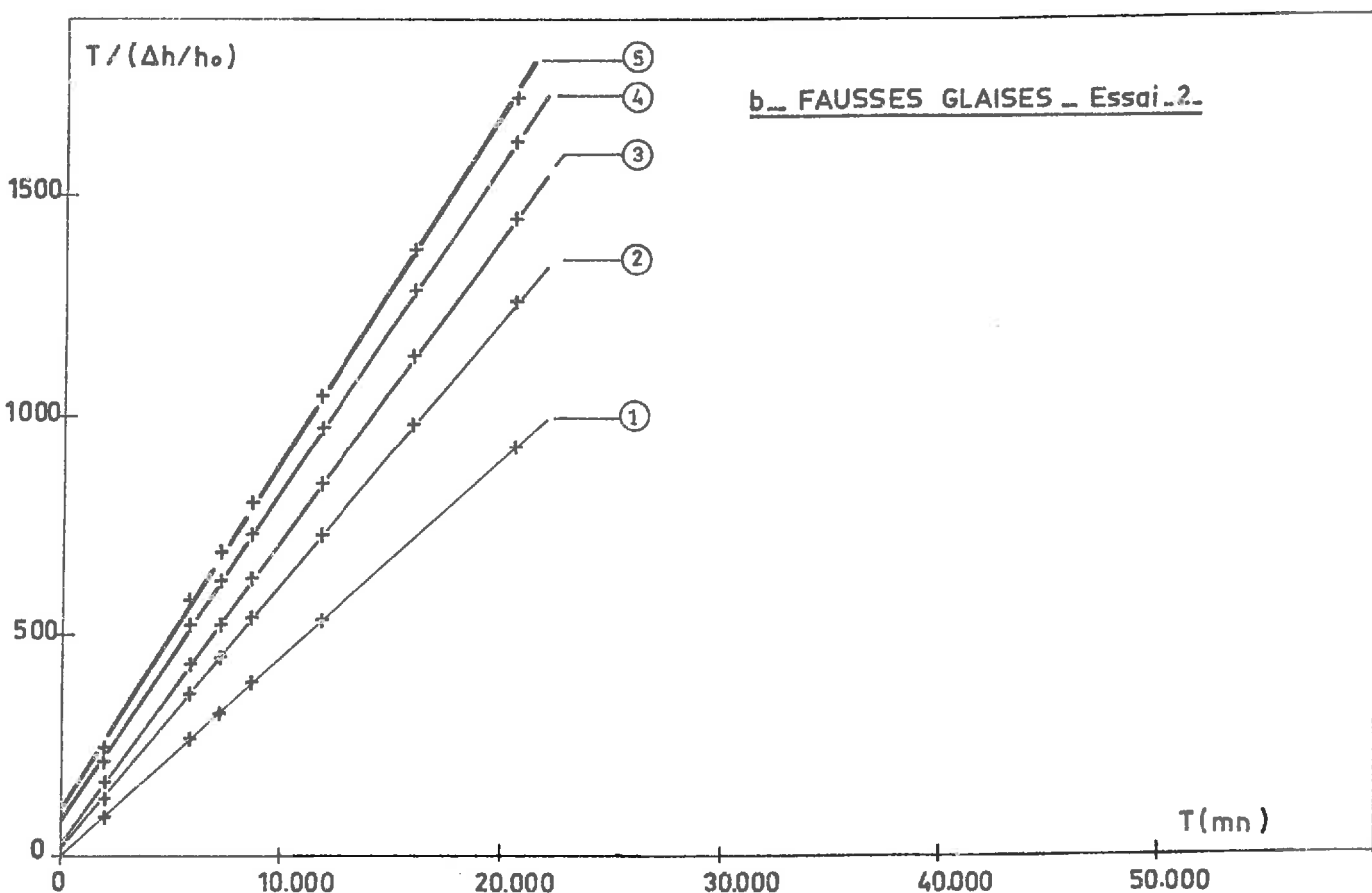
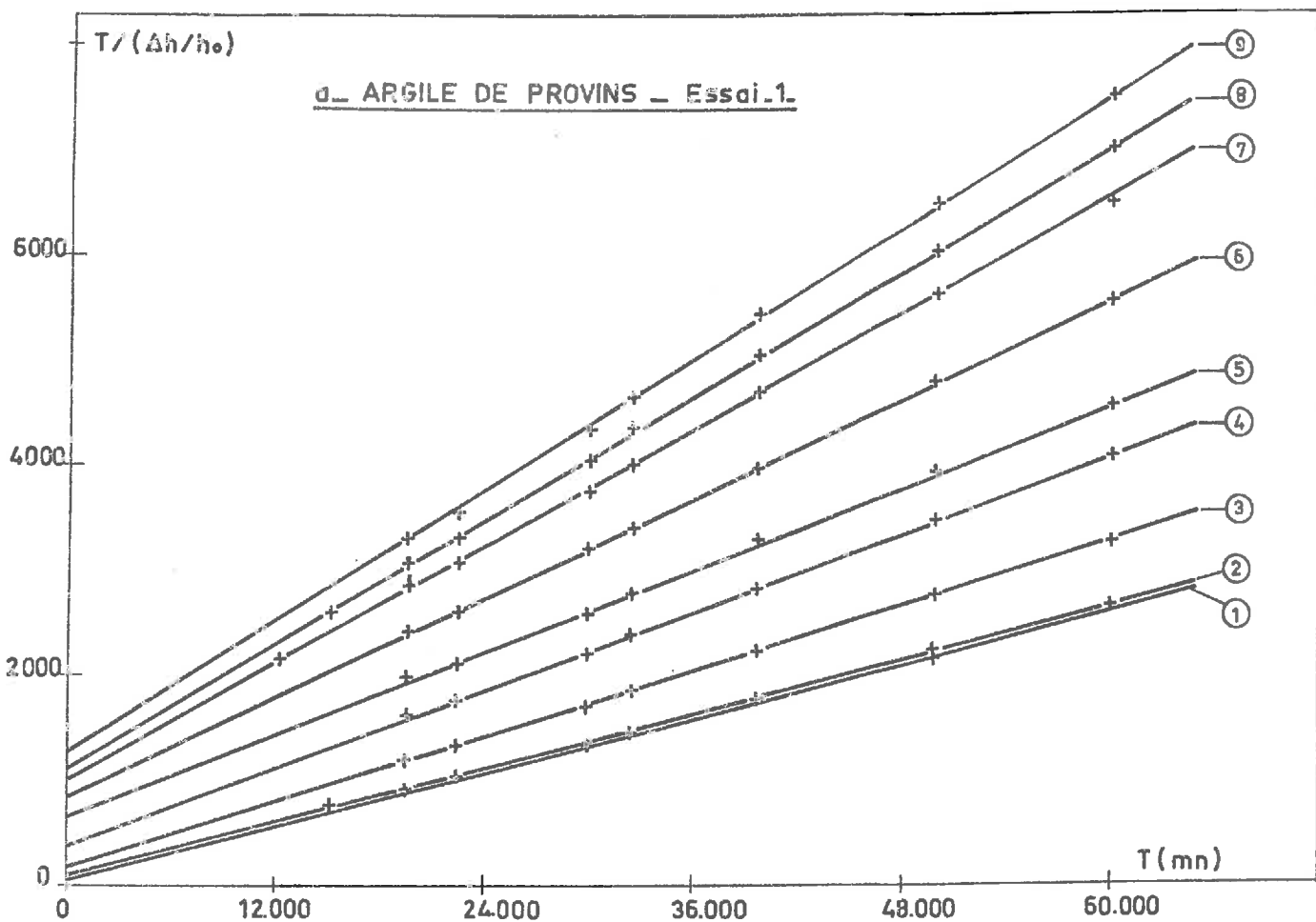


Fig.II.2.7 — Propagation du gonflement — Relation  $T / (\Delta h / h_0) = f(T)$

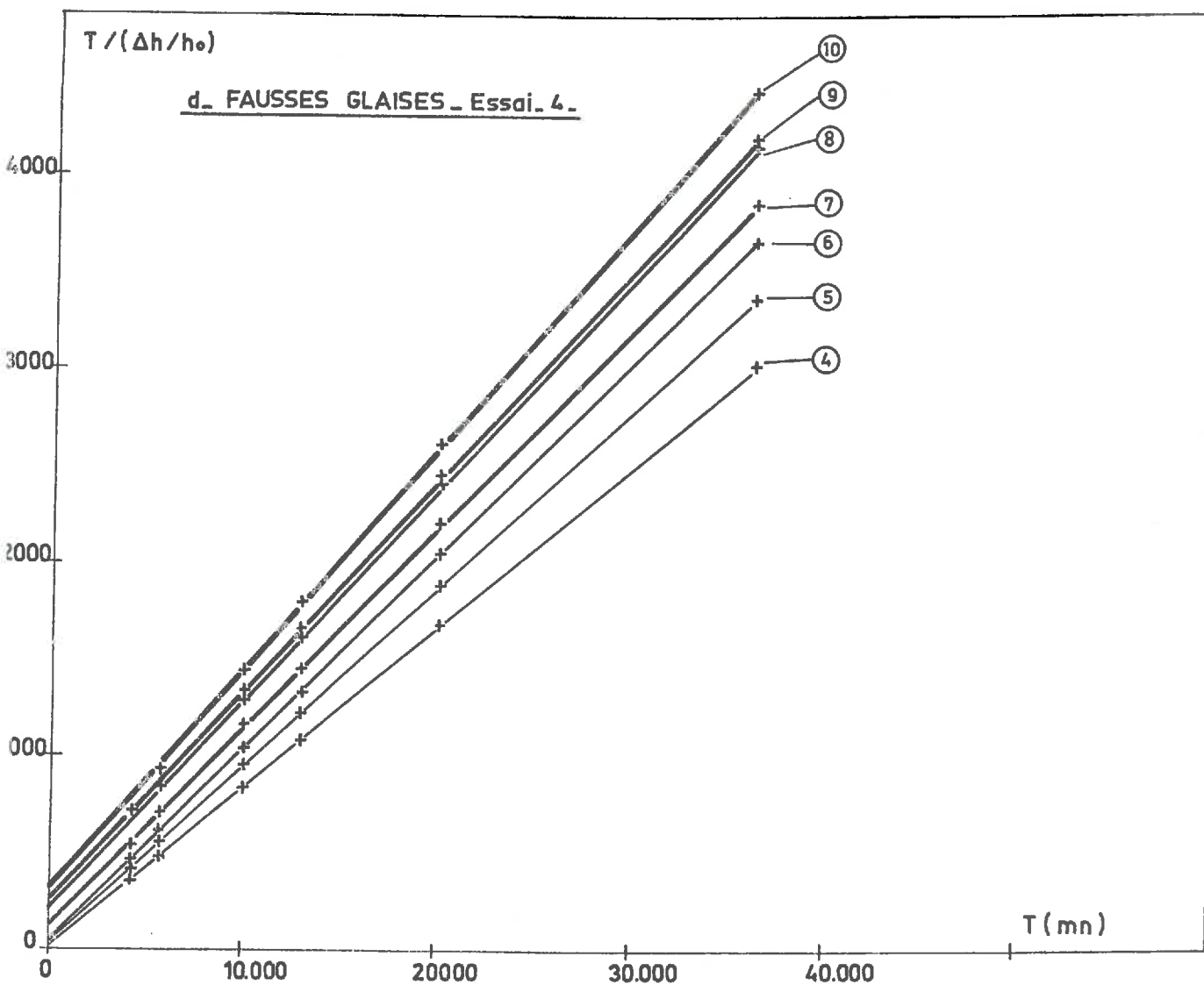
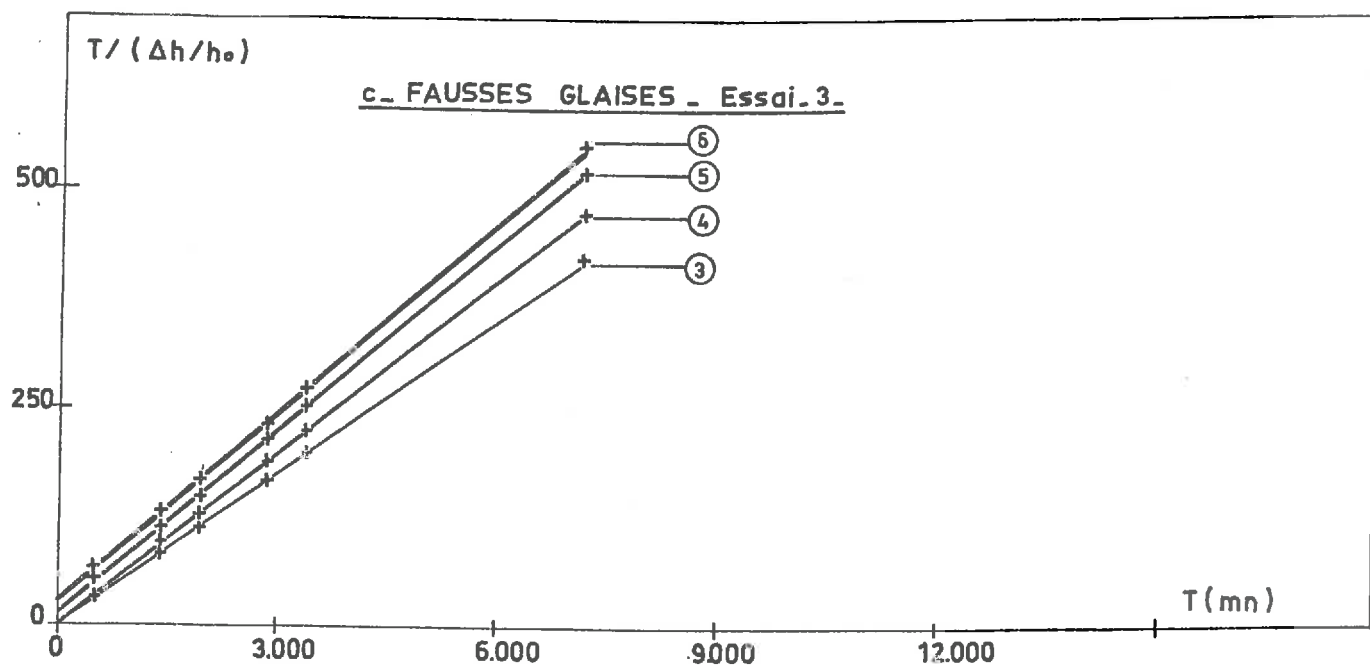


Fig. II.2.7. — Propagation du gonflement — Relation  $T / (\Delta h / h_0) = f(T)$

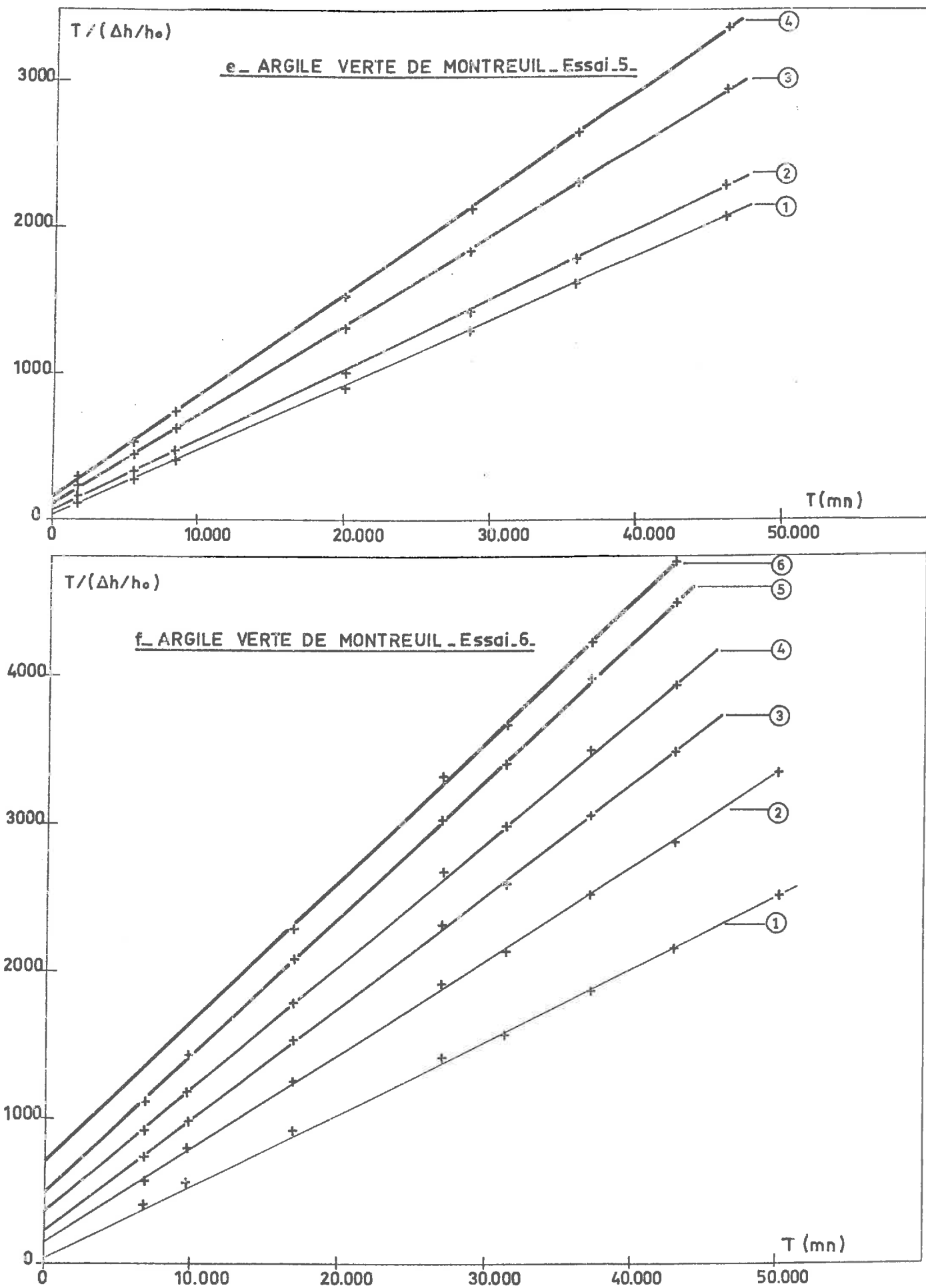


Fig. II. 2. 7. — Propagation du gonflement - Relation  $T / (\Delta h / h_0) = f(T)$

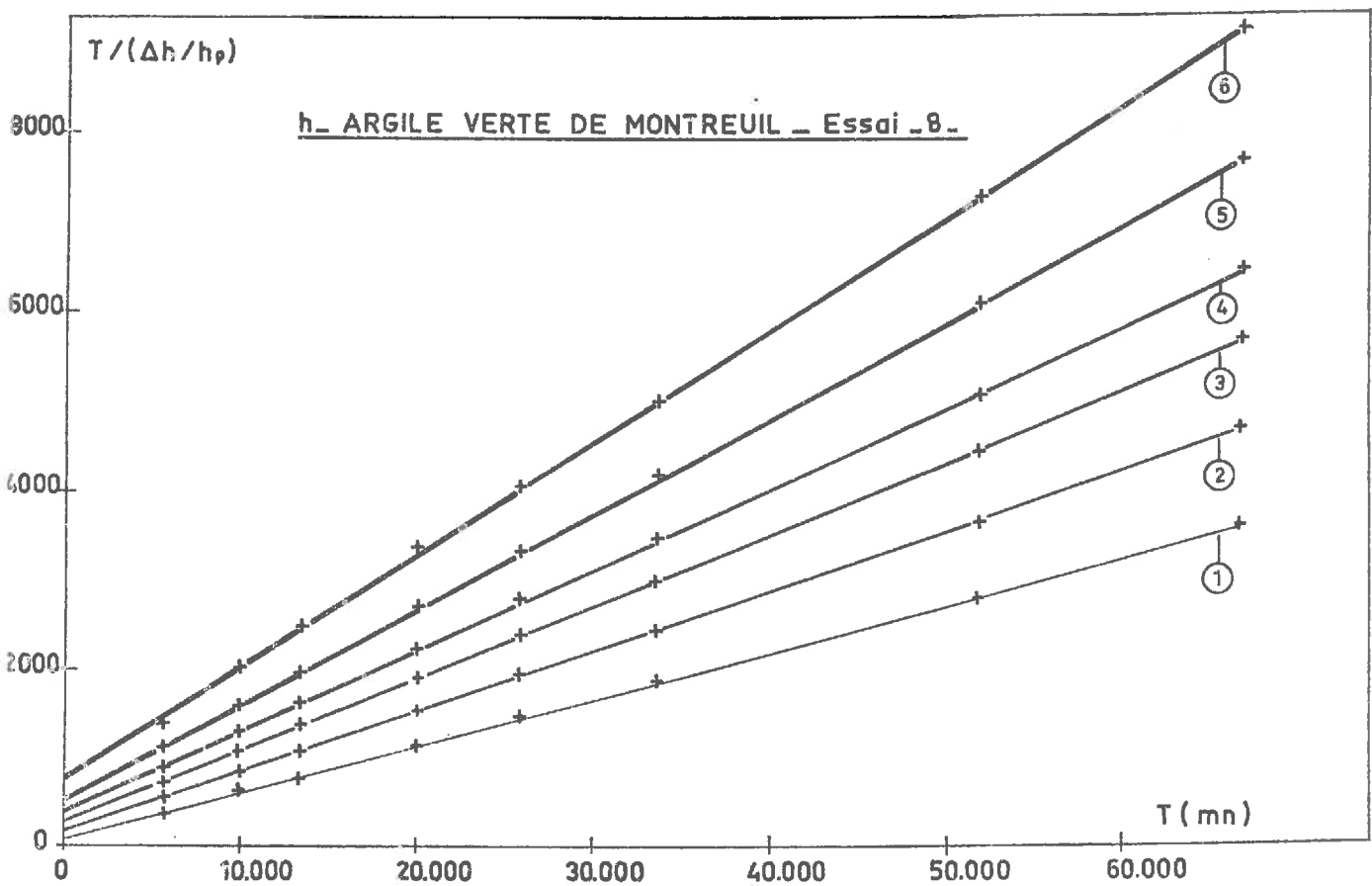
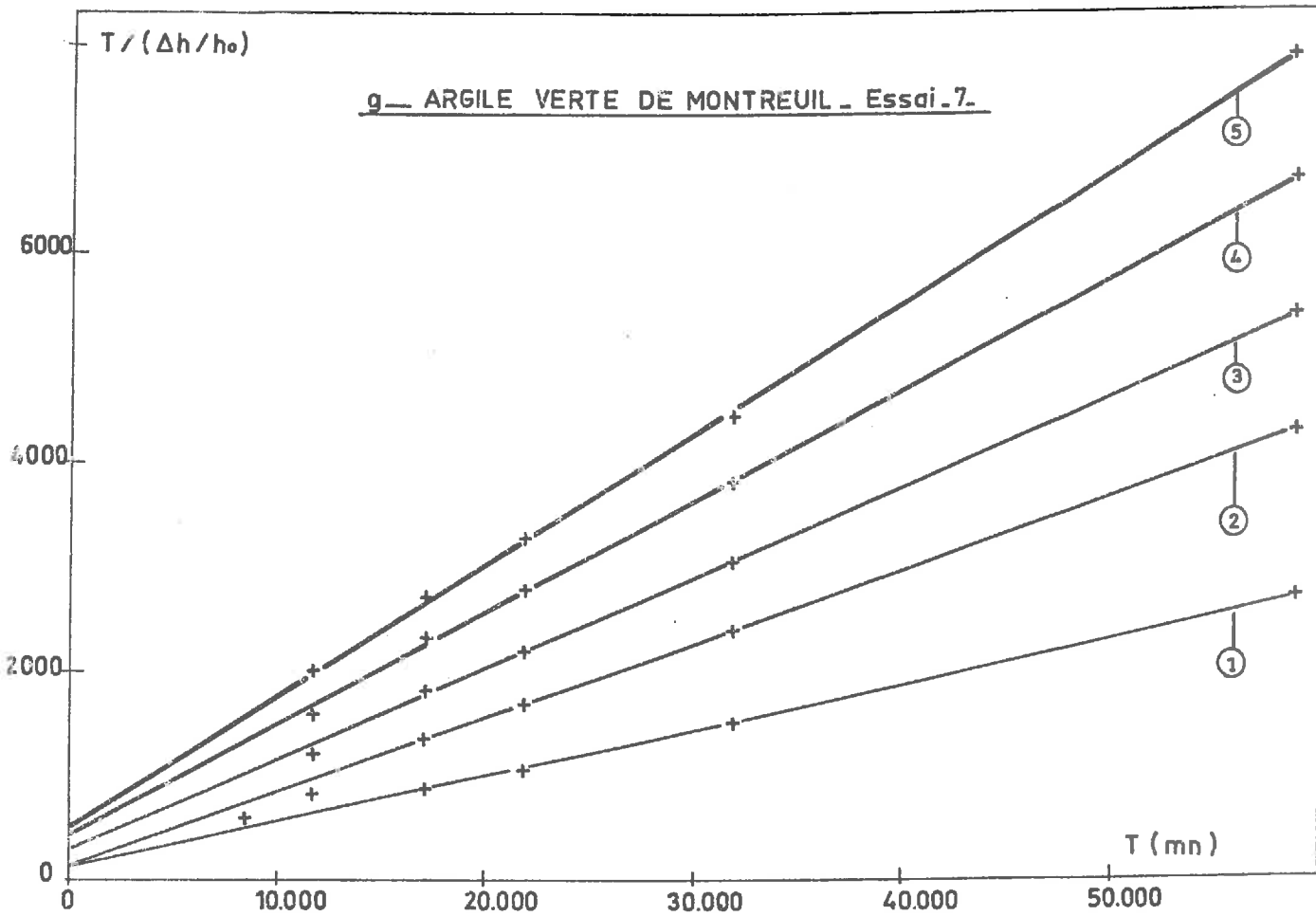


Fig. II.2.7. — Propagation du gonflement — Relation  $T / (\Delta h / h_0) = f(T)$

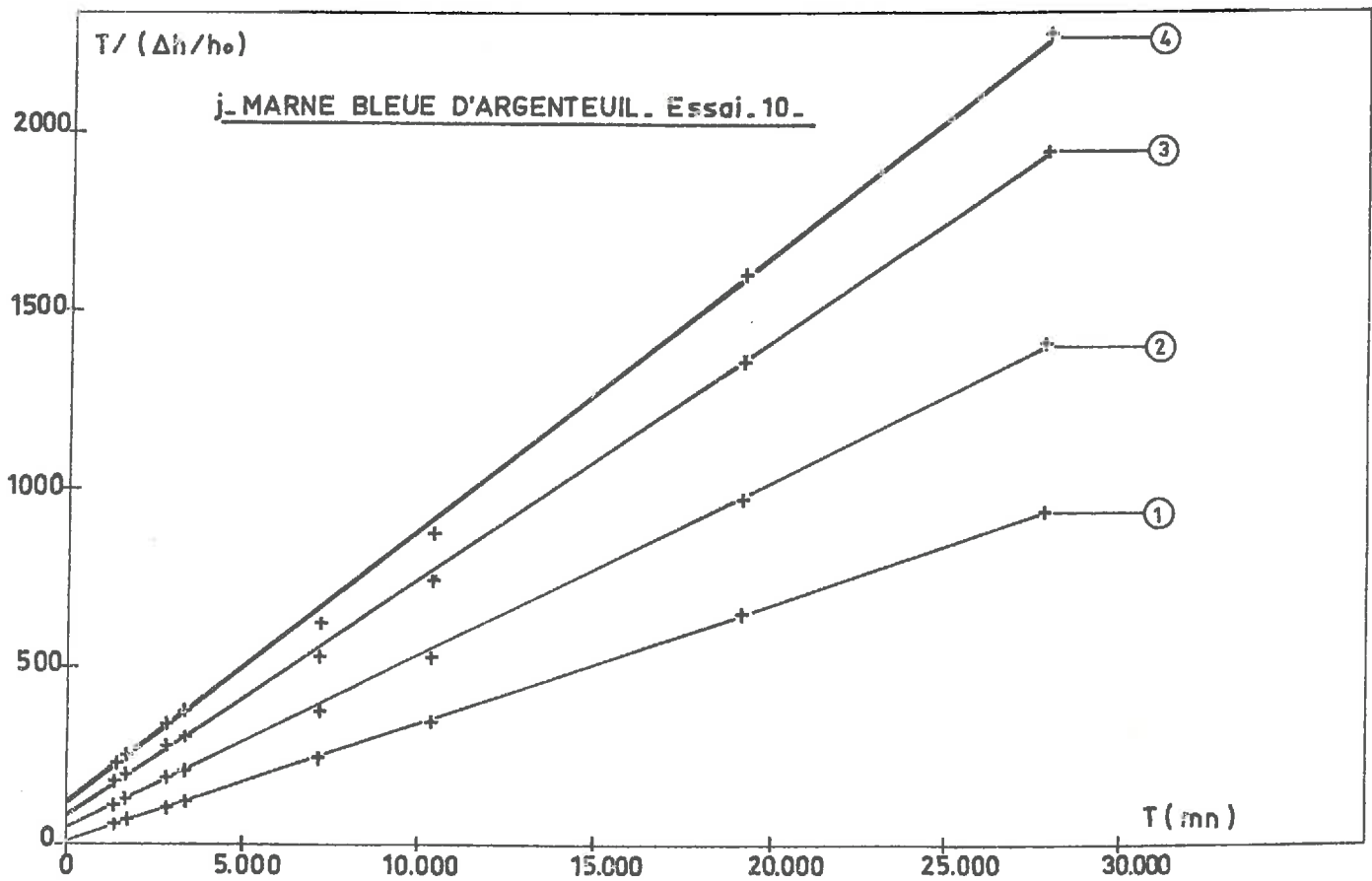
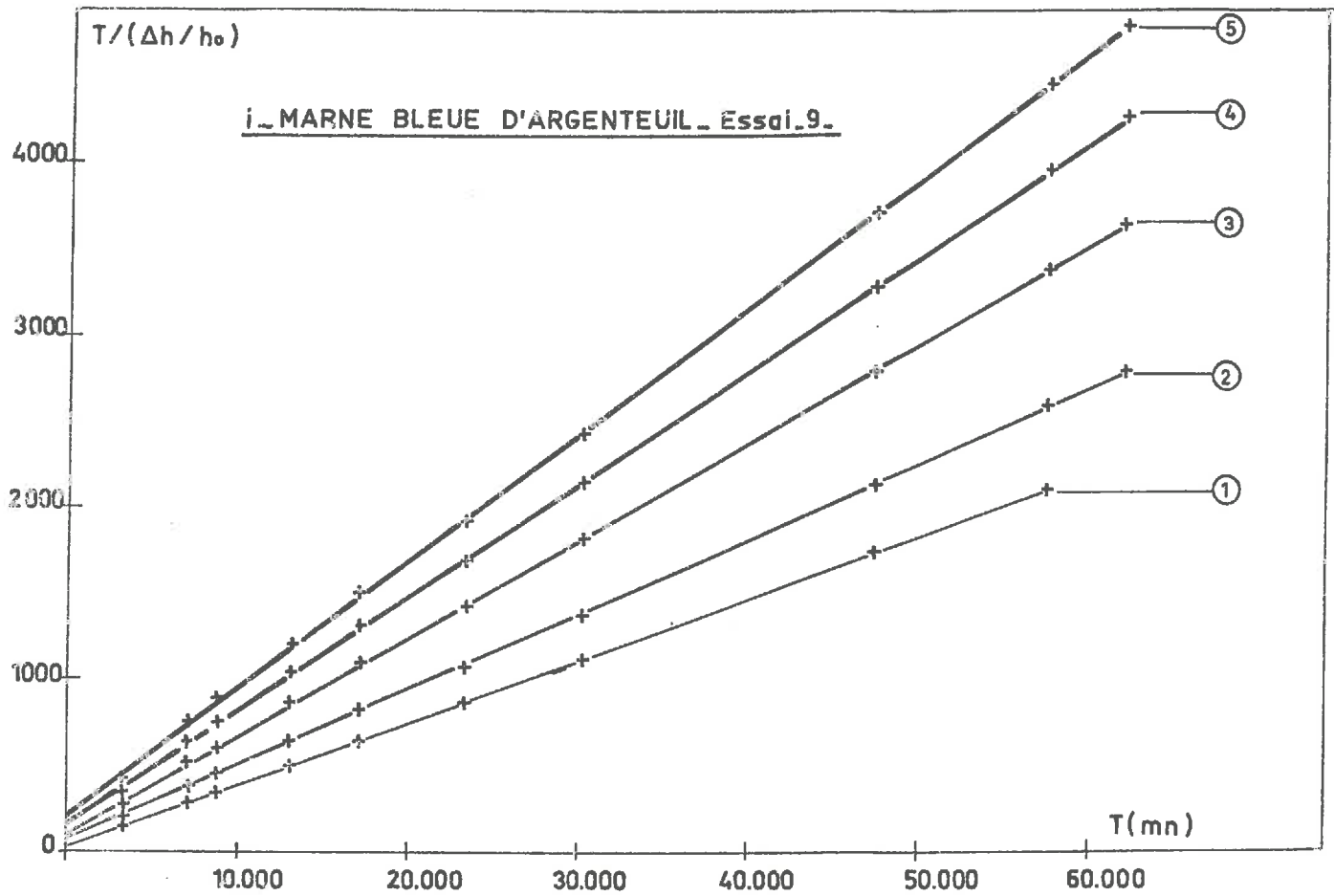


Fig. II. 2. 7 — Propagation du gonflement — Relation  $T/(\Delta h/h_0) = f(T)$  .

| N° Sous-Echantillon | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
|---------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|

## Argile Plastique de Provins

|           |       |      |      |      |      |       |       |       |        |       |
|-----------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|--------|-------|
| SSAI N° 1 | ho mm | 7,8  | 26,9 | 47,3 | 68,1 | 87,4  | 107,5 | 127,0 | 136,8  | 147,0 |
|           | B mm  | 1200 | 2400 | 3200 | 5900 | 10000 | 10400 | 10700 | 111000 | 12000 |

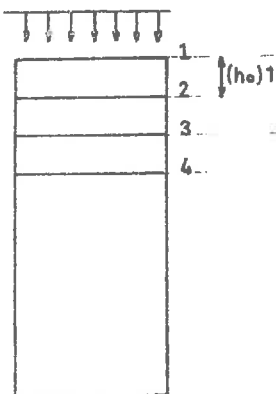
## Fausses Glaises

|           |       |      |      |      |      |       |       |       |  |  |
|-----------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|--|--|
| SSAI N° 2 | ho mm |      | 39,4 | 58,9 | 78,6 | 90,5  |       |       |  |  |
|           | B mm  |      | 330  | 430  | 650  | 1200  |       |       |  |  |
| SSAI N° 3 | ho mm | 42,8 | 54,4 | 64,9 |      |       |       |       |  |  |
|           | B mm  | 210  | 270  | 300  |      |       |       |       |  |  |
| SSAI N° 4 | ho mm | 46,7 | 61,3 | 76,2 | 91,4 | 104,3 | 114,0 | 125,0 |  |  |
|           | B mm  | 350  | 580  | 610  | 1300 | 1800  | 2000  | 2400  |  |  |

## Argile Verte de Montreuil

|           |       |       |      |      |      |      |      |
|-----------|-------|-------|------|------|------|------|------|
| SSAI N° 5 | ho mm | 10,00 | 24,3 | 38,1 | 46,8 |      |      |
|           | B mm  | 600   | 1000 | 2000 | 2600 |      |      |
| SSAI N° 6 | ho mm | 15,0  | 29,5 | 44,6 | 59,0 | 73,6 | 81,7 |
|           | B mm  | 800   | 2200 | 2650 | 4310 | 4900 | 5200 |
| SSAI N° 7 | ho mm | 14,0  | 28,6 | 43,8 | 59,0 | 69,6 |      |
|           | B mm  |       | 2000 | 2800 | 4200 | 4200 |      |
| SSAI N° 8 | ho mm | 13,5  | 28,7 | 43,3 | 57,9 | 73,0 | 92,0 |
|           | B mm  | 1500  | 2600 | 3500 | 4400 | 4600 | 6000 |

ALIMENTATION EN EAU



## Marne Bleue de Nogent

|            |       |      |      |      |      |      |  |
|------------|-------|------|------|------|------|------|--|
| SSAI N° 9  | ho mm | 15,2 | 29,3 | 44,2 | 59,0 | 70,5 |  |
|            | B mm  | 700  | 1150 | 1770 | 2100 | 2700 |  |
| SSAI N° 10 | ho mm | 9,6  | 24,0 | 38,9 | 49,6 |      |  |
|            | B mm  | 300  | 1000 | 1200 | 1600 |      |  |

Répartition des sous-échantillons.

Tableau II.2.2. - Temps de demi-gonflement en fonction de l'épaisseur de chaque sous-échantillon

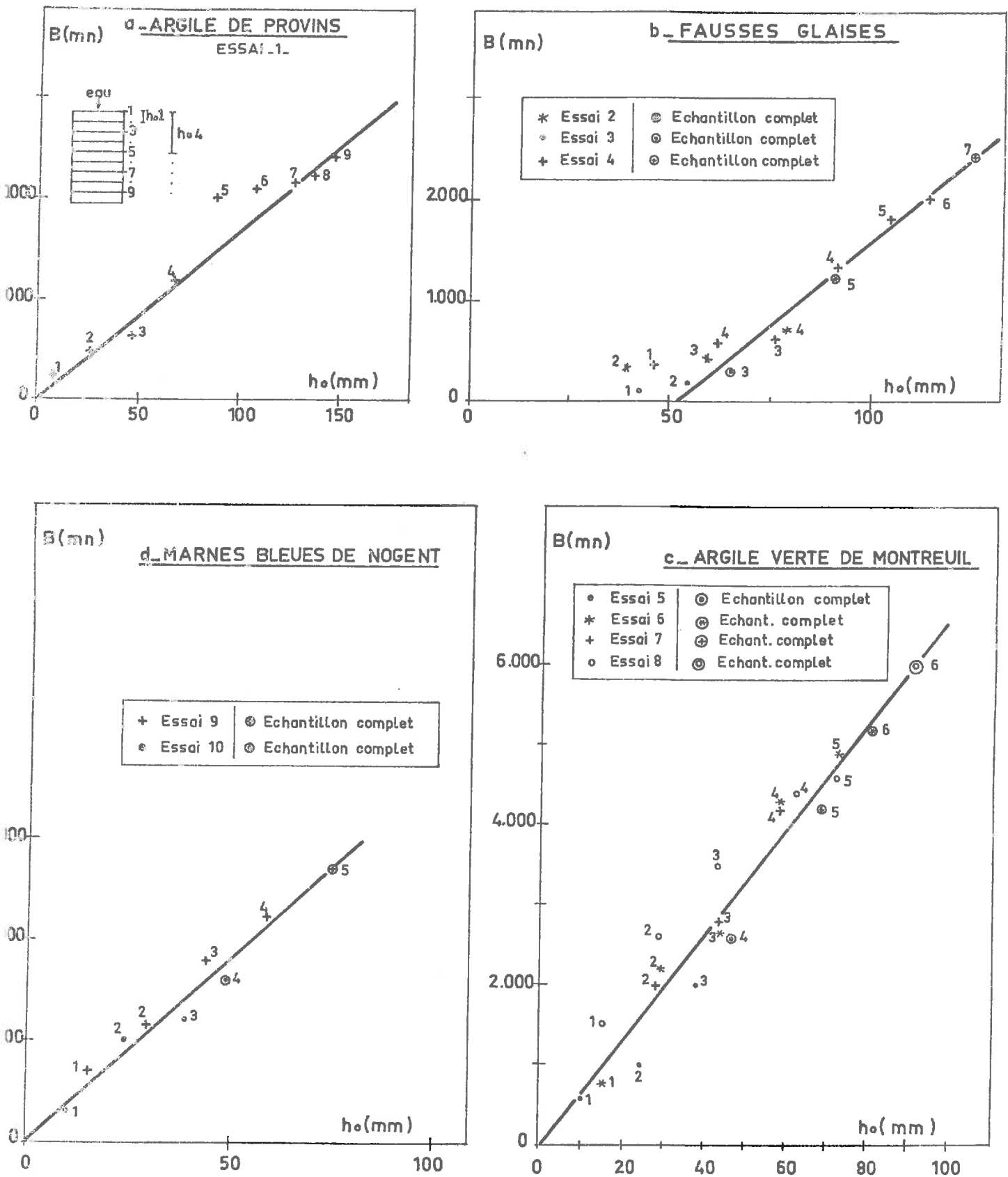


Fig.II.2.8. — Relation entre le temps de demi-gonflément  $B$  et l'épaisseur  $h_0$  de chaque sous-échantillon d'un échantillon complet.



Nous constatons qu'il existe une relation linéaire entre  $B$  et  $h_0$  :  $B = \text{cho}$ . Cette relation linéaire passe par l'origine dans tous les cas sauf dans le cas des Fausses Glaises où l'on remarque une forte dispersion des résultats jusqu'à une épaisseur de 50 mm, la relation  $B = \text{cho}$  étant linéaire à partir de  $h_0 = 50$  mm. On note de plus que pour un type de sol donné, la relation  $B = \text{cho}$  est unique pour tous les sous-échantillons de tous les essais effectués, il suffit pour cela d'examiner les Figures II.2.8. b et c, où les 3 essais effectués sur Fausses Glaises et les 4 essais effectués sur l'Argile Verte de Montreuil s'alignent respectivement sur une droite unique.

Cette dernière remarque est particulièrement intéressante, car elle permet de proposer une alternative pour l'étude pratique de la cinétique du gonflement d'un sol argileux :

- . étude de la cinétique du gonflement à partir de plusieurs essais classiques simples sur des échantillons d'épaisseurs différentes,
- . étude de la cinétique du gonflement à partir d'un seul essai sur un échantillon d'épaisseur importante divisé en plusieurs sous-échantillons, essai plus délicat à mettre en oeuvre qu'un essai de gonflement classique.

#### II.2.7. - Propagation du gonflement à l'intérieur de la couche : Modélisation 1 par gonflements cumulés à partir de la face supérieure

Chaque échantillon étant alimenté par la face supérieure, le gonflement commence à se développer dans la tranche supérieure, puis se propage au cours du temps dans les tranches suivantes :

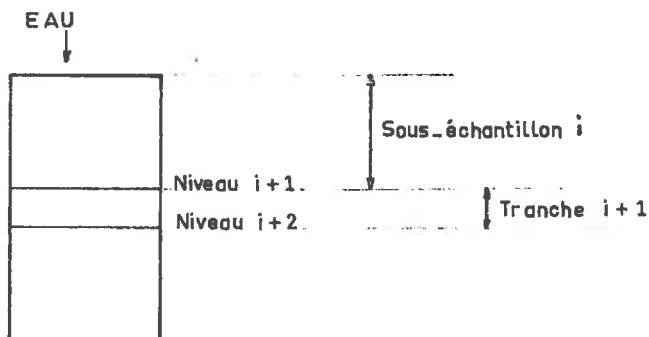


Figure II.2.9. - Modélisation 1

Soit  $\Delta h_{i,t}$ , le gonflement du sous-échantillon  $i$  à l'instant  $t$ , et soit  $\Delta h_{i,f}$  le gonflement final du sous-échantillon  $i$  quand l'essai est stoppé, on définit un degré de gonflement  $U_{i,t}$  du sous-échantillon  $i$  à l'instant  $t$ , compris entre 0 et 100, par :

$$U_{i,t} = \frac{\Delta h_{i,t}}{\Delta h_{i,f}} \times 100$$

Au début du gonflement ( $t = 0$ ) le degré de gonflement  $U_{i,0}$  du sous-échantillon  $i$  est nul. A la fin du gonflement, le degré de gonflement  $U_{i,f}$  du sous-échantillon  $i$  vaut 100.

Au cours de l'essai, quand le gonflement commence à se développer dans la tranche  $i+1$ , le sous-échantillon  $i$  a gonflé d'un degré de gonflement  $U_{i,t_i}$  que nous avons déterminé systématiquement pour tous les essais et tous les sous échantillons (Tableau II.2.3.).

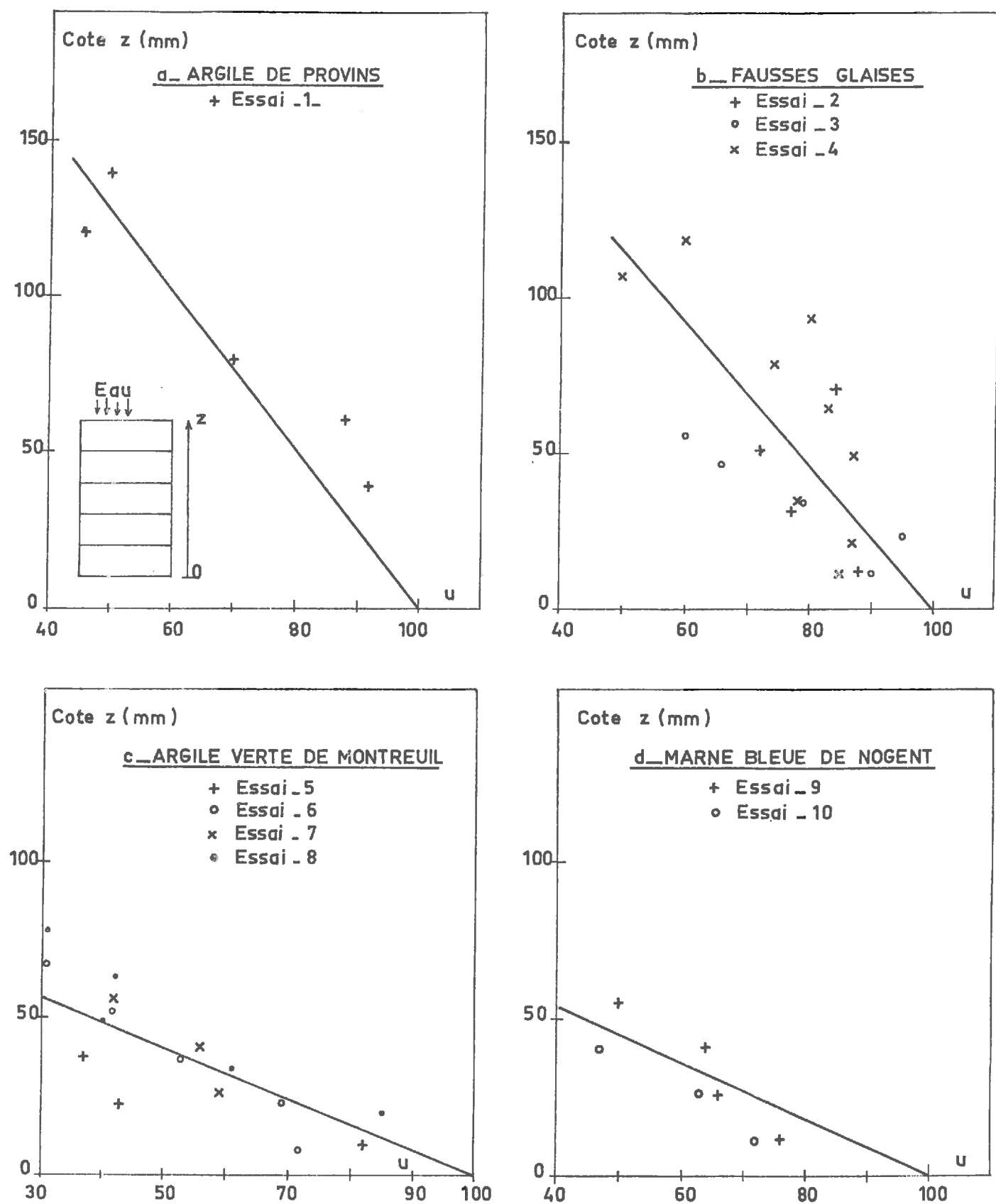
Le temps  $t_i$  est le temps au bout duquel on constate un premier déplacement du niveau repère  $i+1$  (propagation du gonflement dans la tranche  $i+1$ ).

Nous avons de plus relié graphiquement  $U_{i,t_i}$ , à la cote du niveau repère  $i$  dans la couche (Figure II.2.10 a à d), cote calculée à partir de l'extrémité inférieure de la carotte. Nous constatons que le degré de gonflement  $U_{i,t_i}$  du sous-échantillon  $i$  est inférieur à 100 quand le phénomène commence à se propager dans la tranche  $i+1$  suivante, preuve que le gonflement du sous-échantillon  $i$  n'est pas terminé quand la tranche  $i+1$  commence à gonfler. De plus  $U_{i,t_i}$  augmente quand on descend dans la carotte pour atteindre une valeur voisine de 100 quand on atteint l'extrémité inférieure.

On peut expliquer ces résultats en termes de succion des sols. A l'origine la succion est à peu près identique en tout point de la carotte et égale à une valeur  $\tau$ . Le gonflement se développant dans la partie supérieure au niveau  $i+1$ , la succion  $\bar{u}_i$  du sous-échantillon  $i$  diminue au fur et à mesure que le phénomène s'amplifie, alors que la succion  $\bar{u}_{i+1}$  de la tranche  $i+1$  reste constante  $\bar{u}_{i+1} = \tau$ .

Quand  $\bar{u}_i$  a diminué d'une valeur suffisante :

$\bar{u}_i < \tau$ , donc  $\tau_{i+1}$  est supérieure à  $\tau_i$  et le sous-échantillon  $i+1$  attire plus d'eau que le sous-échantillon  $i$ . Le gonflement se développe alors dans la tranche  $i+1$ . Comme la succion  $\tau_i$  n'est pas nulle, et que le mouvement de l'eau s'effectue du niveau  $i$  vers le niveau  $i+1$ , le sous-échantillon  $i$  continue à absorber de l'eau, mais une partie de celle-ci est attirée dans la tranche  $i+1$  en raison des différences de succion. Et ainsi le phénomène se propage dans les tranches inférieures alors qu'il n'est pas terminé dans les tranches supérieures.



| Sous-Echantillon         |        | 1     | 2     | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9  |
|--------------------------|--------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|----|
| ile Plastique de Provins |        |       |       |      |      |      |      |      |      |    |
| SAI N° 1                 | z (mm) | 139,2 | 120,1 | 99,7 | 78,9 | 59,6 | 39,5 | 20   | 10,2 | 0  |
|                          | u      | 50    | 46    | 50   | 70   | 88   | 92   |      |      |    |
| sses Glaises             |        |       |       |      |      |      |      |      |      |    |
| SAI N° 2                 | z (mm) | 70    | 51,1  | 31,6 | 11,9 |      |      |      |      |    |
|                          | u      | 84    | 72    | 77   | 88   |      |      |      |      |    |
| SAI N° 3                 | z (mm) | 55,0  | 46    | 34   | 22,1 | 10,5 |      |      |      |    |
|                          | u      | 60    | 66    | 79   | 95   | 90   |      |      |      |    |
| SAI N° 4                 | z (mm) | 118   | 107   | 93,0 | 78,3 | 63,7 | 48,8 | 33,5 | 20,7 | 11 |
|                          | u      | 60    | 50    | 80   | 74   | 83   | 87   | 78   | 87   |    |
| le Verte de Montreuil    |        |       |       |      |      |      |      |      |      |    |
| I N° 5                   | z (mm) | 36,8  | 22,5  | 8,7  |      |      |      |      |      |    |
|                          | u      | 37    | 43    | 82   |      |      |      |      |      |    |
| I N° 6                   | z (mm) | 66,7  | 52,2  | 37,1 | 22,7 | 8,1  |      |      |      |    |
|                          | u      | 31    | 42    | 53   | 69   | 72   |      |      |      |    |
| I N° 7                   | z (mm) | 55,6  | 41,0  | 25,8 |      |      |      |      |      |    |
|                          | u      | 42    | 56    | 59   |      |      |      |      |      |    |
| I N° 8                   | z (mm) | 78,5  | 63,3  | 48,7 | 33,0 | 14,0 |      |      |      |    |
|                          | u      | 31    | 42    | 40   | 61   | 85   |      |      |      |    |
| e Bleue de Nogent        |        |       |       |      |      |      |      |      |      |    |
| I N° 9                   | z (mm) | 55,3  | 41,2  | 26,3 | 11,5 |      |      |      |      |    |
|                          | u      | 50    | 64    | 66   | 76   |      |      |      |      |    |
| I N° 10                  | z (mm) | 40,0  | 25,6  | 10,7 |      |      |      |      |      |    |
|                          | u      | 47    | 63    | 72   |      |      |      |      |      |    |

EAU  
↓

Sous-échantillon i

Niveau i+1

Cote Zi

Tableau II.2.3. - Degré de gonflement de chaque sous-échantillon quand le gonflement commence à se développer dans la tranche suivante

Il est intéressant de constater que la relation entre le degré de gonflement et la cote de chaque niveau repère est à peu près identique pour l'Argile Plastique de Provins et les Fausses Glaises d'une part, et pour l'Argile Verte de Montreuil et la Marne Bleue de Nogent d'autre part (Figures II.2.10. a à d). La pente de la droite de corrélation est plus grande pour les deux premiers sols que pour les deux derniers, indiquant ainsi que pour que le gonflement se propage dans la tranche  $i+1$ , il faut que le sous-échantillon  $i$  ait réalisé une plus grande part de son gonflement.

Il faut donc d'abord noter que la propagation du phénomène dépend de la nature du sol étudié (minéralogie et texture), et ensuite qu'une distinction apparaît dans les sols étudiés, distinction que nous retrouverons lors de l'étude de la texture.

II.2.8. - Propagation du front d'eau à l'intérieur de la couche : Modélisation 2 par gonflements cumulés à partir de la face inférieure

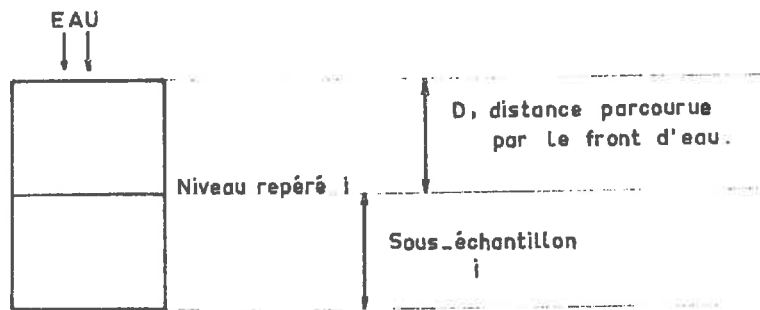


Figure II.2.11. - Modélisation 2

Si le phénomène de gonflement se développe progressivement dans la carotte, c'est que l'eau introduite s'écoule progressivement du haut vers le bas de l'échantillon. La vitesse de propagation du front d'eau dans l'échantillon est liée à la cinétique du gonflement, et à la propagation du gonflement dans la couche.

Nous avons fait l'hypothèse que le gonflement du sous-échantillon  $i$  débute dès que le front d'eau atteint le niveau  $i$ , ce qui nous a permis de déterminer le temps nécessaire au front d'eau pour atteindre chaque niveau repère (voir Tableau II.2.4.), pris égal au temps au bout duquel on note un premier déplacement du niveau considéré à partir du temps  $t_0 = 0$  initial du début d'essai.

Nous avons représenté la relation existant entre la distance parcourue par le front d'eau  $D$ , et la racine carrée du temps  $\sqrt{t}$ , pour tous les essais et tous les sols étudiés (voir Figure II.2.12. a à d).

Il est premièrement important de constater que pour un même sol, les différents essais effectués présentent la même relation  $D = f(\sqrt{t})$ , preuve de la répétitivité de l'essai de gonflement tel qu'il est pratiqué. Deuxièmement, la relation  $D = f(\sqrt{t})$  est une droite:  $D = V\sqrt{t}$ . La propagation du front d'eau évolue donc de façon linéaire avec la racine carrée du temps, et ceci pour tous les sols étudiés.

Le phénomène progresse de plus en plus lentement, en raison des variations de succion capillaire à l'intérieur de la carotte.

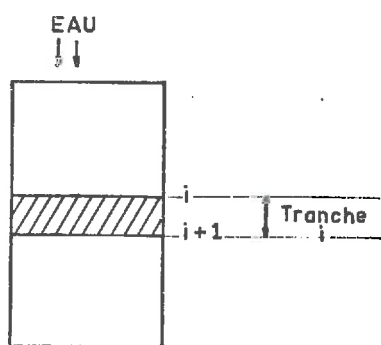


Figure II.2.13.

L'eau s'écoule plus lentement dans la tranche  $i$  que dans les tranches supérieures (Figure II.2.13) car une partie de l'eau est absorbée par les tranches supérieures en raison des suctions capillaires résiduelles (le gonflement des tranches supérieures n'est pas terminé quand le front d'eau atteint le niveau repère  $i$ ).

Bien qu'il ne soit pas question de perméabilité au sens strict du terme, nous avons ici un débit d'eau dont le moteur est la succion du sol, à rapprocher d'une ascension capillaire. Ce débit diminue d'importance au fur et à mesure que se poursuit l'essai en raison de la fraction d'eau absorbée par le gonflement des tranches supérieures.

On remarquera que la relation  $D = V\sqrt{t}$  est analogue aux résultats des essais d'ascension capillaire effectués sur les roches (BOUSQUIÉ, 1979), alors que nous sommes en présence de sols saturés et que le mouvement d'eau se fait dans le sens de la gravité (à l'opposé des ascensions capillaires sensus stricto).

De même que pour la propagation du gonflement, la vitesse de propagation du front d'eau est différente d'un sol à l'autre.

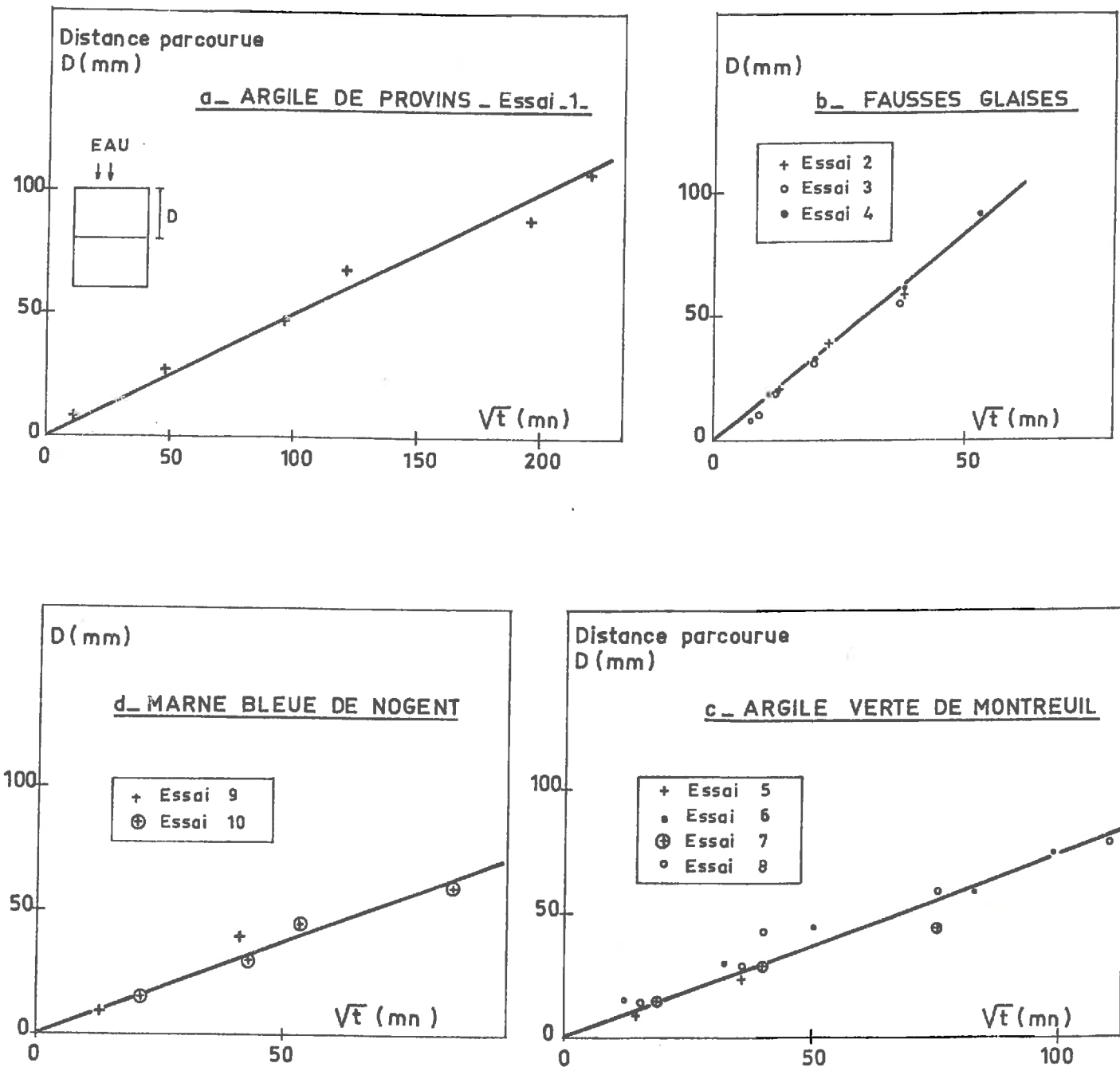


Fig. II.2.12. — Relation entre la distance parcourue par le front d'eau et le temps.

| Argile Plastique de Provins |               |   |      |       |       |        |                                       |       |  |
|-----------------------------|---------------|---|------|-------|-------|--------|---------------------------------------|-------|--|
| AI N° 1                     | Distance (mm) | 0 | 8    | 27    | 47    | 68     | 87                                    | 1 07  |  |
|                             | Temps (mn)    | 0 | 1 35 | 2 320 | 9500  | 1 5000 | 39000                                 | 49000 |  |
| Fausses Glaises             |               |   |      |       |       |        |                                       |       |  |
| AI N° 2                     | Distance (mm) | 0 | 20   | 39    | 59    |        |                                       |       |  |
|                             | Temps (mn)    | 0 | 1 66 | 511   | 1 440 |        |                                       |       |  |
| AI N° 3                     | Distance (mm) | 0 | 1 0  | 1 9   | 31    | 55     |                                       |       |  |
|                             | Temps (mn)    | 0 | 80   | 156   | 384   | 1 410  |                                       |       |  |
| AI N° 4                     | Distance (mm) | 0 | 8    | 1 8   | 3 2   | 6 1    | 91                                    |       |  |
|                             | Temps (mn)    | 0 | 56   | 1 20  | 39 5  | 1 41 0 | 2850                                  |       |  |
| Argile Verte de Montreuil   |               |   |      |       |       |        |                                       |       |  |
| I N° 5                      | Distance (mm) | 0 | 9    | 24    |       |        |                                       |       |  |
|                             | Temps (mn)    | 0 | 220  | 1 300 |       |        |                                       |       |  |
| I N° 6                      | Distance (mm) | 0 | 15   | 30    | 44    | 59     | 74                                    |       |  |
|                             | Temps (mn)    | 0 | 1 60 | 1 075 | 251 5 | 6800   | 9700                                  |       |  |
| I N° 7                      | Distance (mm) | 0 | 1 4  | 29    | 44    |        |                                       |       |  |
|                             | Temps (mn)    | 0 | 35 5 | 1 700 | 5600  |        |                                       |       |  |
| I N° 8                      | Distance (mm) | 0 | 1 3  | 28    | 42    | 58     | 75                                    |       |  |
|                             | Temps (mn)    | 0 | 240  | 1 300 | 1 600 | 5600   | 1 3000                                |       |  |
| Marne Bleue de Nogent       |               |   |      |       |       |        |                                       |       |  |
| I N° 9                      | Distance (mm) | 0 | 15   | 30    | 44    | 59     | <div>EAU</div> <div>↓↓↓</div>         |       |  |
|                             | Temps (mn)    | 0 | 477  | 1 900 | 2800  | 71 00  |                                       |       |  |
| I N° 10                     | Distance (mm) | 0 | 9    | 39    |       |        | <div>Niveau repéré</div> <div>i</div> |       |  |
|                             | Temps (mn)    | 0 | 1 70 | 2850  |       |        |                                       |       |  |

Tableau II.2.4. - Propagation du front d'eau. Distance D parcourue pendant un temps t



Si Marne Bleue de Nogent et Argile Verte de Montreuil présentent la même pente  $V = \frac{D}{\sqrt{t}}$ , par contre Argile Plastique de Provins et Fausses Glaises diffèrent considérablement (Tableau II.2.5.).

|                                    | Argile Plastique<br>de Provins | Fausses Glaises | Argile Verte<br>de Montreuil | Marne Bleue de<br>Nogent |
|------------------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------------------|--------------------------|
| $V \text{ (mm}/\sqrt{\text{min}})$ | 0,50                           | 1,67            | 0,73                         | 0,73                     |

Tableau II.2.5. - Propagation du front d'eau - Pente de relation  $D = V\sqrt{t}$

Les Fausses Glaises attirent l'eau beaucoup plus rapidement que les trois autres sols, c'est peut être la raison pour laquelle la dispersion des résultats des temps de demi-gonflement  $B$  est si grande pour les faibles épaisseurs, et la linéarité de la relation  $B = f(h_0)$  vérifiée seulement à partir de 5 cm d'épaisseur.

On voit ici que l'explication de la dynamique du gonflement des sols argileux est très complexe, car faisant intervenir un grand nombre de paramètres quasi impossibles à maîtriser dans leur ensemble.

II.2.9. - Distribution des gonflements absolus à l'intérieur de la couche :  
Modélisation 2 par gonflements cumulés à partir de la face  
inférieure

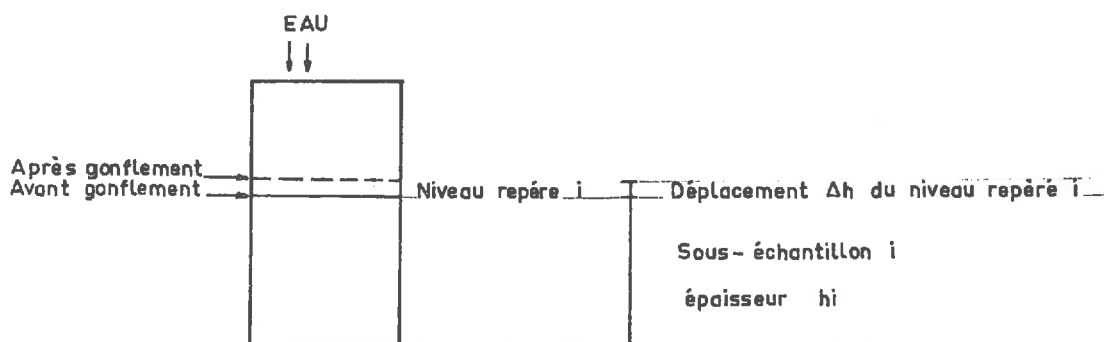


Figure II.2.14. - Modélisation 2 par gonflements cumulés à partir de la face inférieure

Quand l'essai de gonflement est arrêté, chaque niveau repère  $i$  s'est déplacé d'une hauteur  $\Delta h_i$  caractérisant le gonflement du sous-échantillon qui lui est inférieur (Figure II.2.14.).

Nous avons donc une distribution du gonflement absolu  $\Delta h$  en fonction de l'épaisseur  $h$  de chaque sous-échantillon, qui varie entre 0 pour la face inférieure et une valeur  $\Delta H$  pour l'échantillon complet.

Nous nous intéressons à la représentation polynomiale de la relation  $\Delta h = f(h)$  que l'on peut exprimer sous la forme  $\Delta h = ah^b$ . Cette loi polynomiale modélise la réalité expérimentale si la représentation graphique en coordonnées bilogarithmique de la réalisation expérimentale  $(\Delta h, h)$  est une droite, dont l'équation sera :

$$\log \Delta h = b \log h + \log a$$

La pente de cette droite,  $b$ , est l'exposant de la fonction polynomiale cherchée, et caractérise la distribution du gonflement à l'intérieur de la couche argileuse.

Nous avons représenté graphiquement la relation  $\log \Delta h = f(\log h)$ , à partir des résultats expérimentaux, pour tous les essais effectués (Figure II.2.15 a à j).

Nous constatons d'abord que la relation  $\log \Delta h = f(\log h)$  est une droite, preuve que la distribution des gonflements absolus peut être approchée par une loi polynomiale de la forme :  $\Delta h = ah^b$ .

Nous avons déterminé l'exposant  $b$  pour chacun des essais effectués (Tableau II.2.5.).

| N° Essai     | 1   | 2    | 3    | 4   | 5   | 6   | 7 | 8   | 9   | 10  |
|--------------|-----|------|------|-----|-----|-----|---|-----|-----|-----|
| Exposant $b$ | 1,5 | 1,03 | 1,05 | 1,1 | 1,4 | 1,2 | 2 | 1,8 | 1,3 | 1,2 |

Tableau II.2.5. - Exposant de la relation  $\Delta h = ah^b$

L'exposant  $b$  est compris entre 1 et 1,5 pour tous les essais sauf pour les essais 7 et 8 pour lesquels il vaut respectivement 1,8 et 2. Or l'examen des courbes de gonflement  $\Delta h = f(\log t)$  des essais 7 et 8 (Figures II.2.6. g et h) révèle que ces échantillons étaient encore en phase de gonflement quand les essais ont été arrêtés. Il est clair qu'après quelques mois d'essais supplémentaires les échantillons auraient présenté des valeurs de gonflement  $\Delta h$  légèrement supérieures pour une même épaisseur  $h$  et un exposant  $b$  plus faible.

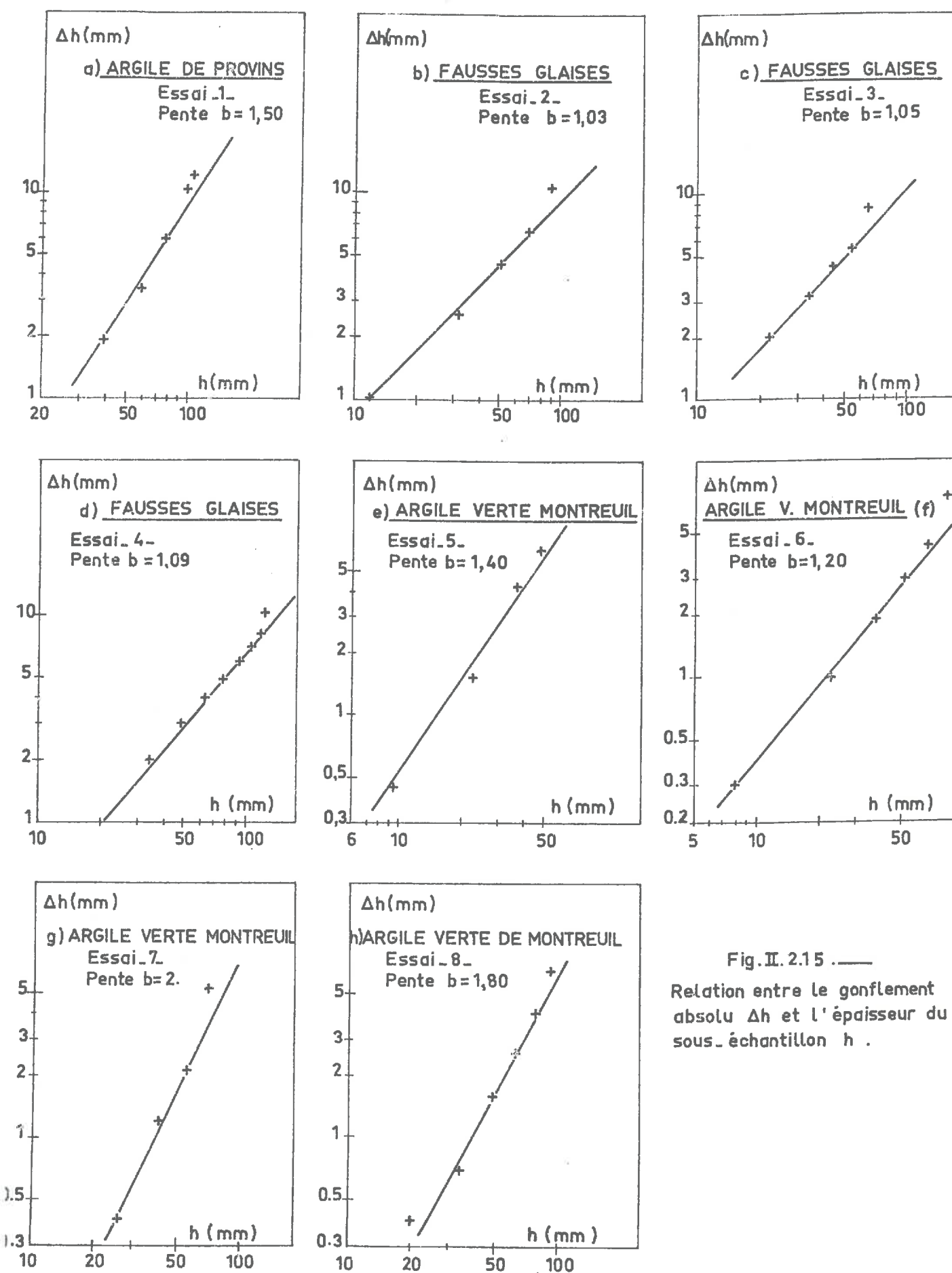


Fig.II. 2.15 .—

Relation entre le gonflement absolu  $\Delta h$  et l'épaisseur du sous-échantillon  $h$ .

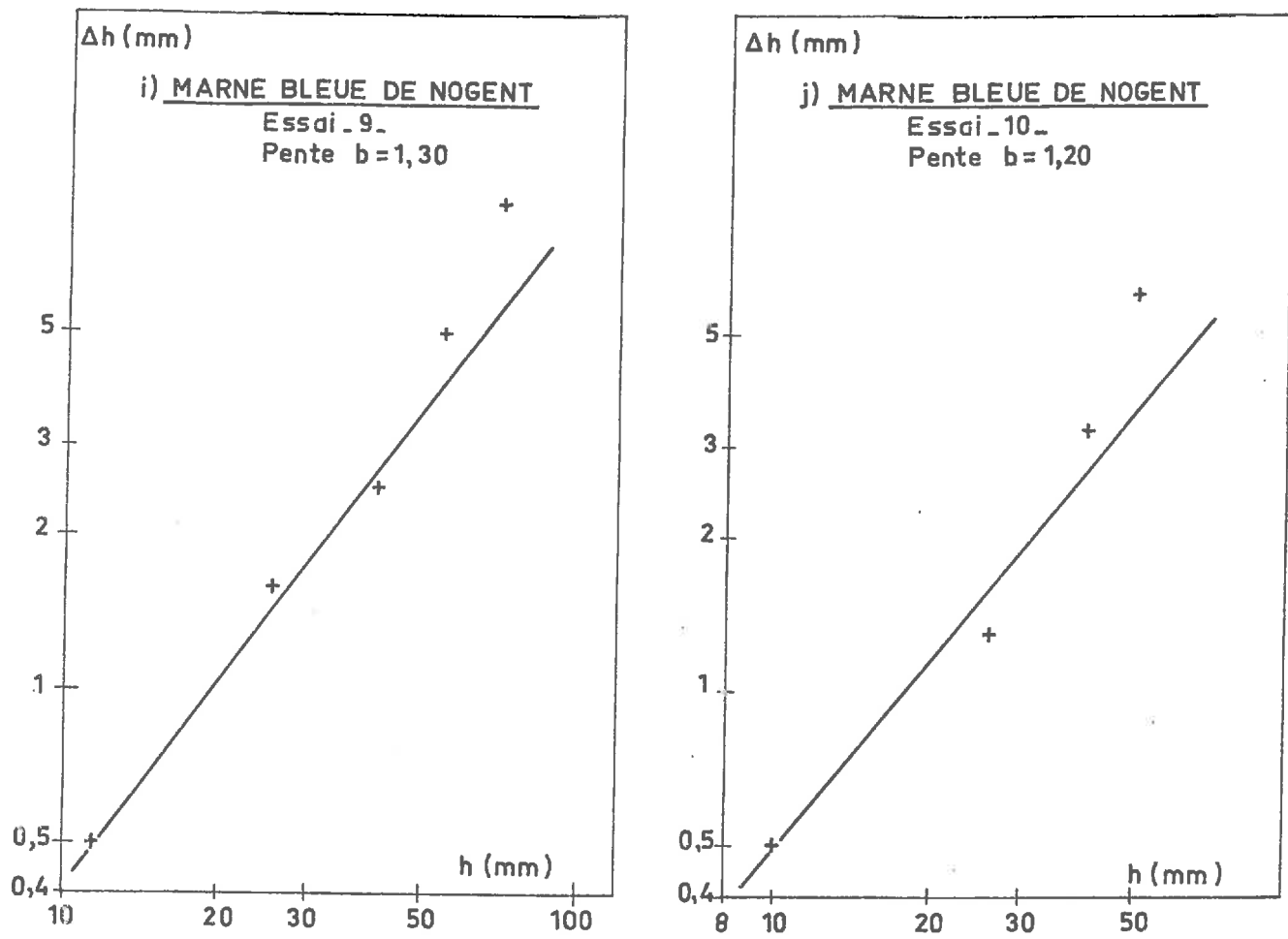


Fig. II.2.15. — Relation entre le gonflement absolu  $\Delta h$  et l'épaisseur du sous-échantillon  $h$ .

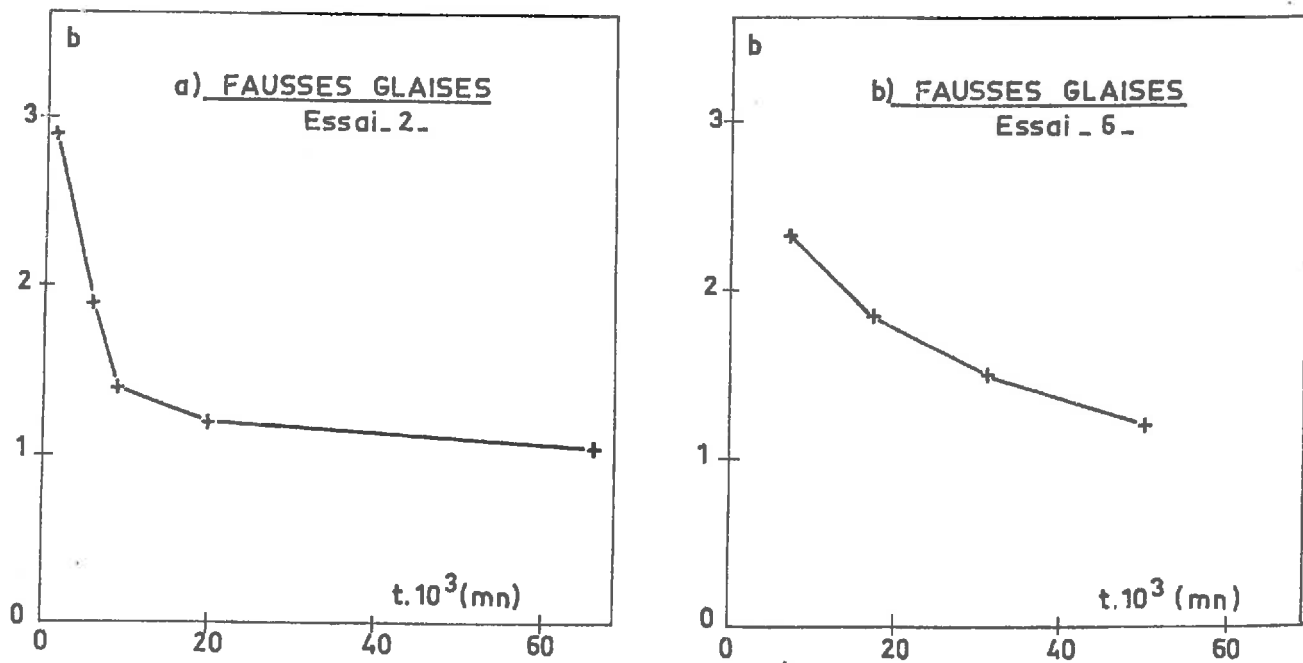


Fig. II.2.16. — Evolution de l'exposant  $b$  ( $\Delta h = ah^b$ ) en fonction du temps.

Soit un niveau repère  $i$  dans la carotte, son gonflement absolu  $\Delta h_i$  est en fait le gonflement cumulé de toutes les tranches qui lui sont inférieures. Comme l'eau arrive par la face supérieure de l'échantillon, il apparaît peu probable qu'une tranche  $i$  ait un gonflement inférieur à la tranche suivante  $i+1$ , puisqu'elle a la possibilité de gonfler en premier, et par conséquent l'exposant  $b$  de la relation  $\Delta h = a h^b$  ne peut être inférieur à 1. De plus, pour un même essai il est possible de déterminer la distribution des gonflements absolus  $\Delta h = a h^b$  à différents temps donnés, et de calculer, pour chaque temps  $t$ , la valeur de l'exposant  $b$ . Nous avons effectué cette détermination pour deux essais, l'essai 2 et l'essai 6 et nous constatons (Figure II.2.16 a et b) que l'exposant  $b$  diminue au cours du temps pour approcher la valeur 1 quand le temps devient très grand. Il en ressort que la distribution des gonflements absolus évolue dans le sens des exposants décroissants pour atteindre la valeur 1 quand le temps devient infini (Figure II.2.17).

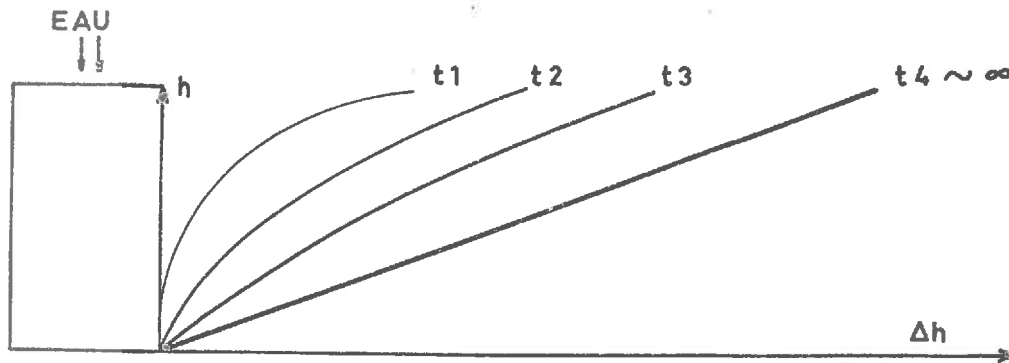


Figure II.2.17. - Evolution de la distribution des gonflements absolus au cours du temps.

On en conclut que pour un essai de gonflement complètement terminé, au bout d'un temps infini, l'exposant  $b$  est égal à 1, et la distribution du gonflement absolu dans la couche est :

$$\Delta h = a h$$

c'est-à-dire  $\frac{\Delta h}{h} = a = \text{constante}$

Au bout d'un temps infini, le taux de gonflement est le même en tout point de la couche.

Bien évidemment cette conclusion est obtenue sur des échantillons d'épaisseur inférieure à 150 mm pour lesquels l'influence de la contrainte géostatique est négligeable. Pour une couche de plusieurs mètres d'épaisseur, le taux de gonflement à l'intérieur de la couche au bout d'un temps très grand ne variera qu'en fonction de la contrainte géostatique (poids des terres sus-jacentes).

#### II.2.10. - Distribution de teneur en eau à l'intérieur de la carotte

Si l'on peut supposer que le profil de distribution de teneur en eau initial est uniforme dans toute la carotte en raison de la consolidation préalable imposée, il n'en est pas de même en fin d'essai. On remarque (Tableau II.2.6.) que la teneur en eau décroît dans l'échantillon quand on s'éloigne de la surface libre en contact direct avec l'eau. Plusieurs constatations et explications en découlent.

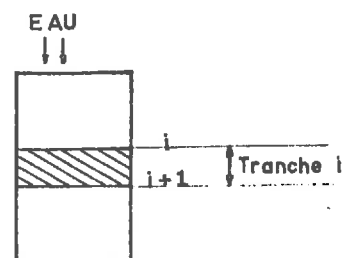
Tout d'abord, il est bien évident que quand l'essai est stoppé, au bout de deux mois environ, le phénomène de gonflement n'est pas rigoureusement terminé, en particulier en ce qui concerne les couches les plus profondes. Il suffit pour cela de regarder les courbes  $\Delta h = f(\log t)$  de certains essais (Figure II.2.6.) pour lesquelles le parallélisme avec l'axe des temps n'est pas obtenu pour les grandes épaisseurs même au bout de 2 mois (Argile Plastique de Provins, Argile Verte de Montreuil, essais n° 6-7-8, Marne Bleue de Nogent, essai n° 9). Néanmoins l'essentiel du gonflement est déjà réalisé, ce qui nous permet d'étudier la cinétique du gonflement avec une bonne approximation.

De plus, la frange supérieure de l'échantillon, en contact direct avec l'eau (par l'intermédiaire d'une pierre poreuse), se trouve gorgée d'eau par suite d'une désorganisation de la texture sur quelques millimètres avec ouverture de fractures, remontée de particules de matières le long de la pierre poreuse. C'est pourquoi la teneur en eau de la première tranche est en général nettement supérieure aux autres.

Mais il nous semble que l'explication des différences de teneur en eau observées ne réside pas tant dans la réalisation complète ou non du gonflement au bout de deux mois, que dans les notions d'équilibre de potentiels entre le sol et l'eau à des intervalles de temps différents.

Deux des essais de gonflements "normal" (avec alimentation par le haut et par le bas de la couche) effectués sur l'Argile Plastique de Provins ont été poursuivis pendant plus d'un an. Ces deux échantillons présentent des distributions de teneur en eau relativement plus uniforme tout au long des carottes (Voir Tableau II.2.6.). Or ces deux échantillons avaient réalisé l'essentiel de leur gonflement au bout de deux mois (Voir Figure II.1.3.). Il apparaît donc qu'un temps plus long est nécessaire pour équilibrer les teneurs en eau que pour réaliser le gonflement. Une fois le phénomène de gonflement volumique pratiquement terminé, il se peut qu'il continue à se produire dans l'échantillon un transfert d'eau, sans modification importante

| des Tranches                |       | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10 |
|-----------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|----|
| Argile Plastique de Provins |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| SAI 1                       | w (%) | 40   | 38,5 | 36   | 33,5 | 32   | 30,8 | 30   | 30,5 | 30,5 |    |
| Fausses Glaises             |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| SAI 2                       | w (%) | 46   | 42,5 | 40,3 | 39,5 | 38,8 |      |      |      |      |    |
| SAI 3                       | w (%) | 48,3 | 45,4 | 42,8 | 42,4 | 40,7 | 40,8 |      |      |      |    |
| SAI 4                       | w (%) | 48   | 43,3 | 41   | 39,5 | 39   | 38   | 38,4 | 40,5 | 37,1 | 37 |
| Argile Verte de Montreuil   |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| SAI 5                       | w (%) | 46,7 | 42   | 36,9 | 37,6 |      |      |      |      |      |    |
| SAI 6                       | w (%) | 42,3 | 37,4 | 34,7 | 33   | 31   | 31,1 |      |      |      |    |
| SAI 7                       | w (%) | 43,7 | 37,8 | 35,2 | 34,6 | 34,4 |      |      |      |      |    |
| SAI 8                       | w (%) |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| Marne Bleue de Nogent       |       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |    |
| SAI 9                       | w (%) | 54   | 48,3 | 42,9 | 41,5 | 40,6 |      |      |      |      |    |
| SAI 10                      | w (%) | 45   | 36,2 | 35,2 | 36   |      |      |      |      |      |    |



Essais de gonflement à long terme (1 an) - Argile Plastique de Provins -

| des Tranches |       | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6  | 7    | 8    | 9  | 10 |
|--------------|-------|------|------|------|------|------|----|------|------|----|----|
| SAI 1        | w (%) | 36,6 | 33,4 | 32,0 | 32,5 | 34,4 |    |      |      |    |    |
| SAI 2        | w (%) | 36,6 | 34,2 | 32,7 | 33,1 | 36,8 | 35 | 34,1 | 33,1 | 35 |    |

Tableau II.2.6. - Distribution de la teneur en eau des tranches en fin d'essai

de volume global tendant à équilibrer les teneurs en eau locales.

De plus l'hypothèse couramment admise qu'à l'origine la teneur en eau est uniformément répartie dans l'échantillon n'est peut être pas valide. Nous avons souvent constaté des différences de teneur en eau initiales entre des échantillons voisins dans la carotte de sondage. Ces différences de teneur en eau peuvent être associées à des différences de texture pour un même état de contraintes appliqué au sol. Un même gonflement réalisé sur deux tels échantillons donnera alors des teneurs en eau finales différentes.

Plusieurs raisons peuvent donc être ainsi invoquées pour expliquer ces variations de teneur en eau finale au sein d'un même échantillon. Ces raisons peuvent jouer soit ensemble, soit séparément, selon les cas considérés. Il nous est malheureusement impossible de confirmer expérimentalement ces hypothèses il faudrait pour cela faire une étude spécifique sur la distribution des teneurs en eau à très long terme sur des sols placés dans diverses conditions d'équilibre (à la fois en consolidation et en gonflement).

#### II.2.11. - Conclusions

Il est apparu que l'essai mis au point permet de modéliser avec une bonne approximation la propagation du gonflement à l'intérieur d'une couche argileuse).

- . chaque sous-échantillon d'une même carotte se comporte comme un échantillon complet et présente un gonflement hyperbolique en fonction du temps, dont le temps de demi-gonflement est proportionnel à son épaisseur.
- . Le phénomène de gonflement se propage dans les couches les plus profondes avant son achèvement complet dans les couches supérieures en raison de l'existence de suctions différentielles.
- . Le front d'eau progresse à l'intérieur de la couche linéairement en fonction de la racine carrée du temps :  $D = V \sqrt{t}$ , montrant ainsi le ralentissement du phénomène au cours du temps.
- . Au bout d'un temps suffisamment grand, le taux de gonflement est identique en tout point de l'échantillon, et ne dépend donc in-situ que de la contrainte géostatique.



### II.3. - INFLUENCE DES CONTRAINTES INITIALES ET FINALES SUR LE GONFLEMENT

Après avoir étudié le gonflement d'une couche argileuse entre 2 états de contrainte - $\sigma'_i$  contrainte initiale et  $\sigma'_f$  contrainte finale- fixés et dégagé une loi du gonflement en fonction du temps et de l'épaisseur de la couche, nous allons maintenant nous poser le problème du gonflement d'une couche argileuse en fonction des états de contraintes initiaux et finaux, tous les autres paramètres étant fixés.

#### II.3.1. - Revue bibliographique et présentation de l'étude expérimentale

##### II.3.1.1. - Revue bibliographique

Si de nombreux auteurs ont étudié le gonflement des sols en fonction des contraintes, on remarque que le plus souvent, seul l'état de contrainte finale  $\sigma'_f$  est pris comme variable, l'état initial caractérisé par un indice des vides  $e_o$  et une contrainte  $\sigma'_i$  étant fixé.

Très souvent, et c'est le cas de SULLIVAN et MAC CLELLAND (1969), JENNINGS FIRTH, RALPH et NAGAR (1973), SNETHEN (1979), la loi de comportement effort-déformation est définie par une relation semi logarithmique de la forme :

$$\frac{\Delta h}{h_o} = \frac{C_e}{1 + e_o} \cdot \log \left( \frac{\sigma'_i}{\sigma'_f} \right)$$

$e_o$  indice des vides initial

$C_e$  indice de gonflement, constante définie par la pente de la droite  $e = f(\log \sigma')$

A ce terme, qui caractérise le gonflement primaire, CAROTHORS (1965) ajoute un taux de gonflement secondaire défini par :

$$\frac{\Delta h_s}{h_o} = \frac{C_s}{1 + e_o}$$

$C_s$  étant l'indice de gonflement secondaire défini par la pente de la relation  $e = f(\log t)$  pour la partie correspondant au gonflement secondaire (Figure II. 3.1.).

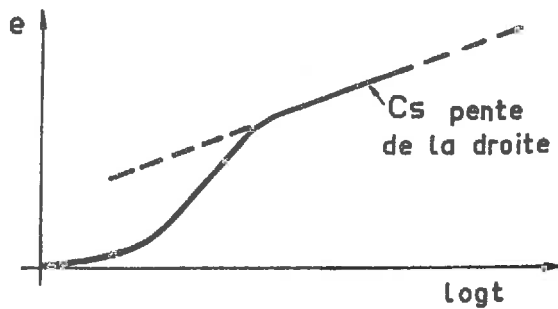


Figure II.3.1.- Définition de l'indice de gonflement secondaire  $C_s$

DAKSHANAMURTHY (1978) précise le terme  $\frac{C_e}{1 + e_0}$ , pour des états initiaux différents appréhendés par le poids spécifique sec du sol  $\gamma_d$ , par la

relation :

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{1}{a \gamma_d + b} \log \left( \frac{\sigma'_i}{\sigma'_f} \right)$$

a et b étant des constantes

Comme la densité sèche  $\gamma_d$  est reliée à l'indice des vides  $e_0$  par

$$\gamma_d = \gamma_s \frac{1}{1 + e_0}$$

où  $\gamma_s$  est le poids spécifique des grains du sol (constante pour un sol donné), nous en déduisons que pour un sol saturé :

$$C_e = \frac{(1 + e_0)^2}{a \gamma_s + (1 + e_0) b}$$

On peut néanmoins se poser la question de la validité de la caractérisation d'un état de contrainte par une densité sèche.

L'approche semi-logarithmique posant des problèmes aux limites, c'est-à-dire des contraintes finales très faibles ou des contraintes initiales très grandes, il peut être préférable d'utiliser une loi de comportement hyperbolique. UZAN (1976), reprenant KONDNER, propose une loi de la forme :

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{\sigma'_i - \sigma'_f}{d \sigma'_f + C}$$

$\sigma'_i$  étant fixé, c et d sont alors des fonctions de  $\sigma'_i$ . VAYSSADE (1978), à l'aide d'essais de déchargement par paliers à partir d'une contrainte initiale fixe, a affiné cette loi par :

$$\left. \frac{\Delta h}{h_0} \right|_{\sigma'_i}^{\sigma'_f} = \left. \frac{\Delta h}{h_0} \right|_{\sigma'_i}^{\sigma'_f = 0} \cdot \frac{\sigma'_i - \sigma'_f}{(\sigma'_i - \sigma'_f) + D\sigma'_f}$$

où  $\left. \frac{\Delta h}{h_0} \right|_{\sigma'_i}^{\sigma'_f = 0}$  et D dépendent de la contrainte initiale  $\sigma'_i$ .

### II.3.1.2. - Présentation de l'étude expérimentale et mode opératoire

Dans l'expression générale de la loi du taux de gonflement en fonction du temps  $\frac{\Delta h}{h_0} = G \frac{t}{B + t}$ , les deux paramètres G et B sont soumis à l'influence des contraintes  $\sigma'_i$  et  $\sigma'_f$ . Rappelons que G est le taux de gonflement final obtenu pour un temps infini, et B le temps de demi-gonflement caractéristique de la cinétique de gonflement.

Afin d'étudier la variation des paramètres G et B en fonction des contraintes  $\sigma'_i$  et  $\sigma'_f$ , nous avons utilisé l'essai de type oedométrique pour des états de contraintes différents.

L'étude générale a été effectuée sur l'Argile Verte de Villejuif. Nous en avons ensuite vérifié les principales conclusions sur quelques autres sols (Argile d'Aix-Les-Bains, Argile Plastique Bariolée, Fausses Glaïses). Nous avons travaillé, pour l'Argile Verte de Villejuif sur des échantillons d'épaisseur 24 mm, épaisseur qui donne des résultats satisfaisants sur un tel sol (VAYSSADE, 1978, § II.2.3.) et qui permet de réduire la durée des essais. Il faut signaler que pour l'interprétation nous avons utilisé directement les résultats graphiques G et B plutôt que les résultats expérimentaux  $\left( \frac{\Delta h}{h} \right)_f$  et  $T_{0.5}$ .

Rappelons enfin que nous partons ici d'un sol normalement consolidé, c'est-à-dire d'un état initial ( $\sigma_i = \sigma'_i$ ,  $u = 0$ ) pour arriver à un état final ( $\sigma_f = \sigma'_f$ ,  $u = 0$ ), en lui imposant une diminution de contrainte effective  $\Delta\sigma' = \sigma'_i - \sigma'_o > 0$  ou, ce qui est équivalent dans le domaine saturé, une variation dans le domaine des pressions interstitielles négatives égale à  $\Delta u = \sigma'_o - \sigma'_i < 0$ .

### Distribution des essais effectués sur l'Argile Verte de Villejuif

19 essais de déchargement ont été effectués sur l'Argile Verte de Villejuif. La contrainte maximum utilisée a été  $10,4 \cdot 10^5$  Pa, ce qui représente une épaisseur de terrains sus-jacents d'environ 50 mètres, ou un bâtiment de 30 étages, et la contrainte minimum  $0,03 \cdot 10^5$  Pa.

Entre ces deux valeurs extrêmes, la distribution des essais de gonflement dans le plan des contraintes  $\sigma'_i$  (initiale) -  $\sigma'_f$  (finale) est donnée à la Figure II.3.2.

Nous avons effectué des essais sur la droite  $\sigma'_i = 10,4 \cdot 10^5$  Pa, sur la droite  $\sigma'_f = 0,03 \cdot 10^5$  Pa, et sur diverses droites  $\sigma'_i - \sigma'_f = K$  constante.

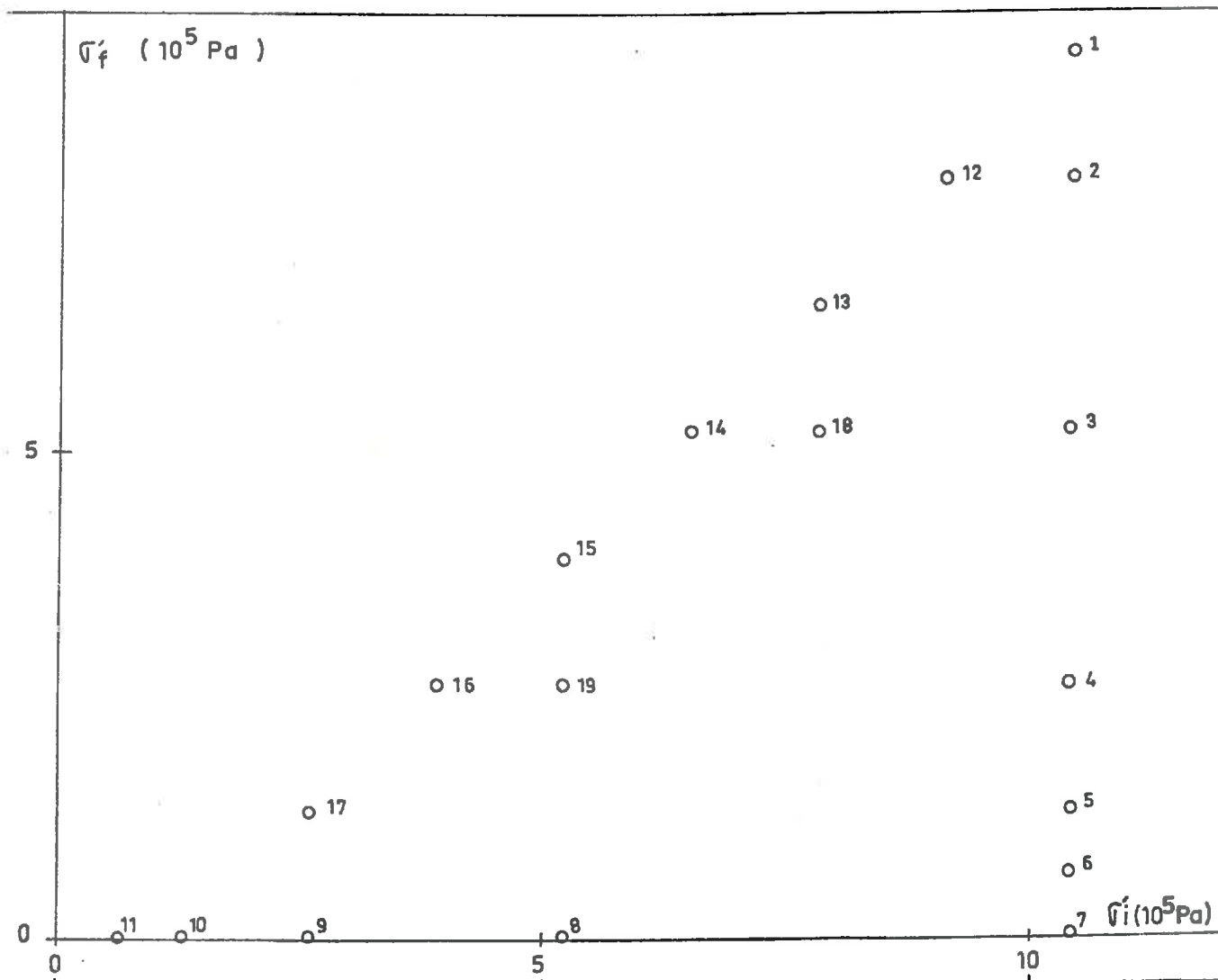


Fig. II.3.2. Distribution des essais effectués dans le plan des contraintes ( $\sigma'_i$ ,  $\sigma'_f$ ).

## ARGILE VERTE DE VILLEJUIF

| Echantillon | Epaisseur $h_0$ (mm) | $\sigma'_i$<br>( $10^5$ Pa) | $\sigma'_f$<br>( $10^5$ Pa) | B (mm) | G (%) |
|-------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------|-------|
| 1           | 24,00                | 10,4                        | 9,1                         | 0      | 0     |
| 2           | 24,00                | 10,4                        | 7,8                         | 7      | 0,22  |
| 3           | 24,00                | 10,4                        | 5,2                         | 50     | 1,14  |
| 4           | 24,00                | 10,4                        | 2,6                         | 80     | 2,75  |
| 5           | 24,00                | 10,4                        | 1,3                         | 90     | 3,69  |
| 6           | 24,00                | 10,4                        | 0,65                        | 100    | 6,02  |
| 7           | 24,00                | 10,4                        | 0,03                        | 194    | 9,70  |
| 8           | 24,00                | 5,2                         | 0,03                        | 252    | 8,39  |
| 9           | 24,00                | 2,6                         | 0,03                        | 330    | 7,00  |
| 10          | 24,00                | 1,3                         | 0,03                        | 515    | 6,00  |
| 11          | 24,00                | 0,65                        | 0,03                        | 700    | 5,08  |
| 12          | 24,00                | 9,10                        | 7,8                         | 4      | 0,13  |
| 13          | 24,00                | 7,8                         | 6,5                         | 17     | 0,28  |
| 14          | 24,00                | 6,5                         | 5,2                         | 40     | 0,35  |
| 15          | 24,00                | 5,2                         | 3,9                         | 60     | 0,49  |
| 16          | 24,00                | 3,9                         | 2,6                         | 100    | 0,75  |
| 17          | 24,00                | 2,6                         | 1,3                         | 100    | 1,25  |
| 18          | 24,00                | 7,8                         | 5,2                         | 58     | 0,49  |
| 19          | 24,00                | 5,2                         | 2,6                         | 84     | 1,05  |

Tableau II.3.1. - Résultats des essais de gonflement en fonction des contraintes  $\sigma'_i$  et  $\sigma'_f$

### Résultats numériques

L'ensemble des points de mesure expérimentaux est porté en Annexe II.3. L'ensemble des résultats numériques des divers essais effectués est présenté au Tableau II.3.1. pour l'Argile Verte de Villejuif et au Tableau II.3.4. pour les autres sols.

#### II.3.2. - Evolution du taux de gonflement en fonction des contraintes (Argile Verte de Villejuif)

##### II.3.2.1. - Pour une contrainte initiale $\sigma'_i$ constante

VAYSSADE (1978) a montré que pour une contrainte initiale  $\sigma'_i$  constante, le taux de gonflement  $G$  peut être exprimé par la relation

$$G = \frac{A}{1 + \frac{D}{\frac{\sigma'_i - \sigma'_f}{\sigma'_f}}} \quad \text{où } A \text{ et } D \text{ sont des fonctions de } \sigma'_i$$

Cette relation est équivalente à l'équation :  $G / \left( \frac{\sigma'_i - \sigma'_f}{\sigma'_f} \right) = \frac{A}{D} - \frac{1}{D} G$  (1)

qui est une droite dans le système de coordonnées  $(G, G / \left( \frac{\sigma'_i - \sigma'_f}{\sigma'_f} \right))$ .

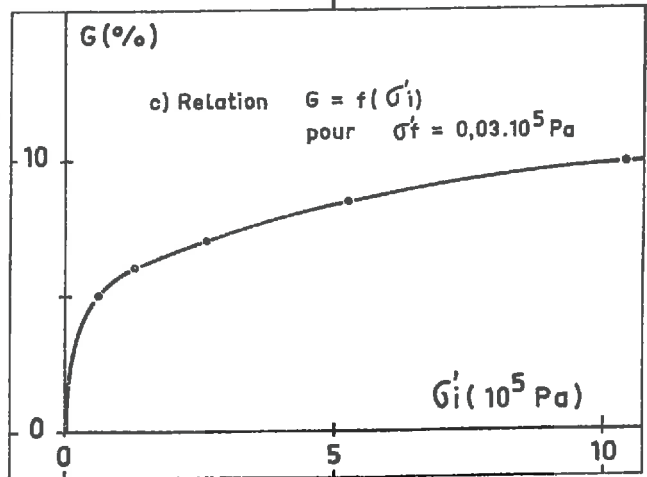
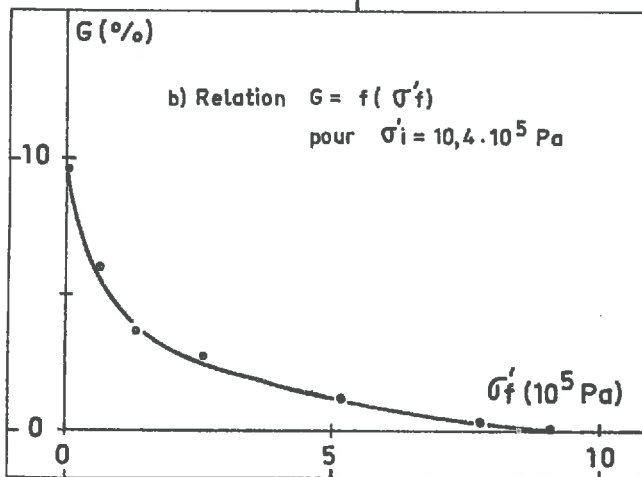
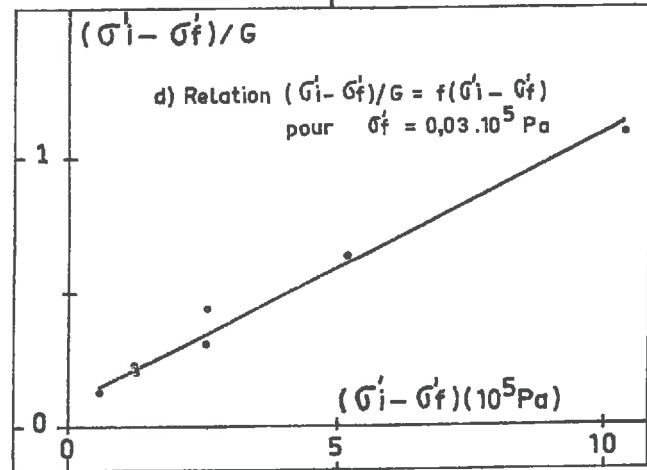
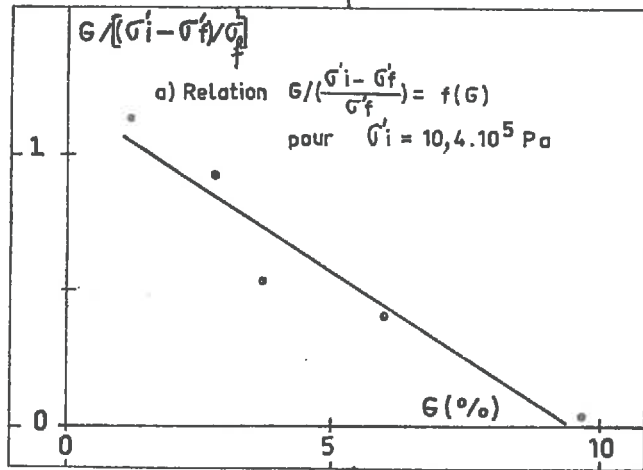
Nous avons représenté, pour les essais que nous avons effectués à  $\sigma'_i = 10,4.10^5 \text{ Pa}$ , la relation entre  $G / \left( \frac{\sigma'_i - \sigma'_f}{\sigma'_f} \right)$  et  $G$  (Figure II.3.3. a).

Nous obtenons avec une assez bonne corrélation la droite d'équation :

$$G / \left( \frac{\sigma'_i - \sigma'_f}{\sigma'_f} \right) = 1,195 - 0,13G$$

corroborant ainsi les conclusions de VAYSSADE.

Fig. II.3.3 — Evolution du taux de gonflement en fonction des contraintes  $\sigma_i$  et  $\sigma_f$ .



De plus, l'examen de la courbe  $G = f(\sigma'f)$  pour  $\sigma'i = 10,4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  (Figure II.3.3.-b) montre que dans cette approche hyperbolique, la relation obtenue pour une contrainte initiale infinie (très forte) doit être de la forme :

$$G_{\sigma'i = \infty}^{\sigma'f} = \frac{1}{u\sigma'f + v} \quad \text{où } u \text{ et } v \text{ sont des constantes} \quad (\text{Figure II.3.4.})$$

Le coefficient  $v$  représente en fait l'inverse du taux de gonflement maximum possible entre une contrainte initiale infinie (s'accompagnant de volume minimum de l'échantillon réalisable sous une contrainte mécanique très forte) et une contrainte finale nulle.

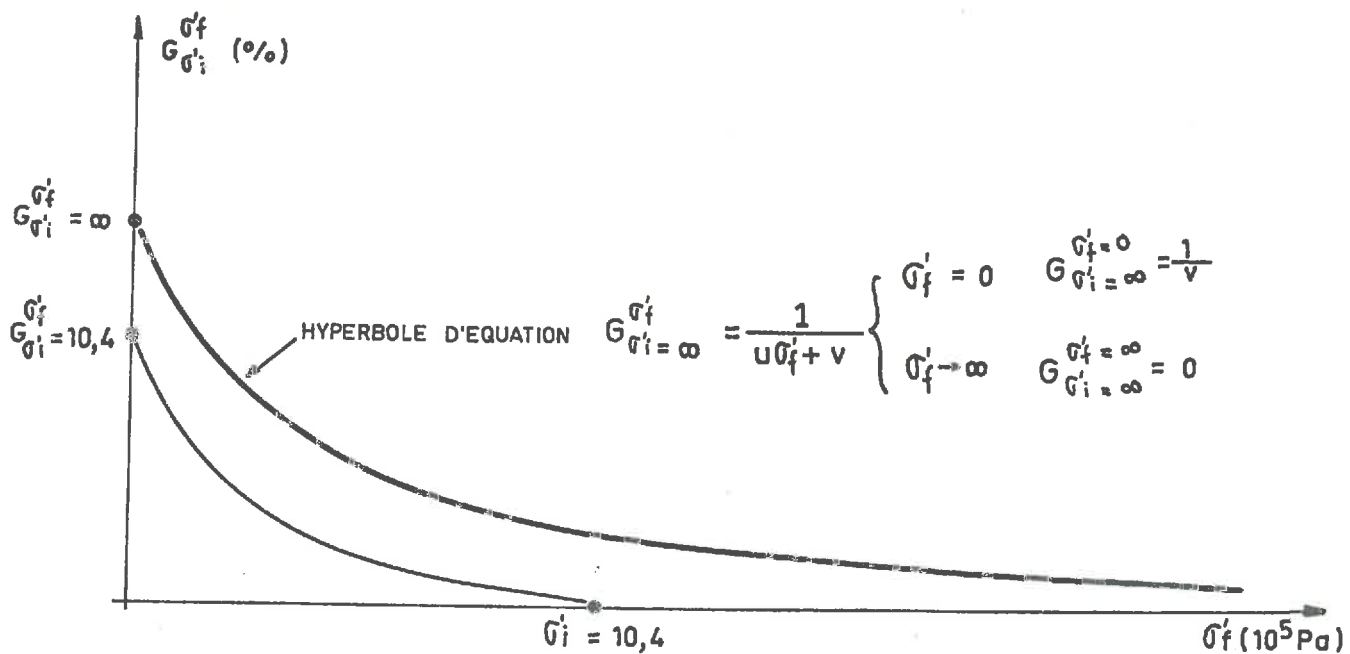


Figure II.3.4. - Représentation hyperbolique de la relation entre le taux de gonflement et la contrainte finale pour une contrainte initiale infinie.



### II.3.2.2. - Pour une contrainte finale $\sigma'f$ constante

La Figure II.3.3. c représente la relation entre  $G$  et  $\sigma'i$  pour une contrainte finale  $\sigma'f$  constante et égale à  $0,03.10^5 \text{Pa}$ . Cette relation a une allure hyperbolique générale de la forme :

$$G = \frac{\sigma'i - \sigma'f}{a(\sigma'i - \sigma'f) + b} \quad (2)$$

Conditions aux limites :

$$\text{. pour } \sigma'i = \sigma'f \quad G = 0$$

$$\text{. pour } \sigma'i \rightarrow \infty \quad G \xrightarrow{\sigma'i \rightarrow \infty} \frac{1}{a}$$

Le coefficient  $a$  est l'inverse du taux de gonflement maximum possible entre une contrainte initiale très grande et la contrainte finale imposée. On remarque que pour une contrainte finale nulle le coefficient  $a$  est égal au coefficient  $v$  précédemment défini.

Cette hypothèse est vérifiée si la relation  $\frac{\sigma'i - \sigma'f}{G} = a(\sigma'i - \sigma'f) + b$  est une droite dans le système des coordonnées  $(\sigma'i - \sigma'f, \frac{\sigma'i - \sigma'f}{G})$ .

Nous avons représenté cette relation à la Figure II.3.3. d, pour les essais que nous avons effectués, et nous obtenons effectivement avec une bonne approximation la droite d'équation :

$$\frac{\sigma'i - \sigma'f}{G} = 0,095 (\sigma'i - \sigma'f) + 0,097$$

Par conséquent, quand la contrainte finale est constante, le taux de gonflement  $G$  peut être exprimé sous la forme :

$$G = \frac{\sigma'i - \sigma'f}{a(\sigma'i - \sigma'f) + b} \quad \text{où } a \text{ et } b \text{ sont des fonctions de } \sigma'f$$

### II.3.2.3. - Détermination d'une relation générale $G = f(\sigma'i, \sigma'f)$

Nous disposons des deux relations suivantes :

. pour  $\sigma'f = \text{constante}$ ,  $\frac{1}{G} = a + \frac{b}{\sigma'i - \sigma'f}$  (3) (relation (2) inversée)

où a et b sont des fonctions de  $\sigma'f$

. pour  $\sigma'i = \text{constante}$ ,  $\frac{1}{G} = c + \frac{d\sigma'f}{\sigma'i - \sigma'f}$  (4)

(relation (1) inversée avec  $c = \frac{1}{A}$  et  $d = \frac{D}{A}$ )

où c et d sont des fonctions de  $\sigma'i$

De plus la fonction  $a(\sigma'f)$  est obtenue aux limites de la relation (3) pour une contrainte initiale infinie. Elle représente en fait l'inverse du taux de gonflement possible entre une contrainte initiale infinie et une contrainte finale variable :

$$a = \frac{1}{G \left|_{\sigma'i = \infty}^{\sigma'f}$$

Or  $\frac{\sigma'f}{G \left|_{\sigma'i = \infty}$  a été défini au Paragraphe II.3.2.1. par la relation :

$$\frac{\sigma'f}{G \left|_{\sigma'i = \infty} = \frac{1}{u\sigma'f + v} \quad \text{où } u \text{ et } v \text{ sont des constantes}$$

Donc la fonction a doit s'exprimer sous la forme :

$$a = \frac{1}{G \left|_{\sigma'i = \infty}^{\sigma'f} = u\sigma'f + v \quad (5)$$

où u et v sont des constantes

Enfin la fonction  $c(\sigma'i)$  est obtenue à partir de la relation (4) pour  $\sigma'f = 0$ . Elle représente en fait l'inverse du taux de gonflement possible entre une contrainte initiale variable et une contrainte finale nulle :

$$c = \frac{1}{G \left|_{\sigma'f = 0}^{\sigma'i}$$

On se place alors dans le cas d'une contrainte finale constante qui est défini par la relation (3) :

$$\frac{1}{\sigma'f=i} = a(\sigma'f) + \frac{b(\sigma'f)}{\sigma'i - \sigma'f}$$

$G_{\sigma'i}$

Pour  $\sigma'f = 0$  cette relation devient :

$$\frac{1}{\sigma'f=0} = a(\sigma'f = 0) + \frac{b(\sigma'f = 0)}{\sigma'i}$$

$G_{\sigma'i}$

Or :  $a = u\sigma'f + v$  donc :  $a(\sigma'f = 0) = v$

Pour simplifier l'écriture posons  $b(\sigma'f = 0) = s = \text{constante}$

Nous en déduisons :

$$c = \frac{1}{\sigma'f=0} = v + \frac{s}{\sigma'i}$$

$G_{\sigma'i}$

(6)

Il est alors possible de remplacer  $a$  par son expression (5) dans la relation (3) et  $c$  par son expression (6) dans la relation (4).

Nous obtenons les deux relations suivantes :

$$\frac{1}{G} = u\sigma'f + v + \frac{b}{\sigma'i - \sigma'f} \quad (7)$$

$$\frac{1}{G} = v + \frac{s}{\sigma'i} + \frac{d\sigma'f}{\sigma'i - \sigma'f} \quad (8)$$

$u, v, s$  sont des constantes, et il reste à déterminer les fonctions  $b(\sigma'f)$  et  $d(\sigma'i)$ .

L'égalité entre les relations (7) et (8) permet d'écrire l'équation :

$$\sigma'f \left( u \sigma'i + \frac{s}{\sigma'i} \right) - (u \sigma'f^2 + s) = d \sigma'f - b$$

Or  $d$  ne dépend que de  $\sigma'i$  et  $b$  ne dépend que de  $\sigma'f$ , donc une solution est obtenue pour :

$$\begin{cases} d = u \sigma'i + \frac{s}{\sigma'i} \\ b = u \sigma'f^2 + s \end{cases}$$

Nous sommes donc en présence d'une relation générale de la forme :

$$\frac{1}{G} = \frac{u \sigma'f \sigma'i + v (\sigma'i - \sigma'f) + s}{\sigma'i - \sigma'f}$$

obtenue en remplaçant  $b$  par son expression dans la relation (7), ou  $d$  par la sienne dans la relation (8)

Soit

$$G = \frac{\sigma'i - \sigma'f}{u \sigma'i \cdot \sigma'f + v (\sigma'i - \sigma'f) + s}$$

#### II.3.2.4. - Détermination des constantes $u, v, s$

Soient  $a_0, b_0, c_0$  et  $d_0$  les valeurs de  $a, b, c$ , et  $d$  déterminées expérimentalement pour  $\sigma'i = 10,4 \cdot 10^5 \text{ Pa}$  et  $\sigma'f = 0,03 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ , nous sommes en présence d'un système de quatre équations à 3 inconnues

$$\begin{cases} a_0 = 0,03 u + v \\ b_0 = (0,03)^2 u + s \\ c_0 = v + \frac{s}{10,4} \\ d_0 = 10,4 + \frac{D}{10,4} \end{cases} \quad \text{soit} \quad \begin{cases} u = (a_0 + d_0 - c_0) / 10,43 \\ v = a_0 - 0,03 u \\ s = b_0 - (0,03)^2 u \end{cases}$$

La vérification des valeurs trouvées pouvant être faite sur la 4ème équation inutile pour la résolution du système. Les résultats expérimentaux ont permis de déterminer :

$$a_0 = 0,097 \quad b_0 = 0,095 \quad c_0 = 0,106 \quad d_0 = 0,837$$

d'où

|                         |
|-------------------------|
| $u = 0,0794 \sim 0,079$ |
| $v = 0,0946 \sim 0,095$ |
| $s = 0,0949 \sim 0,095$ |

Nous avons déterminé  $a_0$   $b_0$   $c_0$  et  $d_0$  à partir des valeurs de  $u$ ,  $v$  et  $s$  pour montrer l'adéquation de la solution trouvée au système de 4 équations à 3 inconnues :

$$a_0 = 0,0973 \quad b_0 = 0,095 \quad c_0 = 0,104 \quad d_0 = 0,$$

les coefficients  $u$   $v$  et  $s$  sont donc bien déterminés.

La relation entre le taux de gonflement  $G$  et les contraintes initiales  $\sigma'_i$  et finale  $\sigma'_f$  peut donc s'écrire :

|                                                                                                   |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\frac{\sigma'_i - \sigma'_f}{0,079 \sigma'_i \sigma'_f + 0,095 (\sigma'_i - \sigma'_f) + 0,095}$ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|

#### II.3.2.5. - Adéquation de la relation proposée avec les valeurs expérimentales

Nous avons recalculé à partir de la relation précédente les valeurs du taux de gonflement  $G$  pour tous les essais effectués, ceux que nous avons utilisés à l'élaboration de cette relation et ceux que nous n'avons pas utilisés (Tableau II. 3.2.).

| N° Essai           | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| G expérimental (%) | 0    | 0.22 | 1.14 | 2.75 | 3.69 | 6.02 | 9.70 | 8.39 | 7.00 | 6.00 |
| G calculé (%)      | 0.17 | 0.38 | 1.07 | 2.64 | 4.53 | 6.34 | 9.56 | 8.75 | 7.46 | 5.76 |
| N° Essai           | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 16   | 17   | 18   | 19   |      |
| G expérimental (%) | 5.08 | 0.13 | 0.28 | 0.35 | 0.49 | 0.75 | 1.25 | 0.49 | 1.05 |      |
| G calculé (%)      | 3.90 | 0.22 | 0.31 | 0.45 | 0.71 | 1.27 | 2.67 | 0.73 | 1.84 |      |

Tableau II. 3.2. - Comparaison entre taux de gonflement expérimental et taux de gonflement calculé à partir de la relation déterminée mathématiquement

La corrélation entre le taux de gonflement  $G$  expérimental et le taux de gonflement  $G$  calculé est satisfaisante (Figure II.3.5). On peut donc en déduire que la relation proposée modélise bien la variation du taux de gonflement  $G$  en fonction des états de contraintes initiaux et finaux.

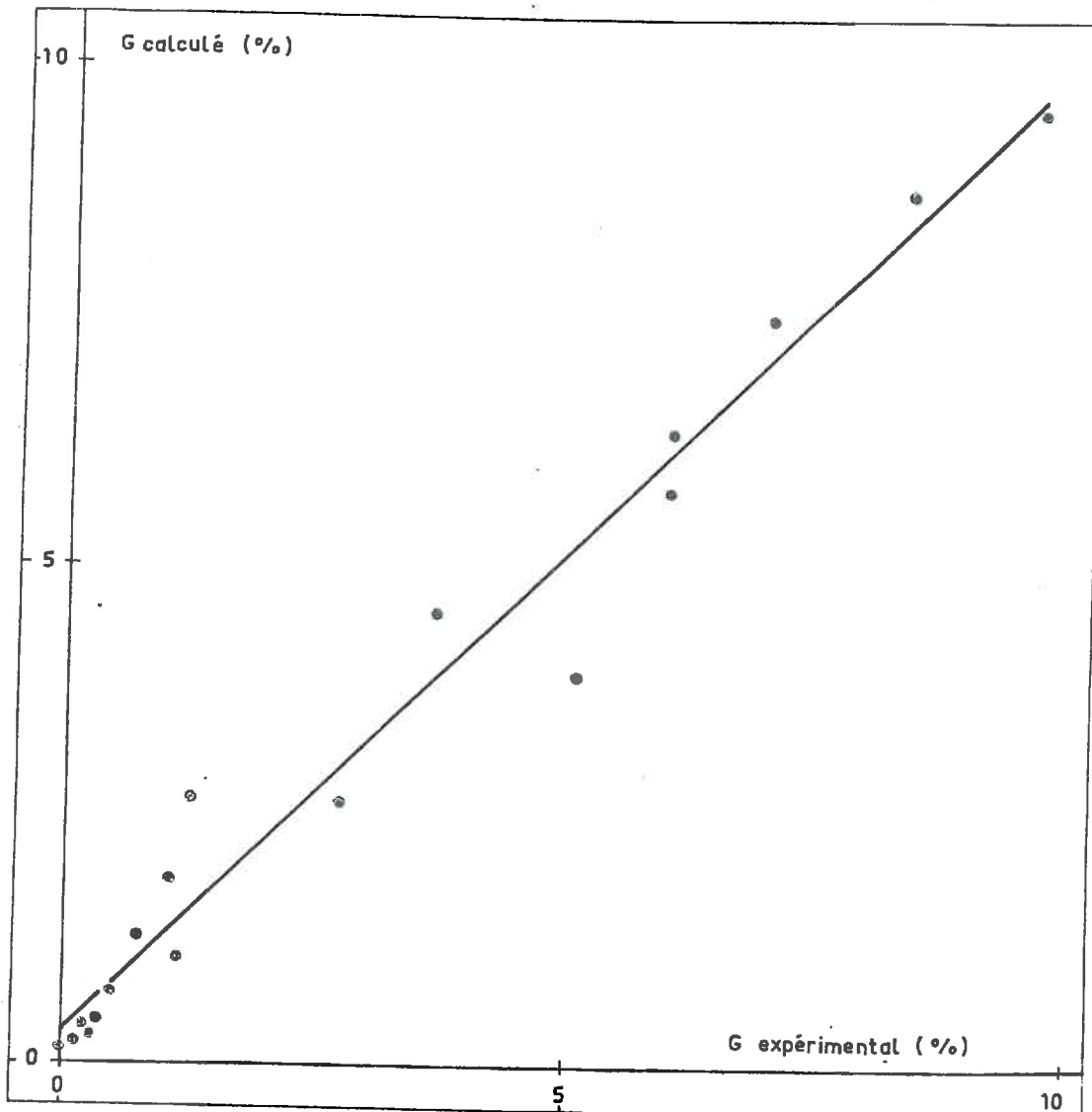


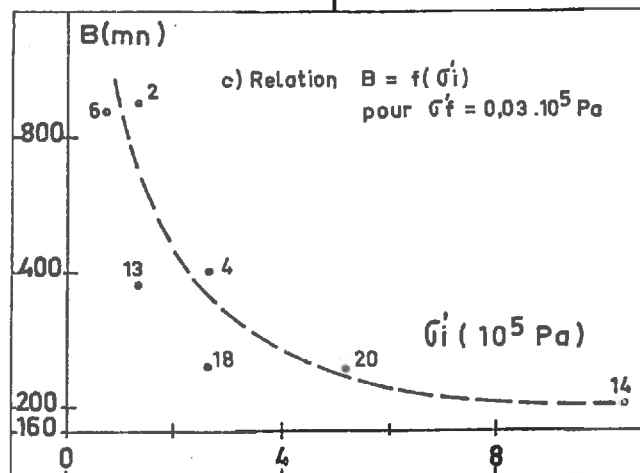
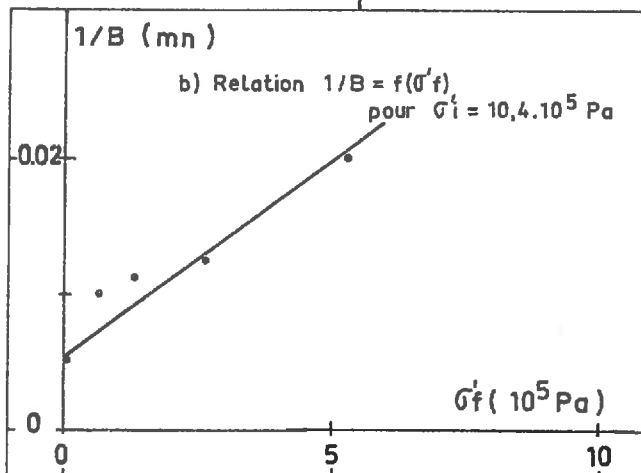
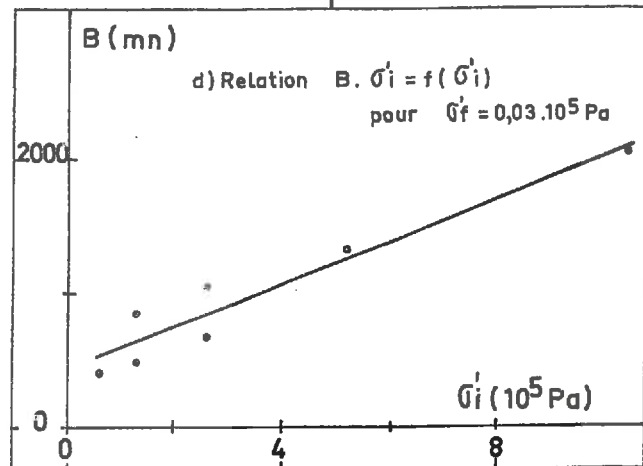
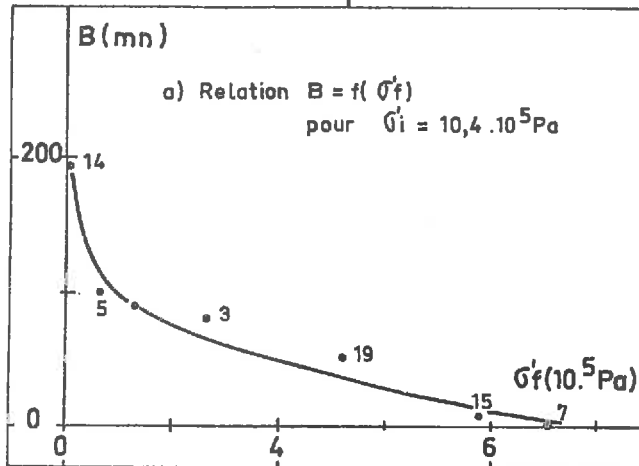
Fig.II.3.5. - Corrélation entre le taux de gonflement  $G$  expérimental et le taux de gonflement  $G$  calculé à partir de la loi de comportement hyperbolique.

### II.3.3. - Evolution du temps de demi-gonflement en fonction des contraintes (Argile Verte de Villejuif)

#### II.3.3.1. - Pour une contrainte initiale $\sigma'_i$ constante

Nous avons représenté à la Figure II.3.6.a la relation entre le temps de demi gonflement  $B$  et la contrainte finale  $\sigma'_f$

Fig.II.3.6 — Evolution du temps de demi-gonflement  $B$ , en fonction des contraintes  $\sigma'_i$  et  $\sigma'_f$ .



pour les essais que nous avons réalisés à  $\sigma'_i = 10.4.10^5$  Pa. La courbe obtenue a une allure générale hyperbolique de la forme :

$$B = \frac{c}{\sigma'f+d} \quad \text{où } c \text{ et } d \text{ sont des fonctions de } \sigma'_i$$

Nous avons vérifié cette relation en portant  $\frac{1}{B}$  en fonction de  $\sigma'f$  (Figure II.3.6.b). Nous obtenons une droite d'équation  $\frac{1}{B} = \frac{d}{c} + \frac{1}{c} \cdot \sigma'f$  équivalente à  $B = \frac{c}{\sigma'f+d}$ .

#### II.3.2.2. - Pour une contrainte finale $\sigma'f$ constante

Nous avons représenté à la Figure II.3.6.c la relation entre le temps de demi gonflement B et la contrainte initiale  $\sigma'_i$ , pour les essais que nous avons réalisés à  $\sigma'f = 0,03.10^5$  Pa. La courbe obtenue a une allure générale hyperbolique de la forme :

$$B = a + \frac{b}{\sigma'_i} \quad \text{où } a \text{ et } b \text{ sont des fonctions de } \sigma'f$$

Quand  $\sigma'_i$  devient très grand B est égal à a qui est le temps de demi-gonflement obtenu pour un déchargement effectué entre une contrainte initiale très forte et la contrainte finale imposée  $\sigma'f$ .

Nous avons vérifié cette relation en portant  $\sigma'.B$  en fonction de  $\sigma'_i$  (Figure II.3.6.d). Nous obtenons une droite d'équation :

$$\sigma'_i.B = a\sigma'_i + b \quad \text{équivalente à} \quad B = a + \frac{b}{\sigma'_i}$$

#### II.3.3.3. - Détermination d'une relation générale $B = G(\sigma'_i, \sigma'f)$

Nous disposons des 2 relations suivantes :

. Pour  $\sigma'f$  constant  $B = a + \frac{b}{\sigma'_i}$  où a et b sont des fonction de  $\sigma'f$

. Pour  $\sigma'_i$  constant  $B = \frac{c}{\sigma'f+d}$  où c et d sont des fonctions de  $\sigma'_i$



Une solution évidente du problème posé est obtenue par la relation :

$$B = \frac{x \sigma' i + y}{\sigma' i (\sigma' f + z)} \quad \text{où } x, y \text{ et } z \text{ sont des constantes}$$

En effet :

Pour  $\sigma' f$  constant  $B = \frac{x}{\sigma' f + z} + \frac{y}{\sigma' f + z} \cdot \frac{1}{\sigma' i} = a + \frac{b}{\sigma' i}$

avec  $a = \frac{x}{\sigma' f + z} \quad b = \frac{y}{\sigma' f + z}$

Pour  $\sigma' i$  constant  $B = \frac{x \sigma' i + y}{\sigma' i} \cdot \frac{1}{\sigma' f + z} = c \cdot \frac{1}{\sigma' f + d}$

avec  $c = \frac{x \sigma' i + y}{\sigma' i} \quad d = z$

L'équation proposée répond donc parfaitement aux conditions imposées par l'interprétation des essais expérimentaux.

On peut remarquer que dans cette relation, quand la contrainte finale  $\sigma' f$  est égale à la contrainte initiale  $\sigma' i$ , c'est-à-dire quand il n'y pas gonflement, le temps de demi-gonflement  $B$  prend une valeur finie :

$$B = \frac{x \sigma' i + y}{\sigma' i (\sigma' i + z)}$$

Ce phénomène, a priori paradoxal, et que l'on ne rencontrait pas dans l'étude du taux de gonflement, est néanmoins explicable. Quand on n'effectue pas de déchargement, il ne se produit pas de gonflement. Le taux de gonflement est donc nul dans tous les cas. Par contre le temps de demi-gonflement  $B$ , lui, n'est pas défini. On peut considérer que le temps de demi-gonflement est nul, car le gonflement, nul, est "instantané". On peut donc aussi bien considérer que le temps de demi-gonflement est infini, car le gonflement, nul, est aussi "infiniment long". On est en présence de la non définition du terme  $B$ , pour  $\sigma' i = \sigma' f$ , qui peut prendre n'importe quelle valeur.

L'équation proposée est donc parfaitement valable sur tout le domaine de définition de  $B$ , à savoir le plan  $(\sigma' i, \sigma' f)$  moins la droite  $\sigma' i = \sigma' f$ .

#### II.3.3.4. - Détermination des constantes x, y, z

Soient  $a_0$ ,  $b_0$ ,  $c_0$  et  $d_0$  les valeurs de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  déterminées expérimentalement pour  $\sigma'_i = 10,4$  et  $\sigma'_f = 0,03$ .

Nous sommes en présence du système d'équations :

$$\left\{ \begin{array}{l} z = d_0 \\ x = a_0 (0,03 + d_0) \\ y = b_0 (0,03 + d_0) \\ 10,4 x + y = 10,4 c \end{array} \right. \quad \text{soit} \quad \left\{ \begin{array}{l} z = d_0 \\ y = \frac{b_0}{a_0} x \\ 10,4 x + \frac{b_0}{a_0} x = 10,4 c \end{array} \right.$$

Les résultats expérimentaux ont permis de déterminer :

$$a_0 = 156 \quad b_0 = 420 \quad c_0 = 351 \quad d_0 = 1,86$$

D'où

$$\boxed{x = 279 \quad y = 750 \quad z = 1,86}$$

La relation existant entre le temps de demi-gonflement  $B$ , et les contraintes initiale  $\sigma'_i$  et finale  $\sigma'_f$ , peut donc s'écrire :

$$\boxed{B = \frac{279 \sigma'_i + 750}{\sigma'_i (\sigma'_f + 1,86)}}$$

#### II.3.3.5. - Adéquation de la relation proposée avec les valeurs expérimentales

Nous avons recalculé, à partir de la relation précédente, les valeurs du temps de demi-gonflement  $B$  pour tous les essais réalisés (Tableau II.3.3.).

| N° Essai            | 1   | 2  | 3  | 4  | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  |
|---------------------|-----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| B expérimental (mn) | 0   | 7  | 50 | 80 | 90  | 100 | 194 | 252 | 330 | 515 |
| B calculé (%)       | 32  | 36 | 50 | 79 | 111 | 140 | 186 | 224 | 300 | 453 |
| N° Essai            | 11  | 12 | 13 | 14 | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  |     |
| B expérimental (mn) | 700 | 4  | 17 | 40 | 60  | 100 | 100 | 58  | 84  |     |
| B calculé (mn)      | 758 | 37 | 44 | 56 | 73  | 105 | 179 | 53  | 95  |     |

Tableau II.3.3. - Comparaison entre temps de demi-gonflement expérimental et temps de demi-gonflement calculé à partir de la relation déterminée mathématiquement.

La corrélation entre le temps de demi-gonflement B expérimental et le temps de demi-gonflement B calculé (Figure II.3.7) est satisfaisante. On peut donc en conclure que la relation proposée modélise bien la variation du temps de demi-gonflement B en fonction des états de contraintes initiaux et finaux

II.3.3.6. - Conclusions concernant l'étude de l'Argile Verte de Villejuif

Pour un type de sol donné, l'Argile Verte de Villejuif, et pour une épaisseur d'échantillon constante, nous avons montré que les contraintes initiales et finales avaient une influence considérable sur le taux de gonflement G et le temps de demi-gonflement B et que les variations de G et de B pouvaient être décrites par les relations :

$$G = \frac{\sigma'_i - \sigma'_f}{u \sigma'_i \sigma'_f + v (\sigma'_i - \sigma'_f) + s} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} u = 0,079 \\ v = 0,095 \\ s = 0,095 \end{cases}$$

$$B = \frac{x \sigma'_i + y}{\sigma'_i (\sigma'_f + z)} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} x = 279 \\ y = 750 \\ z = 1,86 \end{cases}$$

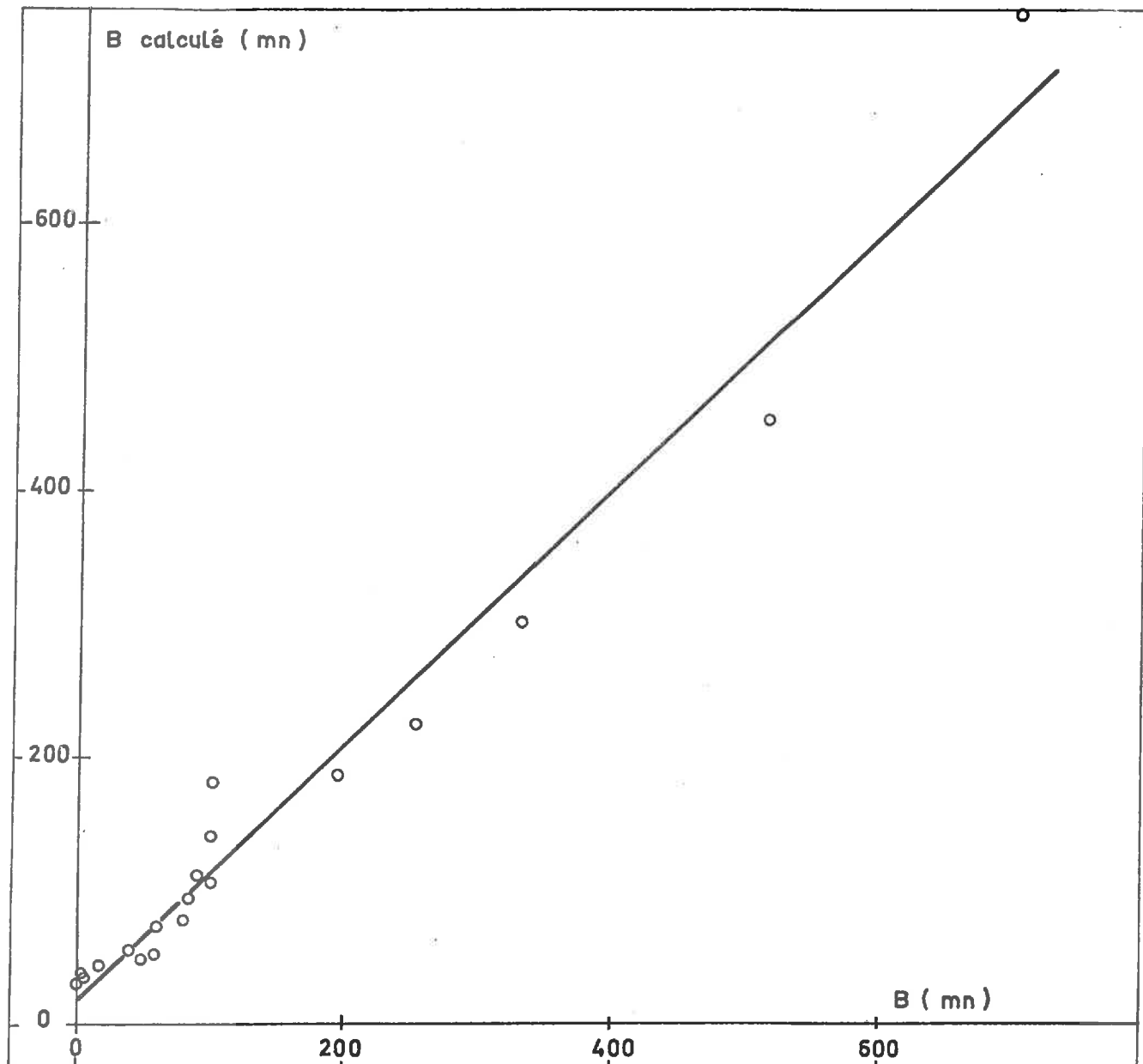


Fig. II.3.7. — Corrélation entre le temps de demi-gonflement  $B$  et le temps de demi-gonflement  $B$  calculé à partir de la loi de comportement hyperbolique .

#### II.3.4. - Application des relations trouvées à d'autres sols

Après avoir déterminé les lois de comportement du gonflement sur un sol type, l'Argile Verte de Villejuif, souvent utilisée par ailleurs dans le cadre d'études portant sur le gonflement des sols argileux, nous avons voulu appliquer ces lois à quelques autres sols.

Il n'a évidemment pas été possible de multiplier le nombre des essais, nous avons donc tenté de vérifier les relations sur quelques essais de déchargement, pour les sols suivants :

- . Argile Plastique Bariolée
- . Fausses Glaises
- . Argile d'Aix-Les-Bains

| ESSAIS DE DECHARGEMENT SUR DIVERS SOLS |                             |                             |      |           |        |           |
|----------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------|-----------|--------|-----------|
| Echantillon                            | $\sigma'_i$<br>( $10^5$ Pa) | $\sigma'_f$<br>( $10^5$ Pa) | G %  | G calculé | B (mm) | B calculé |
| Argile Plastique Bariolée              |                             |                             |      |           |        |           |
| 1                                      | 10,4                        | 5,2                         | 1,25 | 1,27      | 125    | 115       |
| 2                                      | 5,2                         | 2,6                         | 1,45 | 1,46      | 280    | 249       |
| 3                                      | 2,6                         | 1,3                         | 1,40 | 1,40      | 600    | 540       |
| 4                                      | 1,3                         | 0,65                        | 1,14 | 1,12      | 1080   | 1150      |
| Fausses Glaises                        |                             |                             |      |           |        |           |
| 1                                      | 6,5                         | 3,9                         | 0,72 | 0,50      | 58     | 56        |
| 2                                      | 3,9                         | 1,3                         | 1,93 | 1,81      | 132    | 124       |
| 3                                      | 1,3                         | 0,65                        | 1,05 | 2,00      | 220    | 185       |
| 4                                      | 0,65                        | 0,03                        | 4,09 | 4,11      | 250    | 320       |
| Argile d'Aix-Les-Bains                 |                             |                             |      |           |        |           |
| 1                                      | 10,4                        | 5,2                         | 0,40 | 0,25      | 3,5    | 2         |
| 2                                      | 5,2                         | 2,6                         | 0,50 | 0,45      | 4,5    | 4         |
| 3                                      | 2,6                         | 1,3                         | 0,80 | 0,84      | 8,5    | 8,6       |
| 4                                      | 1,3                         | 0,65                        | 0,95 | 1,15      | 19     | 19        |
| 5                                      | 0,65                        | 0,00                        | 5,13 | 4,80      | 84     | 84        |

Tableau II. 3. 4. - Résultats des essais de gonflement en fonction des contraintes  $\sigma'_i$  et  $\sigma'_f$

Fig.II.3.8. —

Corrélation entre le taux de gonflement  $G$  calculé et le taux de gonflement  $G$  expérimental.

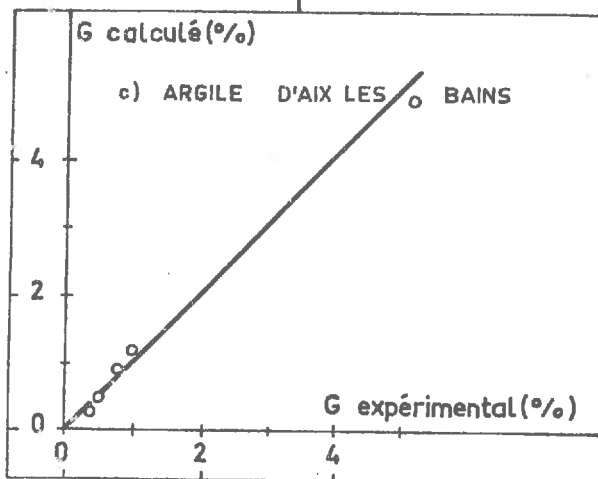
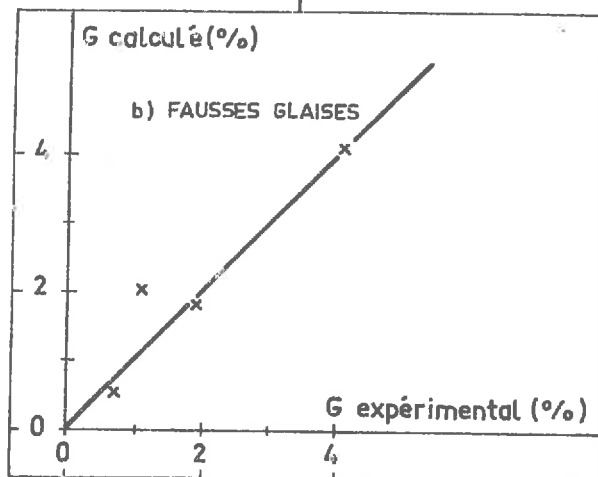
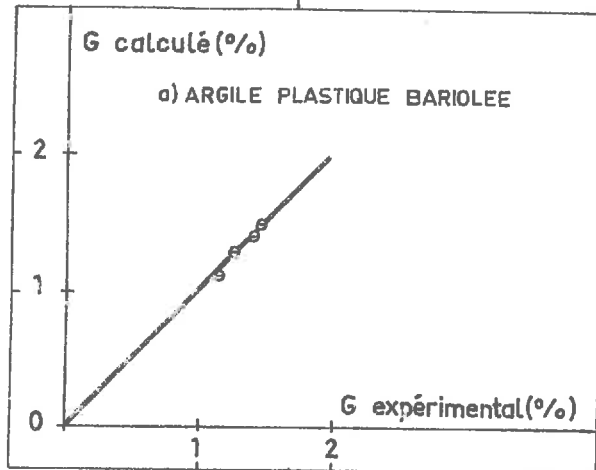
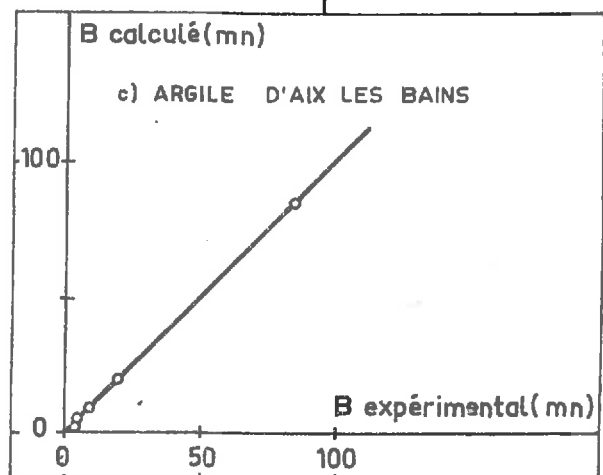
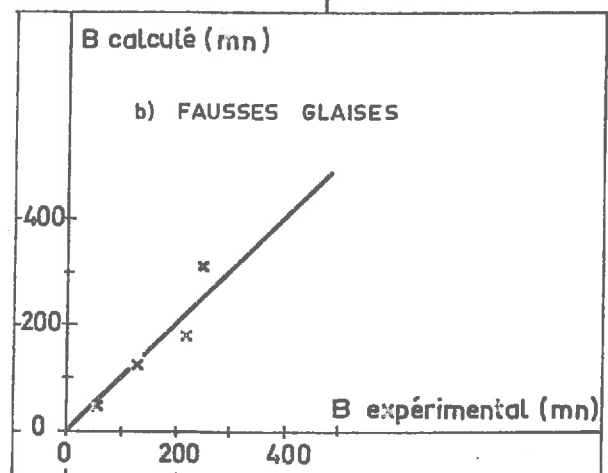
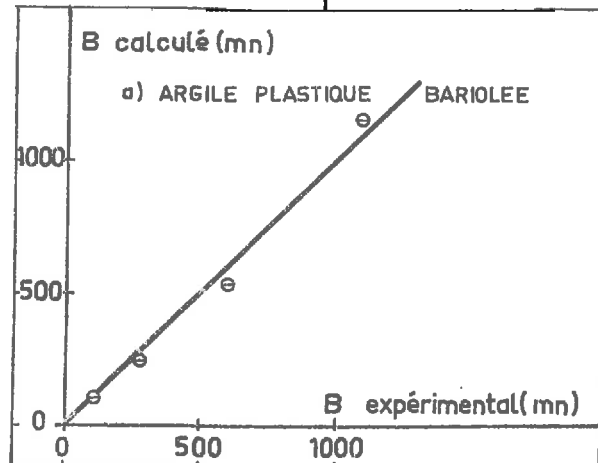


Fig.II.3.9. —

Corrélation entre le taux de demi-gonflement  $B$  calculé et le taux de demi-gonflement  $B$  expérimental.



Nous avons déterminé les relations suivantes :

|                             |                                                                                              |
|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
|                             | $G = \frac{\sigma'i - \sigma'f}{0,03 \sigma'i \sigma'f + 0,42 (\sigma'i - \sigma'f) + 0,28}$ |
| . Argile Plastique Bariolée | $B = \frac{523 \sigma'i + 2740}{\sigma'i (\sigma'f + 1,63)}$                                 |
|                             | $G = \frac{\sigma'i - \sigma'f}{0,11 \sigma'i \sigma'f + 0,14 (\sigma'i - \sigma'f) + 0,06}$ |
| . Fausses Glaises           | $B = \frac{262 \sigma'i + 20}{\sigma'i (\sigma'f + 0,87)}$                                   |
|                             | $G = \frac{\sigma'i - \sigma'f}{0,40 \sigma'i \sigma'f + 0,10 (\sigma'i - \sigma'f) + 0,07}$ |
| . Argile d'Aix-Les-Bains    | $B = \frac{9,40 \sigma'i + 12}{\sigma'i (\sigma'f + 0,33)}$                                  |

La liste des essais effectués et des résultats obtenus, à la fois expérimentaux et calculés, est présentée dans le Tableau II.3.4. Les corrélations entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées G et B, pour chacun des sols, sont présentées aux Figures II.3.8. a à c et II.3.9. a à c. Les relations déterminées sur un assez grand nombre d'essais pour l'Argile Verte de Villejuif se trouvent confirmées pour les trois sols en question.

On remarque que les coefficients numériques de ces relations varient énormément d'un sol à l'autre, preuve que la nature du sol a une influence considérable sur la valeur absolue des paramètres du gonflement.

#### II.3.5. - Conclusions et applications pratiques

Il ressort de cette étude que les paramètres du gonflement taux de gonflement G et temps de demi-gonflement B d'un sol argileux normalement consolidé soumis à un déchargement d'une contrainte initiale  $\sigma'i$  à une contrainte finale  $\sigma'f$ , varient en fonction des contraintes suivant les lois :

$$G = \frac{\sigma' i - \sigma' f}{u \sigma' i \sigma' f + v (\sigma' i - \sigma' f) + s}$$

$$B = \frac{x \sigma' i + z}{\sigma' i (\sigma' f + z)}$$

Les coefficients  $u$ ,  $v$  et  $s$  ne dépendent que de la nature du sol (minéralogie, granulométrie, texture).

Les coefficients  $x$ ,  $y$  et  $z$  dépendent certes de la nature du sol, mais également de l'épaisseur de la couche considérée, car nous avons montré précédemment (§ II.1.) que le temps de demi-gonflement  $B$  est également proportionnel à l'épaisseur  $h_0$  de la couche considérée :  $B = ch_0$ .

#### Application pratique de cette méthode

Cette méthode s'applique évidemment au déchargement d'une couche argileuse par fouille, déblai, démolition d'immeuble, etc. Elle nécessite la détermination numérique de 2 séries de 3 coefficients. Le type d'essai utilisé est l'essai oedométrique classique.

Pour obtenir la meilleure approximation possible sur les valeurs des coefficients il est nécessaire d'encadrer supérieurement et inférieurement les états de contraintes qui seront réalisés in situ. Plus le nombre d'essais effectués est grand et plus sera grande la précision des résultats, mais il semble qu'un nombre de 4 à 5 essais soit suffisant pour obtenir une précision correcte (voir les résultats obtenus pour l'Argile Plastique Bariolée, les Fausses Glaïses et l'Argile d'Aix-Les-Bains).

Cette méthode s'applique à des sols normalement consolidés, mais on peut envisager de l'appliquer également à des sols surconsolidés à condition de connaître les états de contrainte de succion initiale, puisque dans la mesure où le sol reste saturé, une contrainte de succion est équivalente à une contrainte mécanique.

Néanmoins, il serait intéressant qu'une étude expérimentale fine soit effectuée sur des sols surconsolidés pour vérifier cette hypothèse.



## II.4. - CARACTERISATION DU POTENTIEL DE GONFLEMENT A PARTIR DE LA SUCCION DES SOLS

Comme il a été exposé dans le Chapitre I le gonflement d'un sol, saturé ou non, est dû à l'existence d'une succion dans le sol ayant la possibilité de se dissiper en présence d'eau.

Cette succion peut être causée par un déchargement (contrainte mécanique), ou par un séchage (contrainte capillaire). Elle est de plus en relation avec la teneur en eau du sol et avec sa texture.

Si les méthodes de mesure de succion sont très développées aux Etats-Unis et en Australie, elles le sont beaucoup moins en France où seuls les pédologues semblent les employer de façon courante.

C'est pourquoi nous insisterons sur le côté théorique et bibliographique avant de passer aux résultats expérimentaux.

### II.4.1. - Etude théorique et bibliographique

Un sol est composé d'une phase solide, d'une phase liquide et d'une éventuelle phase gazeuse (qui disparaît dans le cas de sols complètement saturés). Mais pendant le gonflement, c'est l'action de l'eau dans le sol qui est déterminante, c'est pourquoi nous parlerons surtout ici des relations entre sol et eau.

#### II.4.1.1. - Le complexe sol-eau

Les relations entre sol et eau sont fondamentales en tant que caractéristiques physiques d'un sol.

Deux approches sont utilisées pour les étudier :

- . l'approche énergétique, basée sur le concept de BUCKINGHAM du potentiel capillaire, et qui inclut d'autres potentiels que le seul potentiel capillaire ;
- . l'approche mécanique, basée sur la théorie de TERZAGHI, qui décrit l'état de l'eau dans le sol en termes de pressions négatives ou succion.

Comme toutes les autres substances, l'eau évolue dans le sens de l'énergie potentielle décroissante, l'énergie cinétique étant négligeable devant l'énergie potentielle.

Le potentiel énergétique total  $\psi$  de l'eau est la somme de trois termes principaux :

$$\psi = \psi_p + \psi_m + \psi_o$$

$\psi_p$  est le potentiel dû à la pression extérieure appliquée, potentiel gravitationnel ou potentiel de surcharge.

$\psi_m$  est le potentiel matriciel. lui-même somme de deux termes : un potentiel capillaire qui obéit aux lois de la capillarité et un potentiel d'adsorption qui figure "la présence d'eau sous forme de films" dans les sols argileux.

$\psi_0$  est le potentiel osmotique qui dépend de la concentration en sels de l'eau du sol. Le potentiel osmotique est a priori généralement négligé devant les autres termes.

D'un point de vue mécanique, la contrainte totale appliquée à l'eau est la somme de trois termes, expressions des différents potentiels :

- . une contrainte extérieure (géostatique ou pression de surcharge) obéissant aux lois de la mécanique des sols
- . une succion matricielle obéissant aux lois de la capillarité
- . une succion osmotique obéissant à la loi de VANT'HOF.

C'est cette contrainte totale qui est appelée classiquement pression interstitielle. La succion matricielle et la succion osmotique sont des pressions négatives alors que la contrainte extérieure est une pression positive. C'est la somme de la succion matricielle et de la succion osmotique qui forme la succion totale de l'eau d'un sol, bien que le plus souvent on néglige la succion osmotique.

La succion d'un sol décrit quantitativement l'interaction entre les particules de sol et l'eau. Elle est la force responsable de la rétention d'eau dans le sol, et mesure la force d'attraction exercée sur l'eau. La succion totale peut être définie comme l'énergie libre présente dans l'eau du sol par rapport à un plan d'eau libre situé à l'extérieur du sol à la même cote. Cette énergie est la source du travail qui est effectué quand l'eau libre entre en contact avec le sol. A l'équilibre suivant le contact entre sol et eau, l'énergie libre est dissipée par le travail nécessaire pour attirer l'eau dans le sol et agrandir son réseau poreux.

Historiquement, la succion des sols est connue de longue date. La caractéristique des sols argileux, bien connue des géologues et qui consiste à "happer à la langue" est la manifestation de cette succion. Cette manifestation est toujours très sensible car, en affleurement, les sols sont en général non saturés et présentent une succion non nulle.

Les premiers travaux concernant l'étude de la succion des sols datent du début du siècle et sont l'oeuvre de BRIGGS, SHANTZ, WILSON, THOMAS, RICHARD, GARDNER, SCHOFIELD. En 1935, SCHOFIELD introduit le terme  $pF$  pour désigner la succion d'un sol, défini comme le logarithme décimal de la charge de pression négative exprimée en centimètres d'eau. Cet auteur avait en effet remarqué que le logarithme du potentiel capillaire est parfois analogue au cologarithme de la concentration en ions hydrogène. Cette notation est maintenant devenue classique et on peut écrire :

$$pF\ 1 = 10\text{ cm d'eau} = 0,01.10^5\text{ Pa} \quad \text{avec } 10^5\text{ Pa} = 1\text{ bar}$$

$$pF\ 2 = 100\text{ cm d'eau} = 0,1.10^5\text{ Pa}$$

$$pF\ 3 = 1000\text{ cm d'eau} = 1.10^5\text{ Pa}$$

$$pF\ 4 = 10.000\text{ cm d'eau} = 10.10^5\text{ Pa}$$

La succion d'un sol saturé varie généralement entre  $pF\ 1$  et  $pF\ 4$ . Il est en effet rare de descendre à des  $pF$  inférieurs à 1 qui représente une épaisseur de terrain inférieure à 5 cm ; de plus, l'étalement entre  $pF\ 1$  et  $pF\ 4$  dépend du degré de surconsolidation du sol.

#### II.4.1.2. - Méthodes de mesure de la succion d'un sol

Deux types de méthodes peuvent être envisagées pour mesurer la succion d'un sol :

- . des méthodes qui permettent d'établir une courbe de rétention d'eau dans le sol. Des paliers de succion sont imposés au sol, et celui-ci évolue pour se mettre en équilibre avec la succion imposée. Ces méthodes ont en général un temps de réponse assez long et engagent des transferts d'eau importants.
- . des méthodes qui permettent de mesurer directement la succion d'un sol à une teneur en eau donnée. Les temps de réponse sont alors assez courts et les transferts d'eau doivent être très faibles afin de ne pas perturber l'état du sol.

##### II.4.1.2.1. - Méthodes permettant l'établissement d'une courbe de rétention d'eau

Elles sont au nombre de trois principales :

- . la première utilise l'application d'une pression pneumatique
- . la seconde utilise l'application d'une pression de vapeur
- . la troisième utilise l'application d'une pression osmotique

##### II.4.1.2.1.1. - Dispositif à pression pneumatique (AUDIGUIER-MARCEL 1979)

L'appareillage en question dérive de l'appareil de RICHARD (1931). Une pression d'air  $p$  est appliquée sur une membrane de cellulose, perméable à l'eau et aux ions mais pas à l'air sur laquelle est placé l'échantillon (Figure II.4.1.)

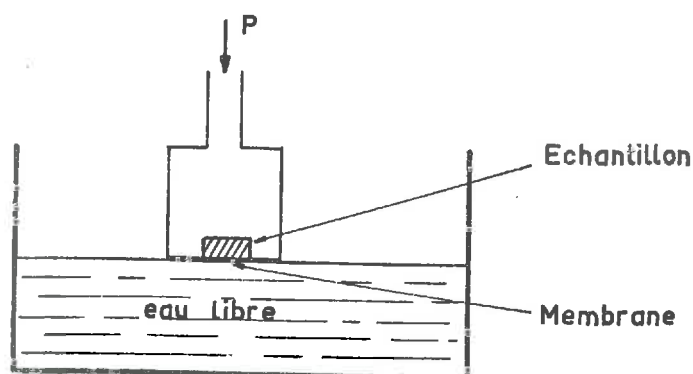


Figure II.4.1. - Schéma de l'appareil de RICHARD

La membrane est en contact avec de l'eau à la pression atmosphérique. Un transfert d'eau se produit alors du sol vers la phase aqueuse (drainage) ou inversement (imbibition). A l'équilibre, chaque palier de pression appliquée correspond à un palier de succion exprimé en  $p_F$  et la mesure de la teneur en eau de l'échantillon permet d'obtenir une courbe de rétention de l'eau en fonction du  $p_F$  imposé, que ce soit en drainage (paliers de pression croissants) ou en imbibition (palier de pression décroissants).

Il faut signaler que la membrane étant perméable à l'eau et aux ions, à l'équilibre la succion osmotique de l'eau du sol est égale à celle de la phase aqueuse libre, et par conséquent ce système impose une succion matricielle au sol.

Expérimentalement on constate que le temps d'équilibrage nécessaire pour un palier de  $p_F$  est d'environ 4 jours, et une courbe complète de rétention d'eau nécessite au moins 40 jours d'essai, ce qui est relativement long.

Cet appareillage permet d'utiliser des pressions allant jusqu'à  $10^6 \text{ Pa}$  ( $p_F 4$ ). Au-delà de  $p_F 4$  il est nécessaire d'utiliser d'autres méthodes.

#### II.4.1.2.1.2. - Dispositif à pression de vapeur (AUDIGUIER-MARCEL, 1979)

Ce dispositif est basé sur la loi de KELVIN : si un liquide remplit partiellement un tube capillaire de rayon  $r$ , la pression de vapeur  $P$  au-dessus du ménisque est inférieure à  $P_0$ ,

tension de vapeur du liquide libre, pourvu que l'angle de contact  $\theta$  entre le liquide et la paroi du capillaire soit inférieur à  $90^\circ$ .

En supposant  $\theta = 0$  la relation peut s'écrire :

$$\frac{2\sigma}{\text{legr}} = - \frac{RT}{Mg} \cdot \text{Log} \frac{P}{P_0}$$

M = masse moléculaire du liquide

R = constante des gaz parfaits

T = température absolue

Les tensions de vapeur exercées sur l'échantillon sont obtenues à l'aide de solutions saturées de divers sols. On peut ainsi obtenir différents paliers de pF selon la solution utilisée (Tableau II.4.1.)

| Solutions                                            | % d'humidité | p F  |
|------------------------------------------------------|--------------|------|
| Eau pure                                             | 100          | 0    |
| CuSO <sub>4</sub> , 5 H <sub>2</sub> O               | 98           | 4,45 |
| Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> , 7 H <sub>2</sub> O | 95           | 4,84 |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> , SO <sub>4</sub>    | 81           | 5,42 |
| NaNO <sub>2</sub>                                    | 66           | 5,75 |
| CaCl <sub>2</sub> , 6 H <sub>2</sub> O               | 36,5         | 6,20 |

Tableau II.4.1. - Succions exercées par différentes solutions  
(d'après TESSIER, 1975)

Chaque type de solution, placée dans une enceinte sous vide contenant un échantillon de sol, détermine un degré d'humidité correspondant à un pF (Tableau II.4.1.), et le sol se met en équilibre avec ce pF par transfert d'eau-vapeur. Il n'y a pas de transfert d'ions, par conséquent cette méthode impose une succion totale (matricielle + osmotique).

Ce dispositif permettant d'obtenir des paliers de pF supérieurs à 4, il est clair qu'il sera peu utilisé pour l'étude de sols saturés.

II.4.1.2.1.3. - Cellule osmotique (KASSIF  
et BEN SHALOM, 1971 -  
OBERMEIER, 1974)

Une pression osmotique est appliquée sur un échantillon de sol par l'intermédiaire d'une solution concentrée en ions polymères de grande taille (Figure II.4.2.).

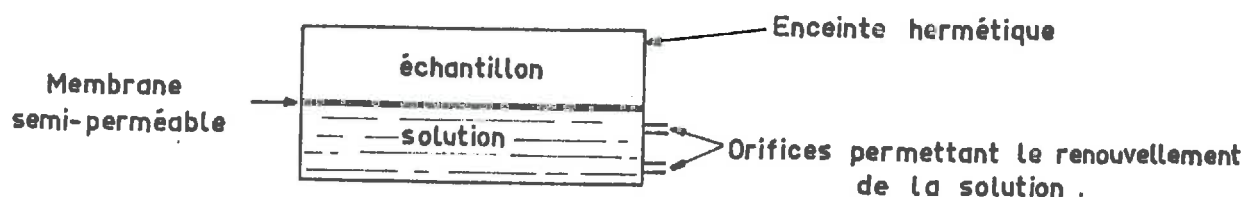


Figure II.4.2. - Schéma d'une cellule osmotique (d'après OBERMEIER)

L'échantillon et la solution sont séparés par une membrane perméable à l'eau et aux ions de l'eau du sol, mais imperméable aux particules de sol et aux macromolécules de la solution.

Un transfert d'eau se produit alors du sol vers la solution (ou inversement selon la concentration de la solution), que l'on renouvelle régulièrement afin que sa concentration soit constante.

A l'équilibre la succion du sol est équivalente à la pression osmotique imposée. En faisant varier par palier la concentration de la solution on fait varier le  $pF$  imposé, et en mesurant à l'équilibre la teneur en eau de l'échantillon pour chaque palier, une courbe de rétention est établie.

Il faut signaler que comme l'appareil de RICHARD, la cellule osmotique mesure la succion matricielle du sol (car la membrane est perméable aux ions de l'eau du sol).

II.4.1.2.2. - Méthodes mesurant directement la succion d'un sol

lement utilisées :

Deux méthodes sont principa-

- . la méthode du papier-filtre
- . le psychromètre

II.4.1.2.2.1. - Méthode du papier-filtre

Un échantillon de sol est placé en contact avec un papier-filtre dont on connaît la courbe de rétention d'eau. A l'équilibre, le potentiel du sol et le potentiel du papier-filtre sont égaux, et la succion du sol est évaluée par la détermination de la teneur en eau du papier-filtre. On obtient ainsi la succion du sol dans son état de référence. Cette méthode ayant été utilisée expérimentalement, elle sera développée plus loin.

II.4.1.2.2.2. - Méthode psychrométrique  
(BAKER, KASSIF, LEVY, 1973 -  
SNETHEN, 1980)

Cette technique permet de mesurer le potentiel d'une phase de vapeur d'eau en équilibre avec le sol. Elle est basée sur l'hypothèse que la vapeur d'eau se comporte comme un gaz parfait, et donc son potentiel à l'équilibre est :

$$\psi = RT \ln H$$

H : humidité relative

P = constante des gaz parfaits

T : température absolue

L'équilibre est ainsi obtenu immédiatement et sans transfert d'eau, et on détermine directement la succion du sol qui est égale au potentiel de la phase de vapeur d'eau. La technique psychrométrique donne de bons résultats pour des succions importantes (sols relativement secs), mais pose des problèmes pour des pF inférieurs à 2 (0,1 bar) en raison des incertitudes introduites par de faibles variations de température.

II.4.1.3. - Etat des potentiels et des contraintes pendant un essai de mesure de succion. Relation avec l'essai classique de consolidation-gonflement

Si l'on applique une succion sur un sol saturé et qu'on fait croître cette succion, il existe une valeur pour laquelle les plus grands pores de l'échantillon commencent à se vider et donc le sol à se désaturer. Cette succion est appelée succion d'entrée d'air ou pression de débouchage.

Dans le cas de phénomènes purement capillaires, cette succion d'entrée d'air est déterminée pour chaque taille de pore par la loi de JURIN. Elle correspond de plus à une teneur en eau du sol égale à la limite de retrait du sol.

Que le milieu soit saturé ou non, on peut raisonner rigoureusement en termes de potentiels pour expliquer l'état de l'eau dans le sol. Prenons l'exemple de l'application d'une pression pneumatique  $p$  sur un échantillon en contact avec une phase d'eau libre (appareil de RICHARD). :

le potentiel de l'eau, nous l'avons vu, est décrit par :  $\psi = \psi_p + \psi_m + \psi_o$

$\psi_p$  étant le potentiel de pression extérieure

$\psi_m$  étant le potentiel matriciel

$\psi_o$  étant le potentiel osmotique

. avant l'application de la pression pneumatique  $p$  :

. le potentiel de l'eau du sol est  $\psi = \psi_m + \psi_o$  car  $\psi = P_{at} = 0$

. le potentiel de la phase d'eau libre est  $\psi^o = \psi^o_o$

car  $\psi^o = P_{at} = 0$  et  $\psi^o_m = 0$  (puisque c'est une phase aqueuse libre)

. quand on applique  $p$  sur l'échantillon :

$\psi$  devient  $\psi' = p + \psi'_m + \psi'_o$

Un transfert d'eau se produit de l'échantillon vers la phase aqueuse et à l'équilibre les potentiels  $\psi'$  de l'eau du sol et  $\psi^o$  de la phase aqueuse sont égaux :  $\psi' = \psi^o$

Soit  $p + \psi'_m + \psi'_o = \psi^o_o$

Or  $\psi'_o = \psi^o_o$  puisque la membrane est perméable aux ions

d'où  $\psi'_m = -p$



A l'équilibre le potentiel matriciel de l'eau du sol est égal au potentiel de pression extérieure appliqué.

Il est possible de raisonner également directement en termes de contraintes mais alors il faut différencier sols saturés et sols non saturés.

. Tant que le sol est saturé, la loi de TERZAGHI s'applique :  $\sigma = \sigma' + u$ , que l'on applique une pression osmotique, une pression pneumatique ou une pression mécanique sur un échantillon, tout se passe comme lors d'un essai de consolidation - gonflement classique. Au début de l'essai, l'eau étant moins compressible que le squelette solide, la pression  $p$  appliquée agit uniquement sur l'eau et développe une pression interstitielle positive. L'eau, ayant possibilité de se drainer, sort de l'échantillon, et à l'équilibre, la pression interstitielle, qui a pu se dissiper complètement, est nulle. Par conséquent à l'équilibre la succion réelle du sol est nulle, mais elle est potentiellement égale à la pression appliquée. Si la pression  $p$  est supprimée, alors le sol va pouvoir développer une succion égale en valeur absolue à  $p$ . Il est donc important de remarquer que dans le domaine saturé, les pressions appliquées pneumatiques ou osmotiques sont équivalentes à des pressions mécaniques, la courbe de  $p$  vs  $F$  est alors similaire, une courbe de consolidation ou de gonflement selon que l'on travaille en drainage ou en imbibition, mais alors que consolidation et gonflement sont classiquement unidimensionnels, drainage et imbibition sont essentiellement tridimensionnels.

. Quand on dépasse la succion d'entrée d'air, l'échantillon de sol se désature, une phase gazeuse (bulles d'air piégées ou film d'air continu) apparaît en plus de la phase liquide. Au potentiel de la phase liquide s'ajoute le potentiel de la phase gazeuse et la succion  $\tau$  du sol est alors :  $\tau = u_a - u_w$ , si  $u_a$  est la pression d'air et  $u_w$  la pression d'eau.

La pression interstitielle est alors différente de la succion du sol.

Une loi est proposée par AITCHISON et BISHOP en 1960 pour exprimer la pression interstitielle, de la forme :

$$u^* = u_a - \chi (u_a - u_w)$$

$u^*$  étant la pression interstitielle équivalente, et  $\chi$  un coefficient compris entre 0 et 1, dépendant du degré de saturation. Dans certaines circonstances idéales  $\chi$  est même directement égal au degré de saturation  $S_r$  (AITCHISON G.D., 1965, 1973).

La mesure de succion des sols est donc une technique doublement intéressante. En effet elle permet d'étudier le comportement des sols à la fois dans le domaine saturé et dans le domaine non saturé, ce que ne permet pas l'emploi d'une contrainte mécanique (essai de consolidation - gonflement classique).

De plus, en ce qui concerne l'étude des milieux saturés, l'emploi de méthodes de mesure directe (psychromètres, papier-filtre) permet de relier le

gonflement à la pression interstitielle négative existant dans l'échantillon de sol étudié, et l'emploi de méthodes de mesure indirecte (appareil de RICHARD, cellule osmotique) permet d'étudier le comportement des sols en consolidation et en drainage à partir d'essais simples, assez rapides à mettre en oeuvre et donnant une bonne précision sur les faibles pressions.

Pour conclure ce paragraphe, il est important de remarquer qu'un état de contraintes donné et ses relations avec les diverses caractéristiques du sol (teneur en eau, gonflement, retrait,...) dépendent du chemin de contrainte utilisé pour y parvenir. En effet on constate (AUDIGUIER-MARCEL, 1979) un phénomène d'hystérésis sur la courbe succion-teneur en eau (Figure II.4.3.) selon que l'on travaille en drainage ( $pF$  croissant) ou en imbibition ( $pF$  décroissant) :

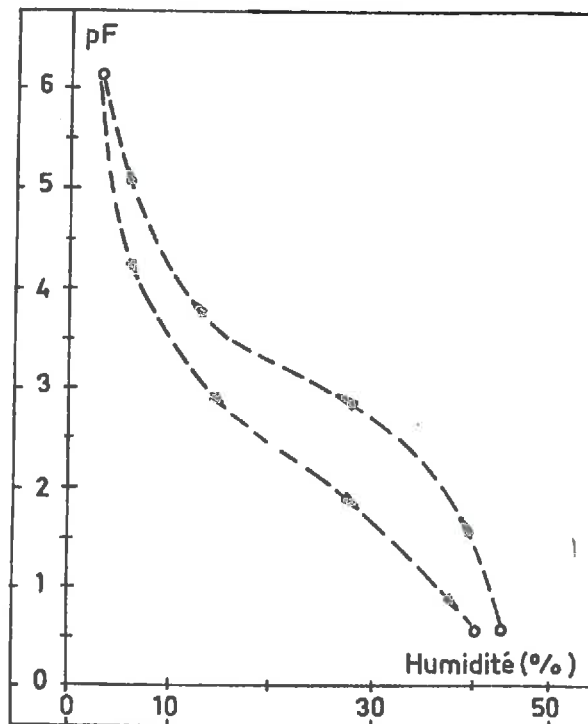


Figure II.4.3. - Hystérésis du phénomène dessiccation-humectation (Limon de Greenville, d'après BAYER, 1940)

La teneur en eau en drainage pour une succion donnée est supérieure à la teneur en eau en imbibition. Il semble qu'en imbibition, sur toute l'énergie correspondant à un niveau de succion, une partie est dépensée en déformation, et une partie est dépensée de façon irréversible (par exemple en chaleur de mouillabilité des solides). Malheureusement, bien que plusieurs auteurs se soient penchés sur ce problème, l'hystérésis est un phénomène encore très mal connu et mériterait des études plus approfondies.

#### II.4.1.4. - Relations entre le gonflement et la succion des sols

L'essentiel des études portant sur la succion des sols ayant eu jusqu'à présent pour objet les sols non saturés, il sera surtout question de sols non saturés dans ce paragraphe. A partir d'une cellule osmotique du type décrit précédemment (échantillon de sol soumis à une succion par l'intermédiaire d'une membrane semi-perméable et d'une solution concentrée en macromolécules), G. KASSIF et A. BENSHALOM (1971), montrent que la pression de gonflement  $P_s$  développée par un sol est fonction de la succion  $\tau$  du sol, selon la relation :  $\tau = \alpha \cdot P_s$

avec  $\alpha > 1$  pour un sol non saturé  
 $\alpha \sim 1$  pour un sol voisin de la saturation

A. KOMORNIK, M. LIVNEH et S. SMUCHA (1980), confirment cette conclusion.

Il est postulé communément maintenant que si la pression de gonflement d'un sol saturé est égale à sa succion (déchargement ou contrainte capillaire), par contre la pression de gonflement d'un sol non saturé est inférieure à sa succion.

La mesure du gonflement vertical d'échantillons de sol soumis à des paliers de succion différents montre que le taux de gonflement croît d'autant plus que la succion décroît, et de plus l'essentiel du gonflement se produit pour des petites valeurs de la succion, entre 0 et  $4 \cdot 10^5$  Pa (Figure II.4.4.).

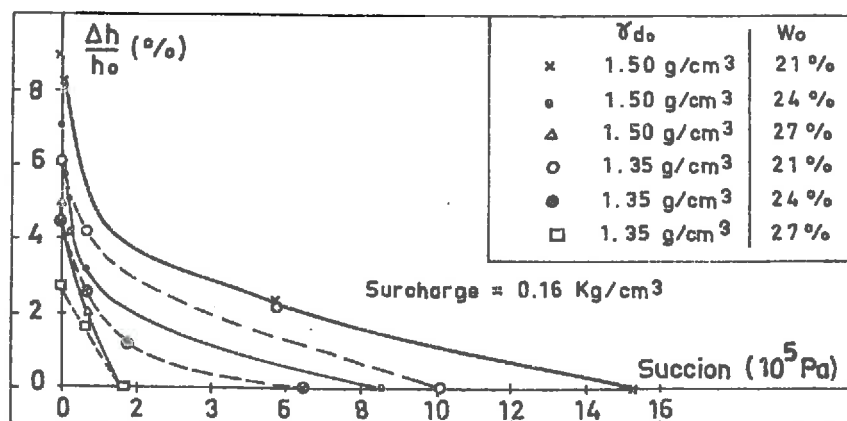


Figure II.4.4. - Relation entre taux de gonflement et succion  
 (d'après KASSIF et BEN SHALOM, 1971)

Le même type d'essais, effectués par V. ESCARIO et J. SAEZ (1973), à partir d'une cellule de type oedométrique permettant l'application d'une pression pneumatique pour contrôler la succion et d'une pression mécanique de surcharge, permet d'obtenir une série de courbes selon la pression de surcharge appliquée,

indiquant les influences respectives des deux types de contraintes sur le gonflement (Figure II.4.5.).

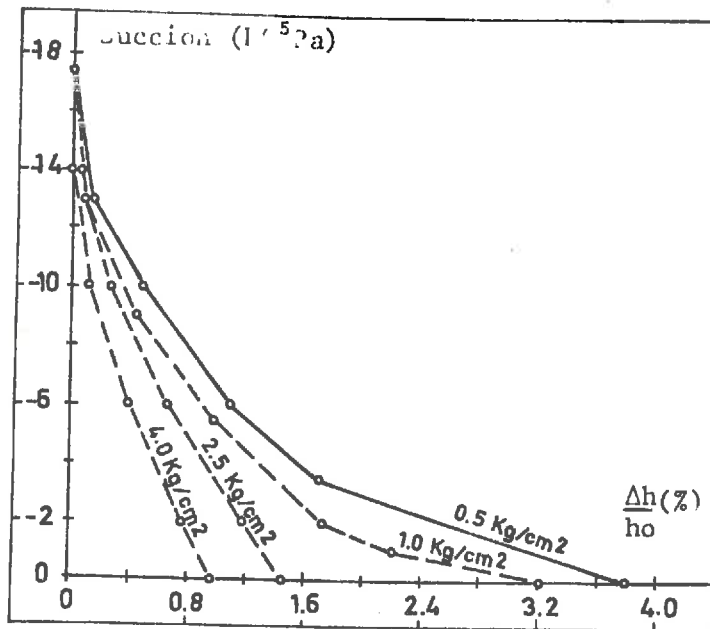


Figure II.4.5. - Influence de la succion et de la pression mécanique de surcharge sur le gonflement (d'après ESCARIO et SAEZ, 1973)

Trois types de contraintes agissant en fait sur l'eau du sol, à savoir la pression de surcharge  $p$ , la succion matricielle  $\tau_m$  et la succion osmotique  $\tau_o$ , un oedomètre a été modifié (AITCHISON et al., 1973) afin de contrôler ces trois composantes.  $P$  est contrôlée par une pression mécanique,  $\tau_m$  par une pression pneumatique, et  $\tau_o$  par une pression osmotique.

Il est ainsi possible de faire varier indépendamment chacune de ces composantes. Quand  $P$  varie, avec  $\tau_m$  et  $\tau_o$  constants, on obtient une courbe de consolidation classique. Quand  $\tau_m$  ou  $\tau_o$  varie, AITCHISON obtient des courbes analogues à une courbe de consolidation, qu'il formule de la façon suivante :

$$\epsilon_p = C_c (\log P_2 - \log P_1) \text{ quand } P \text{ varie avec } \tau_m \text{ et } \tau_o \text{ constants}$$

$$\epsilon_{\tau_m} = I_{\tau_m} (\log \tau_{m2} - \log \tau_{m1}) \text{ quand } \tau_m \text{ varie avec } \tau_o \text{ et } P \text{ constants}$$

$$\epsilon_{\tau_o} = I_{\tau_o} (\log \tau_{o2} - \log \tau_{o1}) \text{ quand } \tau_o \text{ varie avec } \tau_m \text{ et } P \text{ constants}$$

$\epsilon_p$ ,  $\epsilon_{\tau_m}$  et  $\epsilon_{\tau_o}$  sont les déformations observées,

$C_c$  est l'indice de compressibilité classique,  $I_{\tau_m}$  et  $I_{\tau_o}$  ainsi définis sont appelés indices d'instabilité, chaque indice d'instabilité dépendant des valeurs des deux autres paramètres.

En conséquence de quoi le gonflement absolu  $\Delta h$  d'une couche de sol d'épaisseur  $Z$  est évalué par intégration des trois relations précédentes entre 0 et  $Z$ .

A partir de la mesure directe de la succion des sols à l'aide de la technique psychrométrique, D. SNETHEN (1979, 1980) montre que le  $pF$  d'un sol naturel non saturé est en relation linéaire avec sa teneur en eau :

$$pF = \log \tau_m = A - Bw$$

Le taux de gonflement unidimensionnel d'une couche de sol argileux peut alors être estimé par l'équation :

$$\frac{\Delta h}{h_o} = \frac{C\tau}{1+e_o} \left| (A - Bw_o) - \log (\tau_{mf} + \alpha \cdot \sigma_f) \right|$$

$e_o$  : indice des vides initial

$w_o$  : teneur en eau initiale

$\tau_{mf}$  : succion finale

$\sigma_f$  : pression de surcharge finale

$\alpha$  est un coefficient de compressibilité volumique

$C\tau$  est l'indice de succion calculé par  $C\tau = \frac{\alpha \cdot \gamma_s}{100 \cdot B}$

$\alpha$  est estimé à partir de l'indice de plasticité  $I_p$  du sol par :

$$- I_p < 5 \quad \alpha=0 \quad - I_p > 40 \quad \alpha=1 \quad - 5 < I_p < 40 \quad \alpha=0,0275 I_p - 0,125$$

Contrairement aux méthodes indirectes de contrôle de la succion dont les courbes de rétention d'eau présentent une hystérésis entre la phase de drainage et la phase d'imbibition, les méthodes directes comme la technique psychrométrique font apparaître une relation unique linéaire, entre  $pF$  et teneur en eau. En effet comme il n'y a pas (ou très peu) de dissipation d'énergie (pas de modification de l'état du sol), il ne peut y avoir d'hystérésis.

#### II.4.2. - Comportement des sols en drainage et en imbibition : utilisation de l'appareil de RICHARD

Bien que notre thème de recherche soit exclusivement consacré au gonflement des sols (c'est-à-dire à la phase d'imbibition), nous serons amenés, dans ce paragraphe, à effectuer également quelques commentaires sur

le comportement des sols en drainage. L'étude expérimentale suivante a pour but d'étudier le comportement de quelques sols en drainage et en imbibition, sous l'action de suctions imposées par pression pneumatique. Les essais sont similaires à des essais de type oedométriques, car on reste dans le domaine saturé, mais l'appareillage utilisé est complètement différent, et en particulier la diminution de volume sous l'effet du drainage est tridimensionnelle. Enfin signalons que cette étude est surtout d'ordre qualitatif et vise à resituer les travaux sur le gonflement dans le cadre plus général du comportement des sols en présence d'eau.

#### II.4.2.1. - Description du dispositif expérimental et mode opératoire

L'appareillage utilisé a été mis au point par AUDIGUIER-MARCEL (1979) à partir des travaux antérieurs de TESSIER (1975). Nous nous bornerons donc ici à donner les schémas des dispositifs en question.

- Pour des suctions comprises entre 0 et  $10^5$  Pa, la pression pneumatique utilisée est une pression d'air comprimé et on utilise le dispositif décrit à la Figure II.4.6.

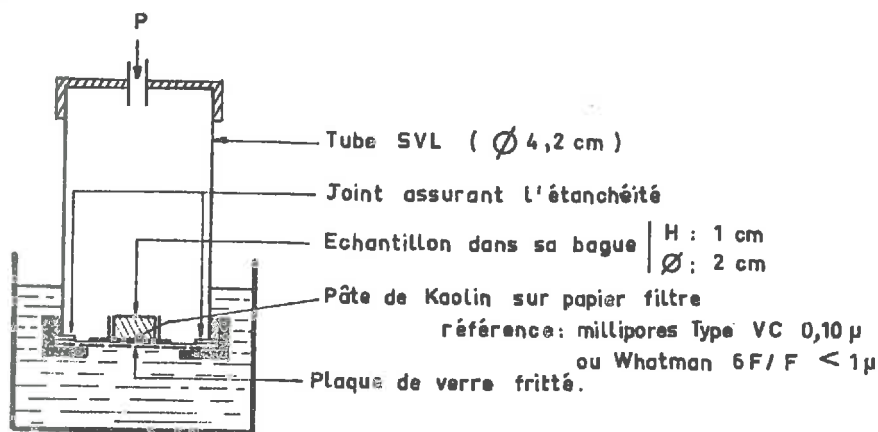


Figure II.4.6. - Schéma d'une cellule à pression d'air comprimé

- Pour des suctions comprises entre  $10^5$  et  $10^6$  Pa, la pression pneumatique appliquée est une pression d'azote industriel, et on utilise le dispositif décrit à la Figure II.4.7.

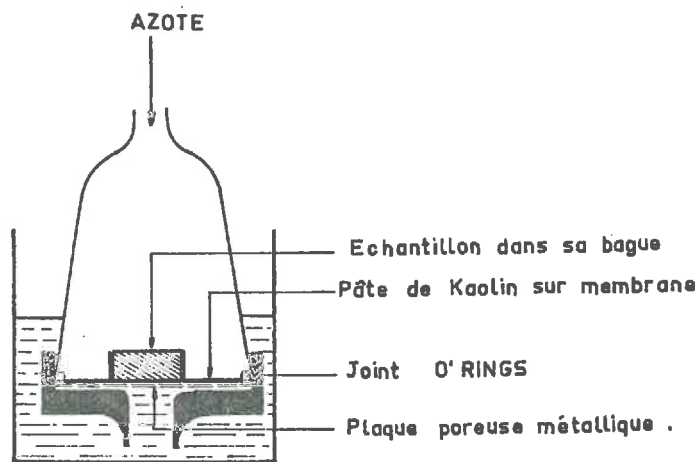


Figure II.4.7. - Schéma d'une cellule à pression d'azote

- . Si la nécessité d'imposer des succions supérieures à  $10^6$  Pa se fait sentir, l'usage d'une pression pneumatique pose alors quelques problèmes d'étanchéité, et on emploie un dispositif à pression de vapeur par l'intermédiaire de solutions salines (Figure II.4.8.).

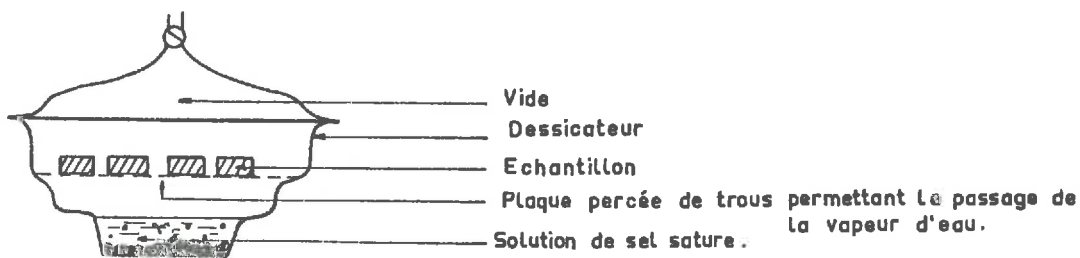


Figure II.4.8. - Schéma d'une cellule à pression de vapeur

#### MODE OPERATOIRE

L'échantillon est soigneusement taillé et arasé aux dimensions d'une bague en laiton de diamètre 2 cm et de hauteur 1 cm, puis introduit dans celle-ci. Il est ensuite placé à l'intérieur du dispositif expérimental et la pression choisie est appliquée.

Au bout de 4 jours, l'équilibre est atteint et l'échantillon est pesé. On procède alors à un second palier de pression. Quand l'essai est terminé, c'est-à-dire quand tous les paliers de pression désirés ont été effectués, l'échantillon est mis à l'étuve à 105° pendant 24 heures puis pesé afin de déterminer conventionnellement son "poids sec". Sa teneur en eau à l'équilibre de chaque palier de pression est alors calculée.

#### II.4.2.2. - Essais effectués

Nous avons voulu, à l'aide de ce dispositif, déterminer les relations entre succion imposée et teneur en eau (courbes de rétention d'eau), pour des échantillons d'un même sol possédant des teneurs en eau initiales voisines (répétitivité de l'essai) ou sensiblement différentes (influence de la teneur en eau initiale).

Les échantillons sont préparés à partir d'essais de gonflement unidimensionnel de type oedométrique tels que nous les avons décrits dans les § précédents (II.1 et II.2). Chaque teneur en eau initiale pour l'essai de succion est donc caractéristique d'un taux de gonflement par rapport à la teneur en eau naturelle du sol.

Trois types de sol ont été testés : l'Argile Plastique de Provins, les Fausses Glaises, et l'Argile Verte de Villejuif. Chacun des dispositifs expérimentaux décrits possédant 5 cellules, il est possible d'effectuer au maximum 5 essais simultanément. Il a été ainsi procédé à deux séries de 5 essais sur des échantillons à teneur en eau initiale variant entre 30 et 38 % pour l'Argile de Provins, à une série de 4 essais sur des échantillons à teneur en eau initiale comprise entre 38 et 41 % pour les Fausses Glaises et à une série de 5 essais sur des échantillons à teneur en eau initiale variant entre 30 et 36 % pour l'Argile Verte de Villejuif.

#### Description d'une série d'essais

Au maximum 5 échantillons d'un même sol sont préparés, à des teneurs en eau voisines ou sensiblement différentes. Ils sont alors introduits chacun dans une cellule, et un premier palier de pression est appliqué, identique pour tous les échantillons. Ce palier est choisi suffisamment faible pour que le premier transfert d'eau soit une imbibition. A partir du second palier, le transfert d'eau est un drainage. On réalise ainsi une courbe de drainage, par paliers de pression croissants, en utilisant le même chemin de contrainte pour tous les échantillons. Le drainage est stoppé avant la pression de débouchage des pores (ou limite de retrait  $W_R$ ), et une courbe d'imbibition est alors réalisée par paliers de pression décroissants.



### II.4.2.3. - Résultats

L'essai ainsi pratiqué permet d'obtenir une courbe de rétention d'eau qui donne la teneur en eau à l'équilibre de l'échantillon sous chaque palier de pression appliqué, en drainage et en imbibition.

La succion appliquée est exprimée en pF, c'est-à-dire en logarithme de pression exprimée en cm d'eau. La courbe obtenue est donc la courbe représentative de la relation  $w = f(pF)$ .

Les résultats numériques des essais (Tableaux II.4.2. a et b) et les courbes de rétention (Figures II.4.9. a à c) sont regroupés dans les pages suivantes.

Les essais sont interprétés sol après sol, en raison des différences de comportement observées d'un sol à l'autre et une conclusion regroupe nos observations.

### II.4.2.4. - Interprétation des résultats

#### II.4.2.4.1. - Argile Plastique de Provins

Le premier palier de pression appliqué étant choisi en phase d'imbibition, on constate que les échantillons d'une même série ne présentent pas la même teneur en eau à l'équilibre de ce premier palier (Tableau II.4.3.).

| Echantillon                           | SERIE 1 |      |      |      |      | SERIE 2 |      |      |      |      |
|---------------------------------------|---------|------|------|------|------|---------|------|------|------|------|
|                                       | 1       | 2    | 3    | 4    | 5    | 1       | 2    | 3    | 4    | 5    |
| w initiale (%)                        | 36,2    | 36,0 | 34,5 | 31,9 | 30,4 | 37,5    | 35,8 | 33,7 | 31,9 | 30,5 |
| w à l'équilibre du premier palier (%) | 39,7    | 40,1 | 39,5 | 38,9 | 37,0 | 39,2    | 37,7 | 35,8 | 35,1 | 34,8 |

Tableau II.4.3. - Teneurs en eau initiale et à l'équilibre du 1er palier de succion

|           |    | SERIE 1 |      |      |      |      | SERIE 2 |      |      |      |      |      |                         |
|-----------|----|---------|------|------|------|------|---------|------|------|------|------|------|-------------------------|
|           |    | 1       | 2    | 3    | 4    | 5    | 1       | 2    | 3    | 4    | 5    |      |                         |
| initiale  |    | 36,2    | 36,0 | 34,5 | 31,9 | 30,4 | 37,5    | 35,8 | 33,7 | 31,9 | 30,5 |      |                         |
| h en<br>a | pF |         |      |      |      |      |         |      |      |      |      | pF   | succion<br>en $10^5$ Pa |
| 0,7       |    | 39,7    | 40,1 | 39,5 | 38,9 | 37,0 | 39,2    | 37,7 | 35,8 | 35,1 | 34,8 | 1,90 | 0,08                    |
| 1         |    | 39,4    | 40,1 | 39,3 | 38,9 | 37,0 | 38,2    | 38,0 | 36,1 | 35,1 | 34,6 | 2,30 | 0,2                     |
| 1,3       |    | 39,4    | 40,1 | 38,8 | 38,9 | 37,0 | 36,0    | 36,0 | 34,2 | 34,2 | 33,5 | 2,78 | 0,6                     |
| 1,6       |    | 39,4    | 40,1 | 38,8 | 38,9 | 37,0 | 33,3    | 33,2 | 31,4 | 32,6 | 31,2 | 3,18 | 1,5                     |
| 1,9       |    | 39,4    | 40,1 | 38,8 | 38,9 | 37,0 | 30,6    | 31,2 | 29,3 | 31,4 | 29,6 | 3,48 | 3                       |
| 2,29      |    | 37,7    | 38,9 | 37,1 | 37,6 | 36,1 | 31,4    | 32,0 | 30,4 | 30,7 | 30,5 | 3,18 | 1,5                     |
| 2,52      |    | 37,4    | 37,9 | 35,9 | 37,1 | 35,2 | 32,1    | 32,7 | 31,4 | 31,4 | 31,5 | 2,90 | 0,789                   |
| 2,77      |    | 35,5    | 36,8 | 34,9 | 36,0 | 34,2 | 33,8    | 34,1 | 32,8 | 32,8 | 32,8 | 2,42 | 0,263                   |
| 2,93      |    | 34,7    | 35,6 | 34,0 | 35,5 | 33,8 | 34,3    | 34,9 | 33,5 | 32,5 | 33,5 | 2,12 | 0,132                   |
| 3,01      |    | 33,0    | 34,4 | 33,0 | 34,6 | 33,1 | 35,3    | 35,8 | 34,4 | 33,9 | 34,2 | 1,78 | 0,06                    |
| 3,18      |    | -       | -    | -    | 32,8 | 30,8 | 37,8    | 38,5 | 36,3 | 36,7 | 37,6 | 1    | 0,01                    |
| 3,30      |    | -       | -    | -    | 32,4 | 30,4 |         |      |      |      |      |      |                         |
| 3,47      |    | -       | -    | -    | 29,9 | 28,3 |         |      |      |      |      |      |                         |
| 3,01      |    | 33,0    | 34,4 | 33,0 | 31,0 | 29,9 |         |      |      |      |      |      |                         |
| 2,77      |    | 34,2    | 35,1 | 34,2 | -    | -    |         |      |      |      |      |      |                         |
| 2,42      |    | 35,0    | 35,8 | 35,2 | 33,0 | 31,5 |         |      |      |      |      |      |                         |
| 1,90      |    | 35,5    | 36,3 | 35,9 | 34,6 | 33,1 |         |      |      |      |      |      |                         |
| 1,60      |    | 36,0    | 36,5 | 36,4 | -    | -    |         |      |      |      |      |      |                         |
| 1,3       |    |         |      |      | 35,9 | 34,9 |         |      |      |      |      |      |                         |

Tableau II.4.2. - Résultats des essais de succion

(a) Argile Plastique de Provins

|                                |      | Fausses Glaises |      |      |      | Argile Verte |      |      |      |      |                                  |    |
|--------------------------------|------|-----------------|------|------|------|--------------|------|------|------|------|----------------------------------|----|
| chantillon                     |      | 1               | 2    | 3    | 4    | 1            | 2    | 3    | 4    | 5    |                                  |    |
| w initiale                     |      | 41,2            | 40,2 | 39,7 | 38,0 | 36,4         | 32,3 | 30,3 | 30,3 | 30,5 |                                  |    |
| ccion en<br>10 <sup>5</sup> Pa | pF   |                 |      |      |      |              |      |      |      |      | succion<br>en 10 <sup>5</sup> Pa | pF |
| 0,04                           | 1,60 | 42,8            | 42,9 | 42,7 | 43,2 | 37,9         | 34,6 | 34,1 | 33,8 | 34,5 | 2                                | 0  |
| 0,08                           | 1,90 | 42,8            | 42,9 | 42,7 | 43,0 | 36,9         | 34,2 | 33,4 | 33,3 | 34,1 | 2,48                             | 0  |
| 0,26                           | 2,41 | 42,2            | 41,2 | 42,2 | 42,8 | 34,5         | 33,3 | 31,7 | 32,7 | 33,0 | 3                                | 1  |
| 0,78                           | 2,89 | 40,9            | 40,4 | 41,0 | 42,3 | 31,2         | 30,1 | 28,6 | 29,9 | 29,9 | 3,48                             | 3  |
| 1,5                            | 3,18 | 38,9            | 37,9 | 39,8 | 41,3 | 28,6         | 27,6 | 26,8 | 27,9 | 27,9 | 3,78                             | 6  |
| 3,0                            | 3,48 | 37,1            | 36,2 | 38,5 | 39,1 | 30,2         | 29,2 | 28,1 | 29,0 | 29,4 | 3,48                             | 3  |
| 5,0                            | 3,78 | 35,8            | 32,9 | 38,0 | 37,4 | 32,9         | 31,5 | 30,3 | 30,9 | 31,2 | 3                                | 1  |
| 8,18                           | 4,45 | 24,1            | 22,0 | 26,4 | 26,8 | 34,1         | 32,6 | 31,9 | 31,8 | 32,5 | 2,48                             | 0  |
| 10,0                           | 3,70 | 33,9            | 32,6 | 35,9 | 38,1 | 35,2         | 33,5 | 33,0 | 32,7 | 33,4 | 2                                | 0  |
| 13,0                           | 3,48 | 36,5            | 34,5 | 38,3 | 39,8 |              |      |      |      |      |                                  |    |
| 16,0                           | 3,0  | 39,9            | 39,0 | 41,0 | 42,5 |              |      |      |      |      |                                  |    |
| 20,5                           | 2,70 | 40,2            | 39,3 | 41,2 | 42,5 |              |      |      |      |      |                                  |    |
| 25,211                         | 2,32 | 40,4            | 39,3 | 41,7 | 43,0 |              |      |      |      |      |                                  |    |
| 30,100                         | 2    | 41,2            | 39,8 | 42,5 | 42,5 |              |      |      |      |      |                                  |    |

Tableau II.4.2. - Résultats des essais de succion

(b) Fausses Glaises et Argile Verte de Villejuif

(a)

## ARGILE DE PROVINS

SERIE .1.

SERIE .2.

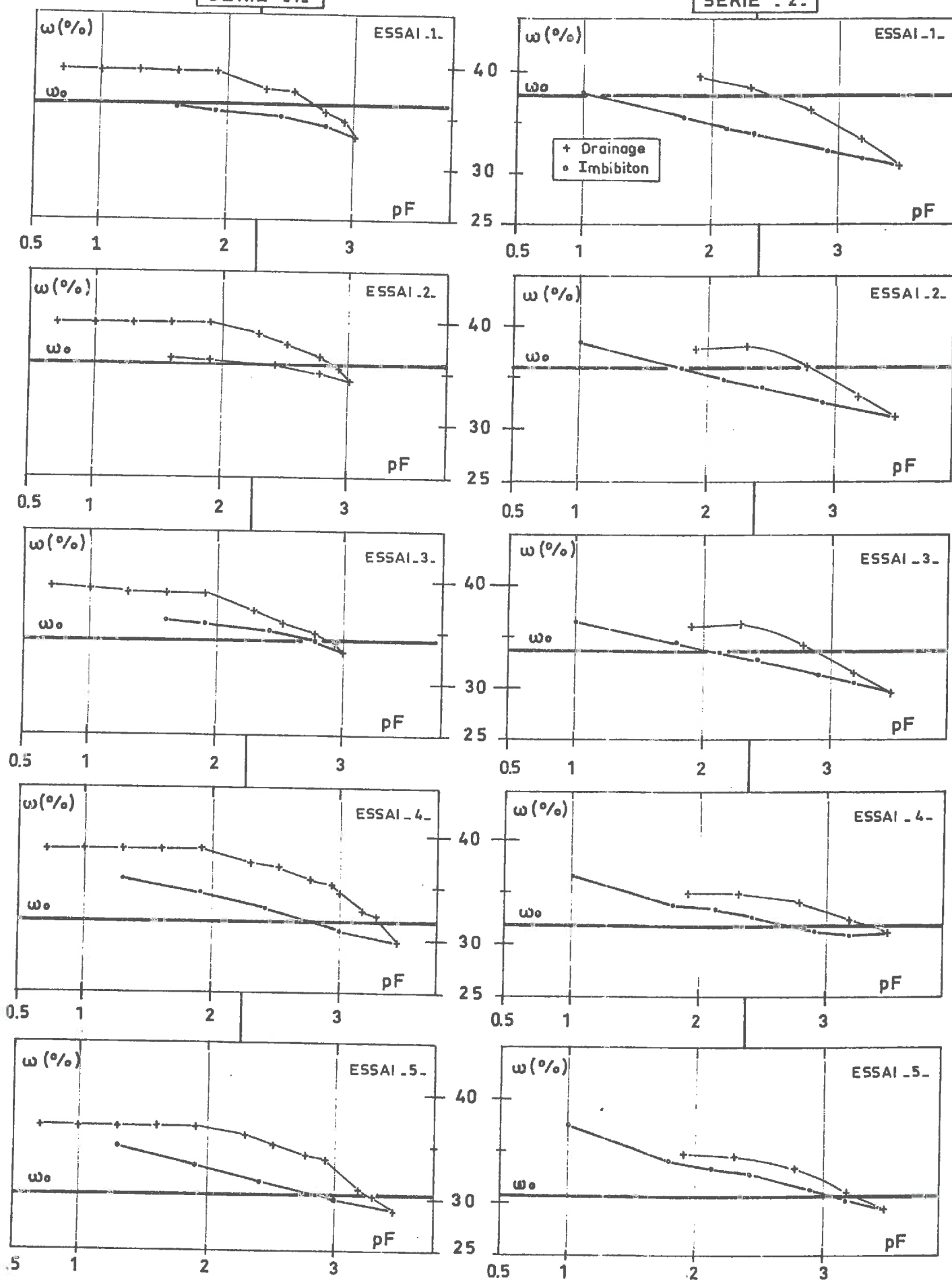
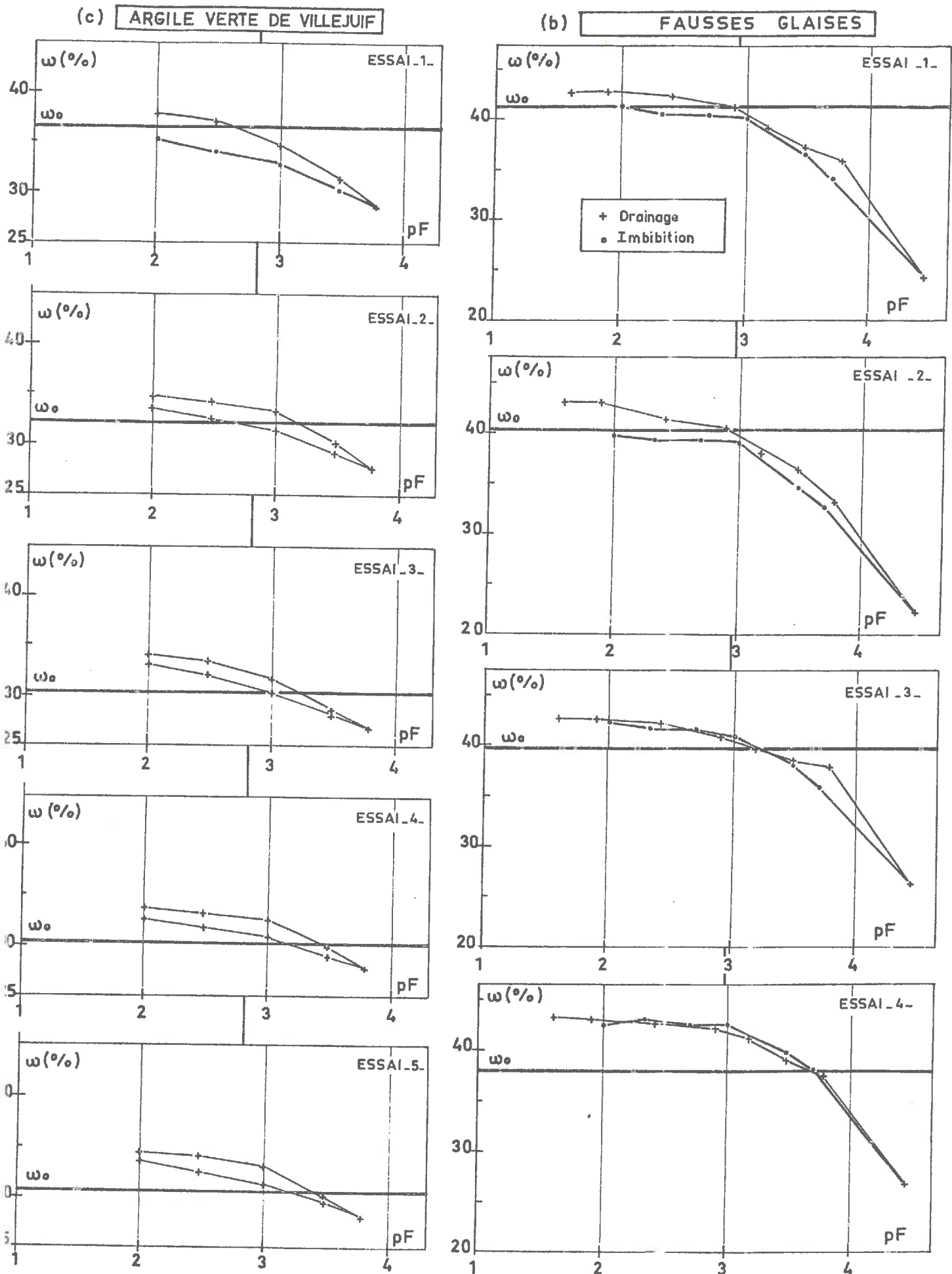


Fig. II.4. 9. — Courbes de rétention d'eau ( drainage - imbibition )



Si l'écart absolu maximal de teneur en eau initiale est de 7 %, l'écart absolu maximal de teneur en eau à l'équilibre du premier palier est de 4 %. De plus, plus la teneur en eau initiale est forte et plus la teneur en eau à l'équilibre du premier palier est forte. Deux types de raisons peuvent être invoqués pour expliquer ce phénomène :

- raison d'ordre expérimental : il est possible que la durée accordée à ce premier palier n'ait pas été suffisante pour atteindre l'équilibre de tous les échantillons (on sait en effet que plus la teneur en eau augmente et plus le phénomène de gonflement est lent) ;
- raison d'ordre scientifique : les échantillons présentant des teneurs en eau initiales différentes, leur texture est différente et la relation entre  $pF$  et teneur en eau s'en trouve peut être modifiée d'un échantillon à l'autre.

A partir de ce premier palier est réalisé d'abord une courbe de drainage, puis une courbe d'imbibition. Globalement, il existe une hystérésis entre la courbe de drainage et la courbe d'imbibition (Figure II.4.9. a). Pour une même succion appliquée, la teneur en eau en drainage est supérieure à la teneur en eau en imbibition. Cette hystérésis est certainement due, comme nous l'avons indiqué au § III.4.1.3., à une dépense d'énergie irréversible en phase d'imbibition (hystérésis thermodynamique). Cette hystérésis diminue pour les faibles  $pF$  et tend même parfois vers zéro (bouclage approximatif de la courbe).

Voyons maintenant séparément la courbe de drainage et la courbe d'imbibition.

#### Courbe de drainage

Nous avons superposé les 5 courbes de drainage de la première série, et celles de la deuxième série (Figure II.4.10 a et b)

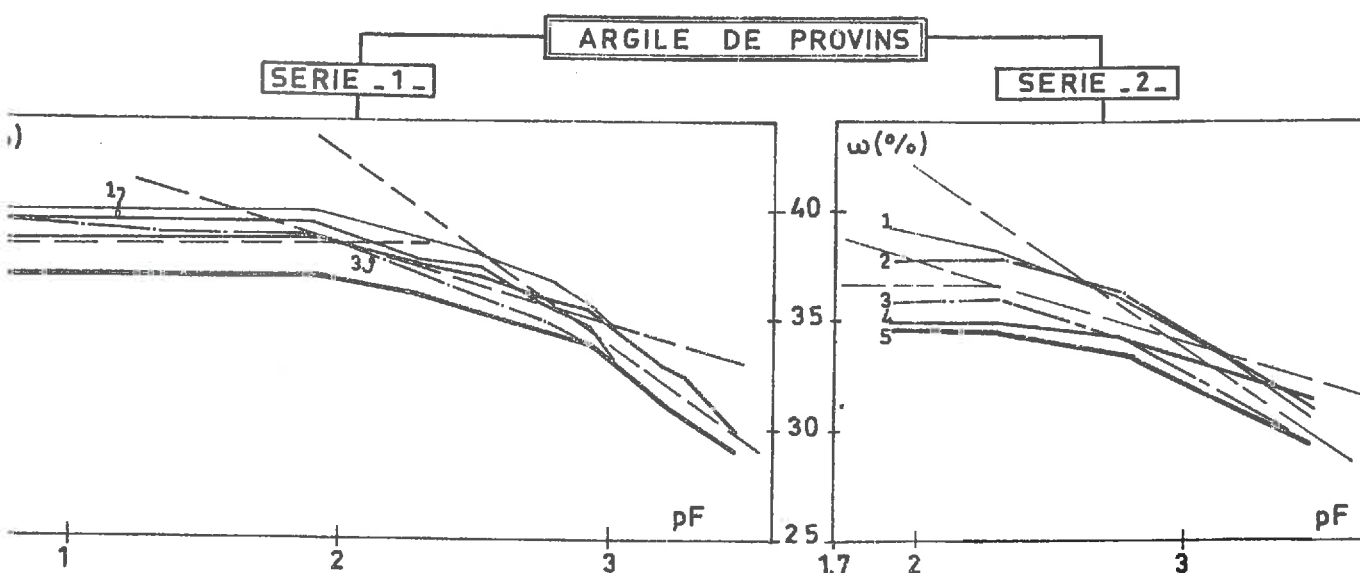


Figure II.4.10 - Courbes de drainage superposées

Toutes les courbes ont la même allure générale. Parallèles pour les faibles suctions, elles tendent à se rapprocher pour les fortes suctions (l'influence de l'état initial diminuant quand la pression augmente).

On peut caler globalement ces courbes sur trois portions de droites :

- 1- pour les faibles suctions : une droite horizontale ou sub-horizontale (pas de variation de teneur en eau)
- 2- pour les moyennes suctions : une droite à pente moyenne (variation de teneur en eau de moyenne importance)
- 3- pour les fortes suctions : une droite à pente forte (forte variation de teneur en eau)

Cette schématisation est particulièrement nette pour les échantillons 4 et 5 de la première série (Figure II.4.9. - a), essais pour lesquels la courbe expérimentale comporte le plus de points de mesure.

Les pentes des trois droites en question sont les mêmes pour les deux séries d'essai. De plus les points d'intersection de ces droites sont sensiblement les mêmes pour tous les essais, le premier point se situant aux alentours de  $pF\ 2 - pF\ 2,30$  ( $0,1 - 0,2 \cdot 10^5 Pa$ ), le second point aux alentours de  $pF\ 2,84 - pF\ 2,95$  ( $0,7 - 0,9 \cdot 10^5 Pa$ ). Ces trois droites et leurs points d'intersections, constants pour tous les essais, sont des caractéristiques du matériau pour la phase de drainage. Les contraintes correspondant aux points d'intersections doivent dépendre de l'histoire du matériau (pression de préconsolidation).

#### Courbes d'imbibition

Nous avons superposé les 5 courbes d'imbibition de la première série, et celle de la deuxième série (Figure II.4.11. a et b).

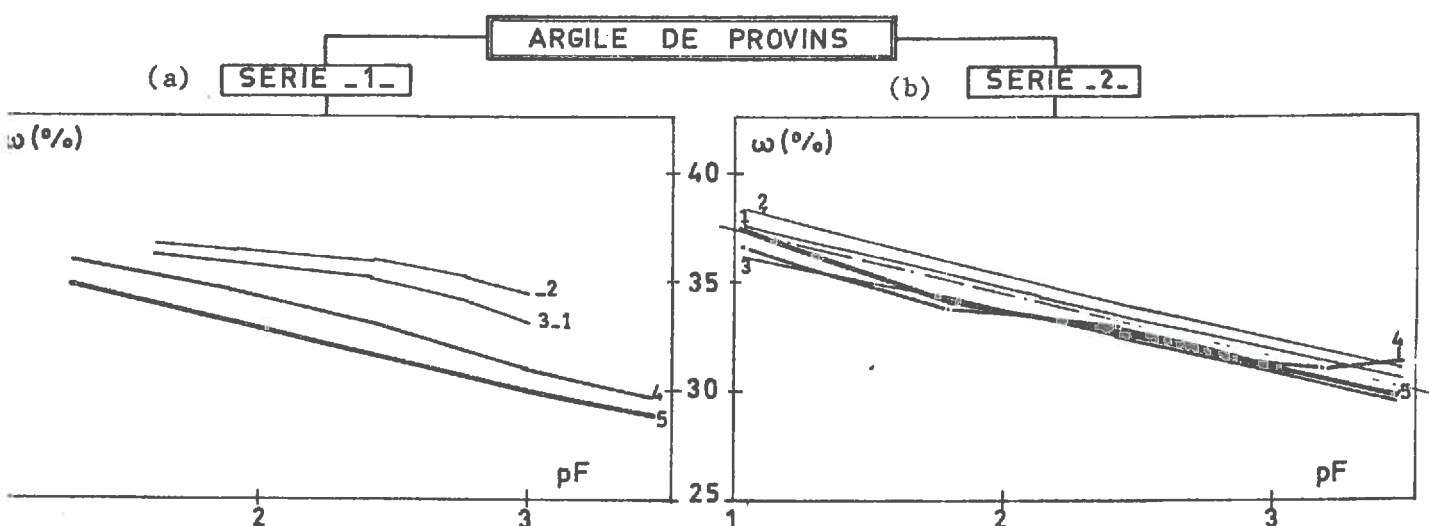


Figure II.4.11. - Courbes d'imbibition superposées

Les courbes d'imbibition sont des droites, et sont toutes parallèles entre elles, leur décalage étant dû aux décalages des courbes de drainage au dernier palier de drainage. La pente de la droite d'imbibition est une caractéristique du matériau et ne dépend pas de l'histoire du matériau.

#### II.4.2.4.2. - Fausses Glaises

On constate tout d'abord que les échantillons présentent tous pratiquement la même teneur en eau à l'équilibre du premier palier de succion appliqué (Tableau II.4.4.) pour des teneurs en eau initiales voisines (3 % d'écart absolu).

| Echantillon                       | 1    | 2    | 3    | 4    |
|-----------------------------------|------|------|------|------|
| w initiale (%)                    | 41,2 | 40,2 | 39,7 | 38,0 |
| w à l'équilibre du 1er palier (%) | 42,8 | 42,9 | 42,7 | 43,2 |

Tableau II.4.4. - Teneurs en eau initiale et à l'équilibre du 1er palier de succion

L'hystérésis entre drainage et imbibition est très faible (essai 1 et 2), voire nulle pour les essais 3 et 4 (Figure II.4.9. b). Ce phénomène est assez étrange car en général les auteurs concluent à l'existence d'une hystérésis nette entre drainage et imbibition. Ceci renforce notre sentiment quant au comportement particulier des Fausses Glaises en gonflement (cinétique de gonflement anormale pour des échantillons d'épaisseur inférieure à 5 cm, § II.1., vitesse d'avancement du front d'eau supérieure à la moyenne des sols étudiés, § II.2.).

Les courbes de drainage et d'imbibition ont donc la même allure générale et il est possible de les étudier simultanément.

Nous avons superposé les 4 courbes de drainage, et les 4 courbes d'imbibition (Figure II.4.12. a et b).



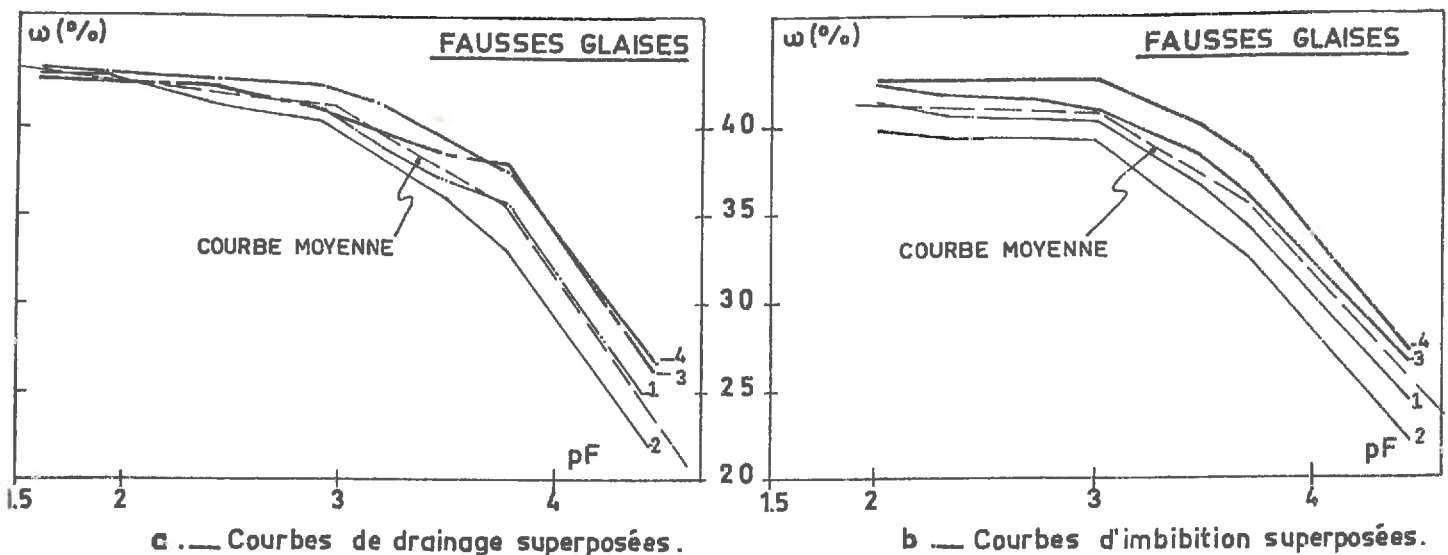


Figure II.4.12 - Courbes de drainage et courbes d'imbibition superposées

De même que pour l'Argile Plastique de Provins (en drainage), on peut caler globalement ces courbes sur trois portions de droite, une droite sub-horizontale, une droite à pente moyenne et une droite à pente forte.

Cette division est assez bien accusée pour les courbes de drainage (Figure II.4.12. a), elle l'est nettement moins pour les courbes d'imbibition (Figure II.4.12. b) en ce qui concerne la distinction entre droite à pente moyenne et droite à pente forte.

Les deux points d'intersection de ces trois droites correspondent à des suctions respectivement égales à  $pF\ 2,8 - pF\ 3$  ( $0,8$  à  $1 \cdot 10^5 Pa$ ) et  $pF\ 3,7 -$  ( $5$  à  $6 \cdot 10^5 Pa$ ).

Cette suction de  $6 \cdot 10^5 Pa$  (en drainage) peut être assimilée à la pression de préconsolidation du sol naturel. En effet on sait que la pression de préconsolidation est au moins égale au poids des terres sus-jacentes in situ (cas du sol normalement consolidé). Or ce matériau a été prélevé à 25 m de profondeur, soit environ  $5 \cdot 10^5 Pa$  de contrainte géostatique. Comme de plus il apparaît peu probable que la pression de préconsolidation soit supérieure à  $28 \cdot 10^5 Pa$  (suction maximum utilisée), on peut définir le point d'intersection entre la droite à pente moyenne et la droite à pente forte comme la pression de préconsolidation du matériau. Ce point étant posé, on peut alors envisager de définir le premier point d'intersection ( $0,8 \cdot 10^5 Pa$  en drainage) comme une pression de préconsolidation résiduelle induite par le gonflement du sol depuis sa teneur en eau à l'état naturel jusqu'à sa teneur en eau initiale avant essai.

En effet, tout phénomène de gonflement par diminution de la succion du sol, entraîne une diminution de la contrainte effective appliquée aux grains, donc une déconsolidation. Néanmoins le matériau garde trace de son histoire antérieure.

Les traces de l'histoire de ce matériau pourraient donc s'exprimer ici par l'intermédiaire des deux points d'intersection ou cassures de la courbe de drainage : la contrainte la plus forte exprimant la préconsolidation du sol naturel, et la contrainte la plus faible exprimant la préconsolidation résiduelle après un premier gonflement.

#### II.4.2.4.3. - Argile Verte de Villejuif

L'influence de la teneur en eau initiale sur la teneur en eau à l'équilibre du premier palier de succion est identique à l'influence constatée pour les deux sols précédemment étudiés (Tableau II.4.5.).

| Echantillon                                   | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    |
|-----------------------------------------------|------|------|------|------|------|
| w initiale (%)                                | 36,4 | 32,3 | 30,3 | 30,3 | 30,5 |
| w à l'équilibre du 1 <sup>er</sup> palier (%) | 37,9 | 34,6 | 34,1 | 33,8 | 34,5 |

Tableau II.4.5. - Teneurs en eau initiales et à l'équilibre du premier palier de succion

Cette influence diminue au fur et à mesure que la succion augmente.

Il existe une hystérésis nette entre les courbes de drainage et les courbes d'imbibition (Figure II.4.9. c).

#### Courbes de drainage

Nous avons superposé les 5 courbes de drainage (Figure II.4.13).

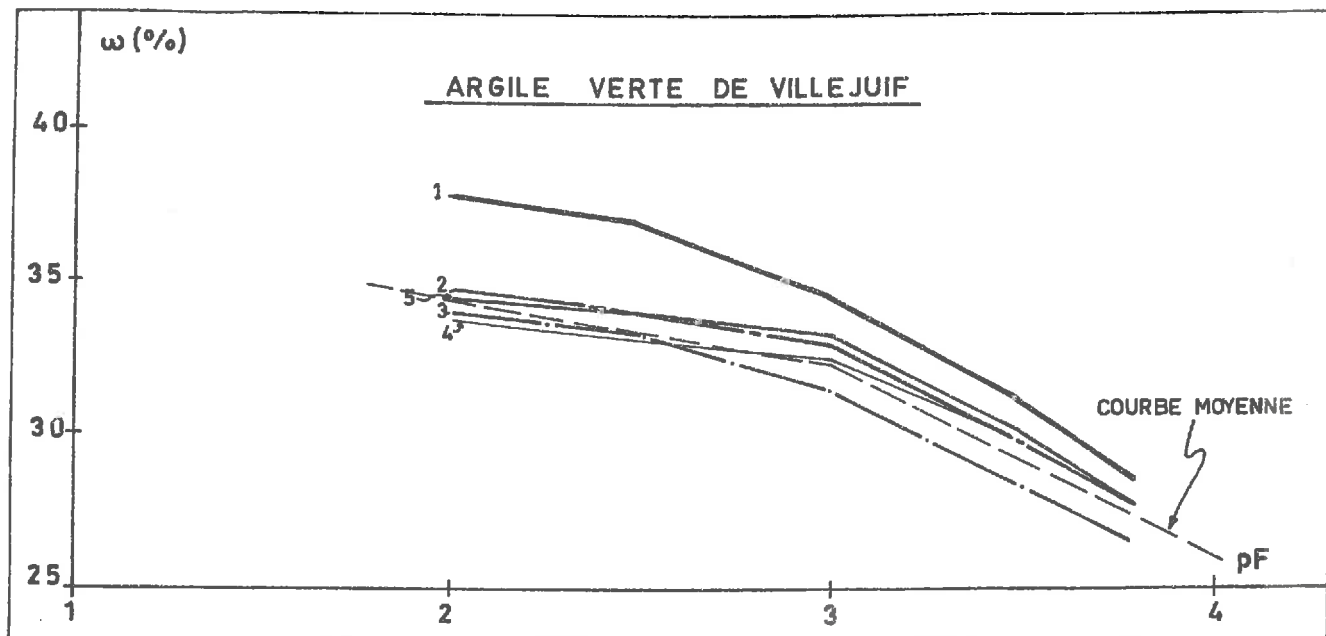


Fig. II.4.13. — Courbes de drainage superposées.

Si l'échantillon 1, à teneur en eau initiale la plus forte, présente une courbe relativement "régulière", les quatre autres présentent des courbes que l'on peut caler globalement sur deux portions de droites :

- 1/ une droite à pente faible
- 2/ une droite à pente moyenne

Ces deux droites se coupant pour une succion voisine de  $10^5$  Pa.

#### Courbes d'imbibition

Nous avons superposé les 5 courbes d'imbibition (Figure II.4.14).

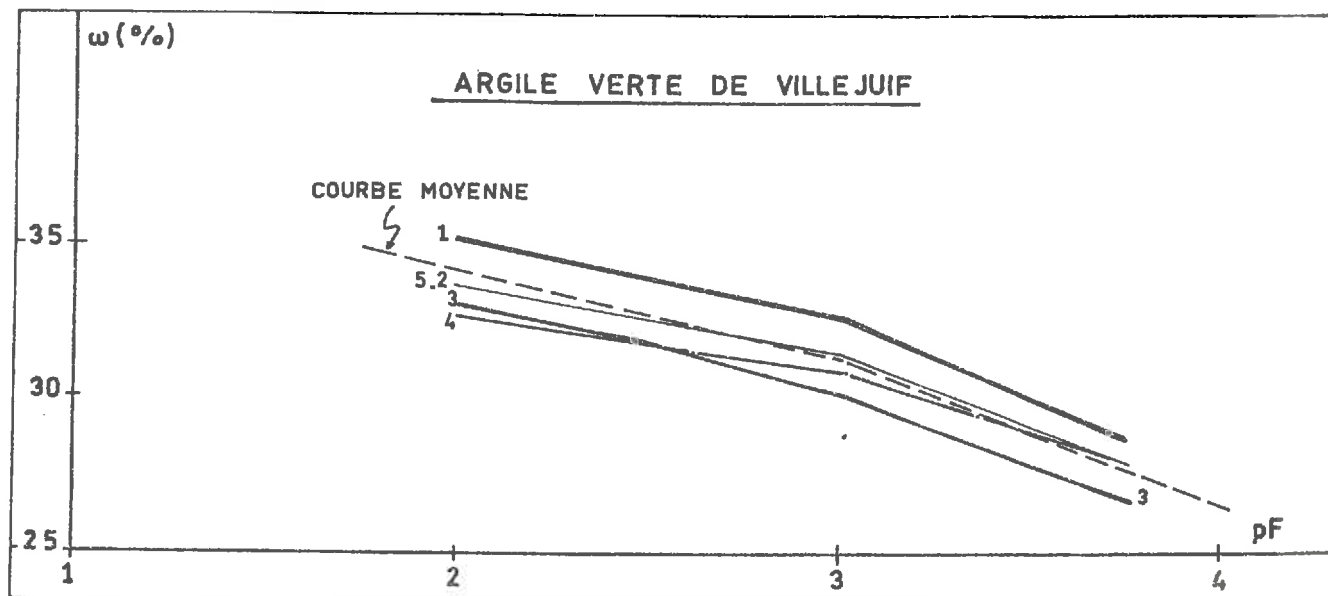


Fig. II.4.14. — Courbes d'imbibition superposées.

Elles présentent toutes la même allure, proche d'ailleurs de celle des courbes d'imbibition et peuvent être calées sur deux portions de droite se coupant aux environs de  $10^5$  Pa.

#### II.4.2.4.4. - Conclusions

On a pu constater que les comportements des trois sols étudiés, en drainage et en imbibition, présentent des différences et des caractères communs.

Il semble que si l'essai pratiqué est répétitif pour des échantillons présentant la même teneur en eau initiale, par contre une différence de teneur en eau initiale entraîne un décalage vertical des courbes, qui s'amenuise quand la succion imposée augmente.

Il n'a pas été possible de préciser clairement si l'influence de la teneur en eau initiale est due en partie aux conditions expérimentales, ou si c'est une réalité physique. Néanmoins, si cette influence de la teneur en eau est une réalité physique, alors pour un matériau ne comportant pas d'hystérésis entre drainage et imbibition, elle doit être nulle. C'est ce que nous avons constaté pour les Fausses Glaïses.

Deux sols, Argile de Provins et Argile Verte de Villejuif, présentent une hystérésis entre drainage et imbibition, par contre les Fausses Glaïses n'en présentent quasiment pas. Cette constatation, associée aux conclusions habituelles concernant l'hystérésis des sols, nous permet de confirmer le comportement particulier des Fausses Glaïses, sans toutefois pouvoir l'expliquer.

Les courbes de drainage présentent toutes la même forme générale. Il semble qu'une courbe de drainage puisse se scinder grossièrement en plusieurs portions de droites se coupant en des points correspondant à des pressions caractéristiques de l'histoire du matériau (en particulier la pression de préconsolidation du sol naturel). Il faut néanmoins être prudent car chaque drainage et chaque imbibition modifient l'histoire du matériau. Des conclusions plus sérieuses pourraient être envisagées par l'étude de matériaux dont on "contrôle" plus ou moins l'histoire (matériaux défloculés et resédimentés artificiellement) et surtout par une étude comparative entre courbes de succion et courbes de consolidation oedométrique.

Les courbes d'imbibition présentent des formes différentes selon les sols. Si les courbes d'imbibition de l'Argile de Provins sont des droites, celles des Fausses Glaïses épousent la forme des courbes de drainage, et celles de l'Argile Verte de Villejuif également mais avec un décalage dû à l'hystérésis.

En conclusion, il apparaît que les courbes de rétention d'eau obtenues par essai de succion semblent être un bon moyen pour étudier le comportement des sols en drainage et en imbibition, néanmoins un grand nombre d'essais doivent encore être effectués afin de préciser les résultats acquis. Quoiqu'il en soit cette méthode reste, à notre avis, surtout qualitative et est indissociable des méthodes de mesure directe de la succion des sols (psychromètre, méthode du papier-filtre).

### II.4.3. - Application de la méthode du papier filtre à l'étude du potentiel de gonflement des sols argileux saturés

#### II.4.3.1. - Origines et évolutions de la méthode

La méthode du papier-filtre est basée sur l'hypothèse qu'à l'équilibre, le potentiel de l'eau d'un échantillon de sol et le potentiel de l'eau d'un papier filtre en contact avec l'échantillon sont les mêmes.

La première utilisation de cette méthode pour mesurer directement les contraintes dans un sol est due à GARDNER (1937). Celui-ci utilisait un papier-filtre de type "Schleicher et Schuell n° 589 White Ribbon" traité au chlorure de mercure ( $HgCl_2$ ) pour éviter la décomposition du papier.

Cette méthode fut modifiée par la suite par FAWCETT et COLLIS GEORGE (1966) qui préconisent l'emploi d'un papier Whatman n° 42, puis par MC QUEEN et MILLER (1968). Ces deux derniers auteurs utilisent un papier Schleicher and Schuell, n° 589 traité par une solution de pentochlorophénol "Dowcide-7" concentrée à 3 % pour minimiser la croissance bactérienne et la décomposition biologique.

Le papier-filtre est préalablement étalonné à l'aide d'appareillages classiques (appareil de RICHARD, psychromètre, solutions salines) afin de déterminer sa courbe de rétention d'eau. L'emploi de papier toujours préalablement mouillé évite les phénomènes d'hystérésis (on se situe alors toujours sur la branche drainage de la courbe de rétention d'eau du papier).

Si le papier-filtre est placé en contact direct avec le sol, il permet de mesurer la succion matricielle de l'échantillon (par transfert d'eau liquide). Si au contraire il n'est pas en contact direct avec le sol, il permet de mesurer la somme de la succion matricielle et de la succion osmotique (par transfert d'eau vapeur sans ions).

Enfin AL-KHAFAT (1972), montre que l'équilibre entre le sol et le papier est obtenu au bout de 5 jours environ, et que l'influence de la température n'est pas prépondérante pourvu que celle-ci soit à peu près constante au cours du temps.

Il est à remarquer que si cette technique permet de mesurer la succion réelle du sol dans un état donné c'est que les transferts d'eau entre sol et papier sont très faibles et ne modifient pas la teneur en eau du sol (donc son état de référence).

Elle est de plus utilisable sur une très vaste gamme de succion (de pF 0 à pF 7) ce que ne permettent pas l'essentiel des autres méthodes précédemment décrites prises séparément.

Elle est enfin très facile à mettre en oeuvre et le coût de l'appareillage est faible.

### II.4.3.2. - Etude expérimentale

#### II.4.3.2.1. - Technique opératoire

##### Matériel nécessaire

- Papier filtre Whatman n° 42
- Feuilles de plastique souple
- Boîte en plastique rigide
- Balance au 0,0001 gramme

##### Déroulement de l'essai

L'échantillon de sol est taillé en forme cubique d'environ 3 cm d'arête et partagé en 2 par son milieu.

Trois papiers filtres de forme carrée de 3 cm de côté et préalablement mouillés sont introduits entre les 2 demi-échantillons. Seul le papier central sera utilisé pour la mesure de teneur en eau, les 2 papiers extérieurs servant à empêcher la pollution du papier central par des particules d'argile.

L'ensemble échantillon + papier est soigneusement emballé dans une feuille de plastique souple en évitant de piéger des bulles d'air, et le tout est scellé par un ruban adhésif.

L'échantillon est alors déposé dans une boîte en plastique rigide préhumidifiée puis scellée à l'aide de ruban adhésif.

Au bout de 7 jours, l'échantillon est déballé, et très vite le papier-filtre central est pesé au 1/1 000 de gramme. Cette pesée doit être effectuée très rapidement, car dès la sortie du papier celui-ci se met à sécher.

Le papier-filtre est ensuite séché dans une étuve à 105° C pendant 24 heures puis pesé à nouveau à sa sortie de l'étuve, afin de déterminer sa teneur en eau. On procède de même avec l'échantillon de sol.

La lecture sur la courbe d'étalonnage du papier-filtre permet d'obtenir son pF, qui est aussi le pF de l'échantillon à la teneur en eau de référence.

Il faut remarquer que nous avons utilisé la technique la plus simple possible (pas de traitement anti-microbien, pas d'enceinte thermostatée, emballage dans une simple feuille de plastique) afin de nous placer dans des conditions proches de celles d'un essai de chantier qui doit être une des applications de cette méthode. Néanmoins nous avons constaté que sur une période de 7 jours (durée de l'essai), la température de la pièce dans laquelle étaient placés les échantillons ne variait pas de plus de 2 ou 3 degrés, et que à sa sortie après essai, l'état du papier-filtre central n'était pas affecté (décomposition, moisissures.....)

### Etalonnage du papier-filtre

Le papier-filtre a été étalonné entre  $pF_0$  et  $pF_4$  (0 et  $10^6$  Pa) à l'aide de l'appareil de RICHARD précédemment mentionné. Les transferts d'eau entre sol et papier se produisant du papier vers le sol (c'est-à-dire en drainage du papier), nous avons réalisé une courbe d'étalonnage en drainage. On remarque (Figure II.4.15) que notre courbe d'étalonnage expérimentale a la même forme que la courbe obtenue par FAWCETT et COLLIS GEORGE mais est décalée dans le sens des succions croissantes (pour une même teneur en eau). Cette différence est probablement due au traitement du papier à  $H_g Cl_2$  dans un cas et à l'absence de traitement dans l'autre cas.

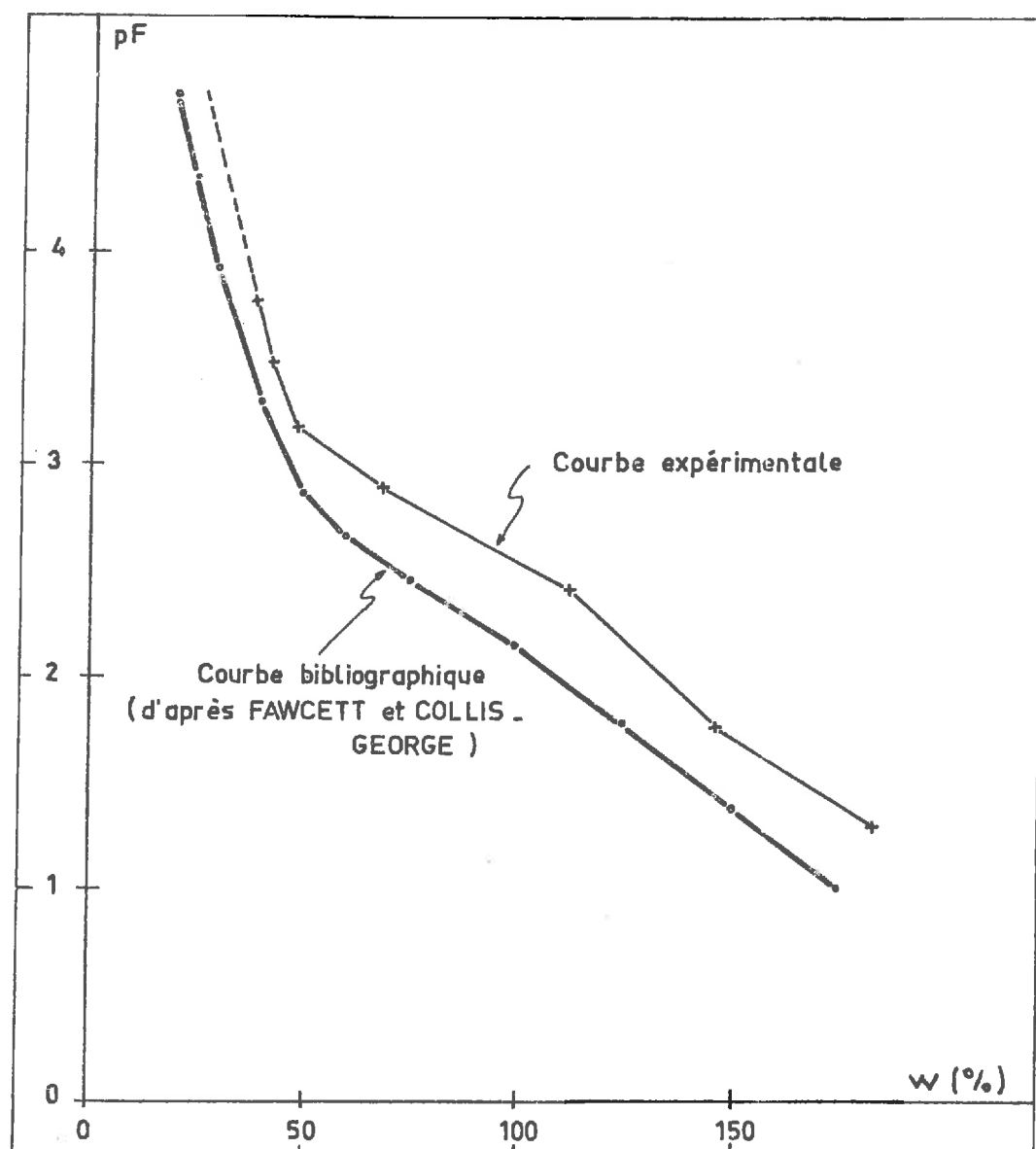


Figure II.4.15 - Courbe d'étalonnage du papier-filtre



#### II.4.3.2.2. - Essais effectués et interprétation des résultats

Nous avons étudié trois types de sols : Les Fausses Glaises, l'Argile Verte de Villejuif et la Marne Bleue de Nogent. Pour chaque type de sol, des échantillons ont été préparés à diverses teneurs en eau à partir d'essais de gonflement unidimensionnel tels que nous les avons décrits auparavant. Chaque teneur en eau est caractéristique d'un taux de gonflement unidimensionnel par rapport à la teneur en eau initiale, selon la relation déjà mentionnée :

$$\frac{\Delta h}{h_0} = \frac{w - w_0}{w_0 + \frac{\gamma_w}{\gamma_p}}$$

A la fin de chaque essai la teneur en eau du papier-filtre est déterminée, et la courbe d'étalonnage nous donne sa succion qui est aussi celle de l'échantillon de sol. Nous avons pu ainsi reconstituer des courbes de succion des sols en fonction de la teneur en eau, à partir de mesures directes, et non plus à partir de paliers de succion imposés.

#### Résultats et interprétation

Une hypothèse fondamentale de cette méthode est que l'état de l'échantillon (c'est-à-dire en l'occurrence sa teneur en eau) n'est pas modifié par l'expérience. Un certain nombre d'échantillons utilisés ont été pesés avant et après expérience, et leur teneur en eau déterminée dans les deux cas. On remarque (Tableau II.4.6.) que l'écart de teneur en eau entre les deux états ne dépasse pas 0,5 % de teneur en eau, soit moins de 2 % d'erreur relative.

| Fausses Glaises           |      |      |      |      |      |      |
|---------------------------|------|------|------|------|------|------|
| w avant essai (%)         | 40,4 | 41,0 | 39,8 | 38,8 | 38,3 | 37,1 |
| w après essai (%)         | 40,6 | 40,8 | 40,1 | 38,5 | 38,6 | 36,9 |
| Argile Verte de Villejuif |      |      |      |      |      |      |
| w avant essai (%)         | 38,1 | 32,3 | 30,3 | 30,3 | 30,7 | 31,1 |
| w après essai (%)         | 38,4 | 32,3 | 30,6 | 30,4 | 31,0 | 31,1 |

Tableau II.4.6. - Variation de teneur en eau au cours de l'essai au papier filtre



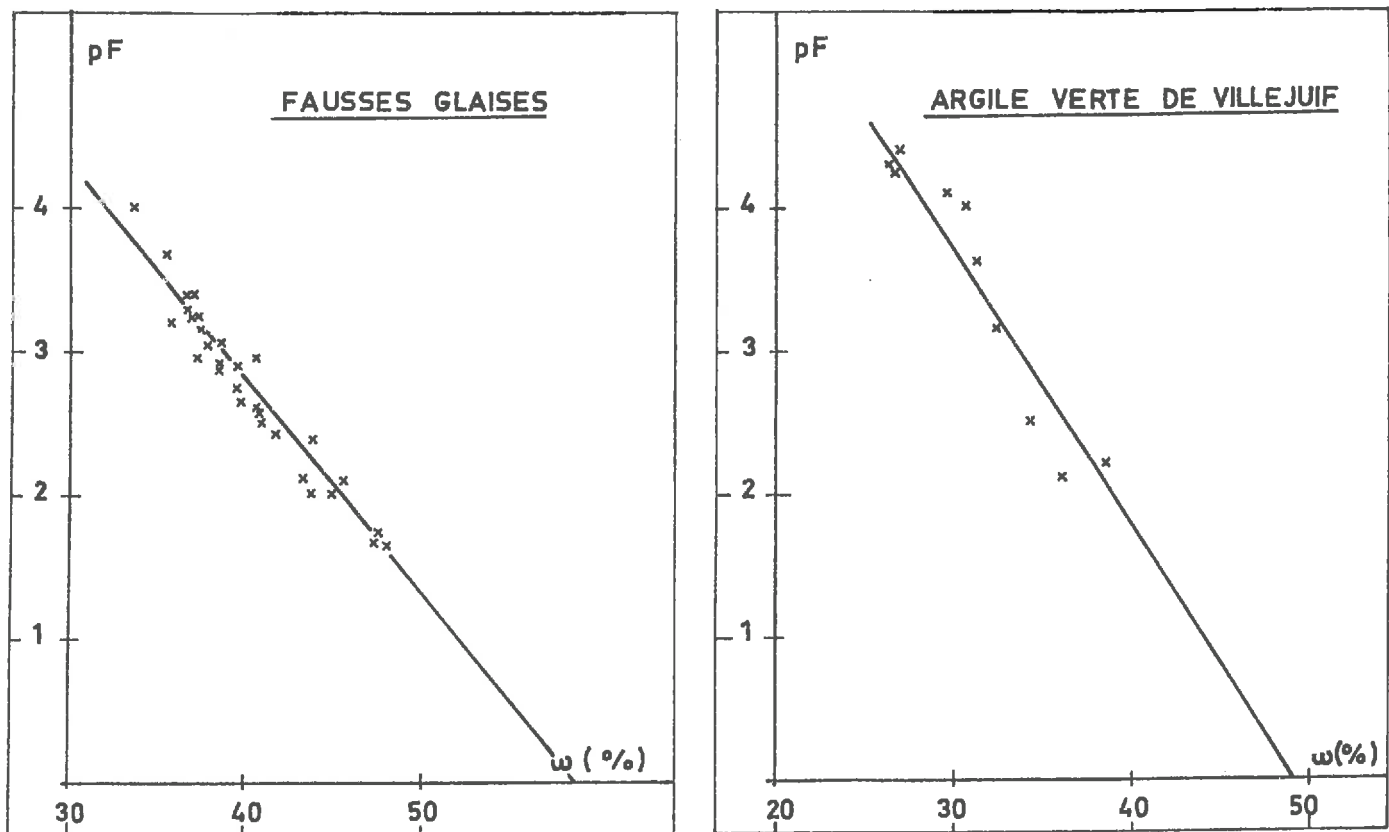
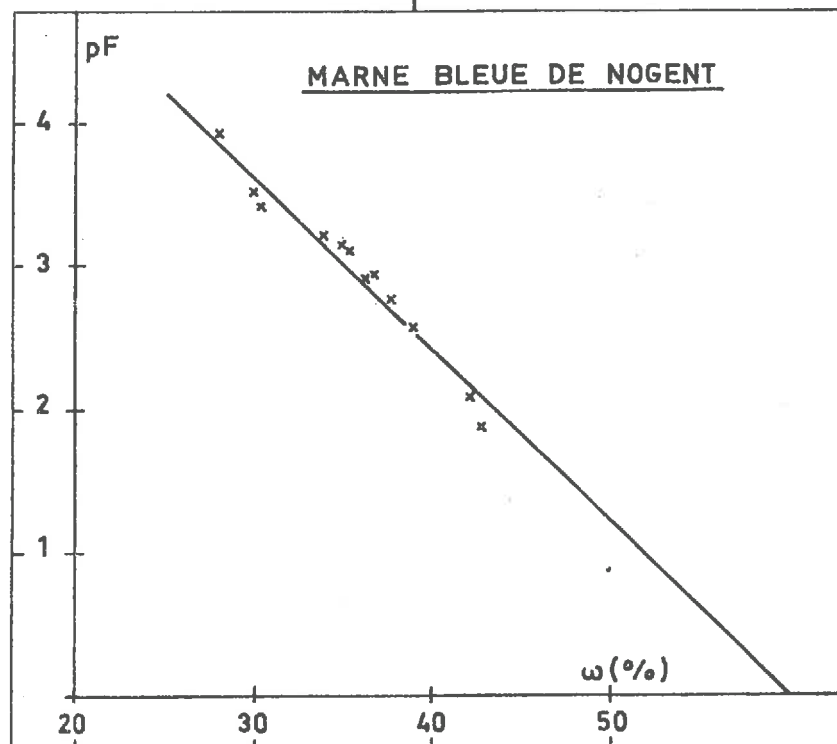


Fig.II.4.16. — Relation entre pF et teneur en eau (méthode du papier - filtre )



On peut en conclure que l'état de l'échantillon n'est pas perturbé par l'essai, et donc la succion du papier-filtre mesurée est bien la succion de l'échantillon dans son état d'origine.

Les résultats numériques de tous les essais effectués sont donnés dans le Tableau II.4.7.

| Fausses Glaises |      |      |      |      |      | A.V. de Villejuif |      | M.B. de Nogent |      |
|-----------------|------|------|------|------|------|-------------------|------|----------------|------|
| w (%)           | pF   | w    | pF   | w    | pF   | w                 | pF   | w              | pF   |
| 48,0            | 1,66 | 40,6 | 2,96 | 37,0 | 3,24 | 38,4              | 2,20 | 42,8           | 1,86 |
| 47,5            | 1,74 | 40,1 | 2,82 | 36,9 | 3,40 | 36,0              | 2,10 | 42,2           | 2,08 |
| 47,3            | 1,67 | 39,8 | 2,66 | 36,8 | 3,40 | 34,2              | 2,50 | 38,9           | 2,55 |
| 45,6            | 2,08 | 39,7 | 2,91 | 36,8 | 3,20 | 32,3              | 3,16 | 37,8           | 2,74 |
| 45,0            | 2,00 | 39,6 | 2,74 | 36,7 | 3,30 | 31,1              | 3,60 | 36,8           | 2,92 |
| 43,8            | 1,98 | 38,6 | 2,88 | 35,5 | 3,68 | 30,6              | 4,00 | 36,3           | 2,90 |
| 43,7            | 2,38 | 38,6 | 3,07 | 33,7 | 4,00 | 29,5              | 4,10 | 35,4           | 3,10 |
| 43,3            | 2,12 | 38,5 | 2,87 |      |      | 26,8              | 4,40 | 35,1           | 3,12 |
| 41,8            | 2,43 | 37,9 | 3,04 |      |      | 26,5              | 4,25 | 33,9           | 3,20 |
| 41,0            | 2,50 | 37,5 | 3,16 |      |      | 26,3              | 4,30 | 30,4           | 3,40 |
| 40,8            | 2,56 | 37,3 | 2,95 |      |      |                   |      | 29,8           | 3,50 |
| 40,7            | 2,60 | 37,2 | 3,24 |      |      |                   |      | 28,0           | 3,90 |

Tableau II.4.7. - Résultats des essais au papier-filtre

La relation entre la teneur en eau  $w$  du sol et sa succion  $\tau$  exprimée en  $pF$  (c'est-à-dire en logarithme de pression exprimée en millibars, par exemple  $pF\ 3 = 1\ \text{bar} = 10^5\text{Pa}$ ) a été déterminée pour les trois sols étudiés (Figure II.4.16 - a à c -).

Dans les trois cas, la relation obtenue est une droite décroissante :

$$\log \tau = pF = -a w + b$$

où  $a$  et  $b$  sont des constantes dépendant de la nature du sol. On remarque que  $a$  et  $b$  sont différents selon les sols considérés, preuve de leur différence de comportement (Tableau II.4.8.).

| Relation $pF = -aw + b$    | Fausses Glaïses | Argile Verte | Marne Bleue |
|----------------------------|-----------------|--------------|-------------|
| Pente $a$                  | 0,15            | 0,19         | 0,12        |
| abscisse à l'origine $b/a$ | 59              | 50           | 60          |

Tableau II.4.8. - Caractéristiques géométriques de la relation  $pF = -aw + b$

L'abscisse à l'origine  $w_m = b/a$ , qui est la teneur en eau obtenue graphiquement pour  $pF = 0$ , représente la teneur en eau maximale accessible par gonflement. En effet un sol gonfle tant que sa succion n'est pas complètement dissipée, et donc pour  $pF = 0$ , c'est-à-dire pour  $10^2 \text{ Pa}$  (soit 1 cm d'eau), la succion peut être considérée comme nulle.

En pratique, les nombreux essais de gonflement effectués au cours de ce travail nous ont montré, par mesure de la teneur en eau en fin d'essai, qu'il est même extrêmement rare d'atteindre une teneur en eau correspondant à un  $pF$  inférieur à 1, c'est-à-dire une succion résiduelle inférieure à  $10^3 \text{ Pa}$ . Il faut signaler qu'une contrainte résiduelle de  $10^3 \text{ Pa}$  représente environ en contrainte géostatique 5 à 7 cm d'épaisseur de terrains et par conséquent de telles contraintes n'intéressent, dans les cas concrets, que la frange superficielle de terrains non chargés.

Il nous semble donc que pour une application pratique à des cas concrets, on peut se borner à prendre comme teneur en eau maximale accessible par gonflement, et avec une bonne marge de sécurité, non pas le coefficient  $b/a$ , mais la teneur en eau correspondant graphiquement à un  $pF$  égal à 1, soit pour les trois sols étudiés :

|                                        | Fausses Glaïses | Argile Verte | Marne Bleue |
|----------------------------------------|-----------------|--------------|-------------|
| $w$ maximale accessible par gonflement | 52              | 44           | 52          |

Tableau II.4.9. - Teneur en eau en maximale accessible par gonflement

Dans tout le domaine de saturation, il y a équivalence entre contrainte mécanique et contrainte capillaire (une succion capillaire  $\tau = p$  est équivalente à un déchargement mécanique  $\Delta\sigma = p$ ) et il y a identité entre la succion  $\tau$  d'un sol saturé et sa pression de gonflement (définie comme la pression à laquelle peut s'opposer le sol pour absorber de l'eau).

La relation  $pF = -aw + b$  représente donc également la relation entre la teneur en eau du sol et le logarithme de sa pression de gonflement  $P_s$  :

$$\log P_s = - aw + b$$

Elle nous donne directement la pression de gonflement d'un sol à une teneur en eau donnée, exprimée en millibars ( $10^2 \text{Pa}$ ). Il est clair que cette loi est vraie uniquement dans le domaine de saturation, et qu'il ne faudrait pas l'utiliser pour des teneurs en eau trop proches de la limite de retrait du sol  $W_r$ , c'est pourquoi l'extrapolation à des zones de plus faible teneur en eau non étudiées expérimentalement est hasardeuse, et il faut se borner à utiliser le domaine défini par les points de mesures expérimentaux.

La méthode du papier-filtre apparaît donc comme un moyen simple et peu coûteux pour caractériser le potentiel de gonflement d'un sol saturé, que ce soit taux de gonflement ou pression de gonflement. Bien évidemment, cette étude doit être complétée dans l'avenir par une comparaison avec les pressions de gonflement obtenues par d'autres méthodes (que ce soit la pression nécessaire pour ramener un sol à son état initial après gonflement, ou la pression nécessaire pour empêcher toute variation de volume du sol en présence d'eau), et par une sophistication éventuelle de la technique de mesure elle-même (mesure de la succion matricielle par un papier-filtre en contact avec le sol et mesure de la succion totale par un papier-filtre sans contact avec le sol). Néanmoins la méthode du papier-filtre peut d'ores et déjà être utilisée comme un essai de routine, aussi bien au laboratoire que sur chantier pour caractériser globalement l'aptitude d'un sol au gonflement.

## INTRODUCTION

Le gonflement, dont on constate les effets macroscopiques, se développe en fait à l'échelle microscopique et consiste en une réorganisation du squelette solide et du réseau poreux constituant la texture du sol.

La variation de texture des sols au cours du gonflement a été étudiée à l'aide de deux techniques complémentaires, la microscopie électronique à balayage et la porosimétrie par injection de mercure.

La microscopie électronique à balayage permet de visualiser la texture des sols, donc d'obtenir des renseignements qualitatifs (arrangement des particules, estimation de rayons de pores, de tailles de particules, détermination de certains minéraux....). La porosimétrie par injection de mercure permet de quantifier, de par la mesure des rayons moyens d'accès de pores, le réseau poreux, élément fondamental puisque c'est sa dilatation volumique qui cause le gonflement macroscopique.

### TROISIEME CHAPITRE

#### ETUDE DU GONFLEMENT A L'ECHELLE MICROSCOPIQUE

### III.1. - DESCRIPTION DES ESSAIS ET BIBLIOGRAPHIE

#### III.1.1. - Description des essais

##### III.1.1.1. - Sols étudiés

Les cinq mêmes sols, Argile Plastique de Provins, Fausses Glaises, Argile Verte de Montreuil, Marne Bleue de Nogent et Argile d'Aix-Les-Bains ont été étudiés. La constitution de chacun de ces sols sera rappelée avant chaque observation au microscope électronique à balayage les concernant.

##### III.1.1.2. - Préparation des échantillons

Pour mettre en évidence les variations de texture engendrées par le gonflement des sols, il est nécessaire d'étudier divers échantillons d'un même sol à des étapes différentes du processus de gonflement.

Pour ce faire nous avons utilisé le dispositif déjà décrit au Chapitre II : une carotte épaisse est mise à gonfler dans un moule en plexiglas, l'eau arrivant par face supérieure. L'essai de gonflement est arrêté au bout d'un certain temps  $t$ , et il existe dans la carotte un gradient de gonflement décroissant du haut vers le bas. On prélève alors 3 tranches dans la carotte, une dans la partie supérieure, une dans le milieu et une dans la partie inférieure. Ce sont ces tranches auxquelles on ajoute éventuellement un échantillon à teneur en eau naturelle, qui servent à l'étude de la texture.

/ REMARQUE / - L'Argile d'Aix-Les-Bains a été étudiée sous deux aspects, l'état naturel et l'état gonflé après une consolidation intermédiaire. Elle présente la même teneur en eau dans les deux états; le gonflement ne représente en fait que le simple effet du déchargement mécanique imposé. Même si l'on ne constate aucune évolution de texture entre les deux états considérés, il est intéressant d'étudier la texture de l'Argile d'Aix par comparaison avec celle de sols plus argileux.

##### III.1.1.3. - Lyophilisation

Les deux techniques employées, M.E.B. et porosimétrie, nécessitent l'élimination de l'eau du sol. Afin d'obtenir des échantillons déshydratés sans modification de texture nous avons pratiqué la

lyophilisation dont le principe et la méthode sont longuement décrits dans les travaux de MM D. TESSIER (1975), B. VAYSSADE (1978), P. DELAGE (1979). Nous nous bornerons à rappeler que les échantillons, parallélépipédés de 1 cm de long et de 2 mm de côté, sont congelés dans du fréon liquide refroidi par de l'azote liquide, puis sublimés sous un vide inférieur à 0,05 mm Hg, la vapeur d'eau étant condensée dans un piège à eau à  $-80^{\circ}\text{C}$  (température obtenue à l'aide de glace carbonique).

#### Contrôle de la lyophilisation

Des mesures de variation de volume effectuées au picnomètre à mercure avant et après lyophilisation ont montré des augmentations ou des diminutions de volume toujours inférieures à 2 %, alors qu'un séchage à l'air entraîne un retrait de 30 à 60 %.

### III.1.1.4. - Description sommaire des techniques opératoires

#### Microscopie électronique à balayage

Les essais ont été effectués sur un microscope électronique à balayage de type JEOL JSM 25.

Les échantillons ont été préparés selon une technique similaire à celle du cryoscan (DELAGE, 1979) : des baguettes de 2 mm de côté et de 1 cm de hauteur sont congelées puis cassées d'un coup de couteau, avant d'être lyophilisées. Cette méthode permet d'obtenir une fracture uniquement déterminée par la glace et non par les plans de faiblesse du matériau (on évite les arrachements dus à la rupture), la surface observée est alors représentative de l'ensemble de l'échantillon.

#### Porosimétrie par injection de mercure

La porosimétrie par injection de mercure repose sur le principe de la loi de JURIN qui relie la pression d'entrée du mercure P au rayon d'un capillaire cylindrique :

$$P = \frac{2\sigma \cos \theta}{R}$$

$\sigma$  : teneur superficielle du mercure

$\theta$  : angle de contact du mercure et de la paroi du tube capillaire

R : rayon du tube capillaire

Dans le cas du mercure, l'angle  $\theta$  est supposé pratiquement constant pour les milieux carbonatés et silicatés. On a :  $\theta = 140^{\circ}$  environ. De plus  $\sigma$ , la tension superficielle, vaut sensiblement 480 dynes/cm à  $25^{\circ}\text{C}$ . D'où la relation entre la pression d'entrée P exprimée en Pa et le rayon du capillaire R exprimé en  $\text{\AA}$  :

$$P = \frac{75 \cdot 10^8}{R}$$



En augmentant palier par palier la pression hydrostatique de mercure appliquée sur un échantillon préalablement lyophilisé et dégazé, on obtient un remplissage progressif des pores de l'échantillon dont le rayon d'accès est relié à la pression par la loi de JURIN. Il est alors possible de déterminer la distribution du volume poreux en fonction du rayon d'accès des pores. Les essais ont été réalisés à l'aide d'un porosimètre automatique qui opère entre 1 et 1500 bars (soit entre 7,5  $\mu$  et 50  $\text{\AA}$  de rayon d'accès) assorti d'une enceinte à vide permettant de mesurer des rayons d'accès plus grands (jusqu'à 130 microns) (F.M. PELLERIN, 1980).

### III.1.2. - Etude bibliographique

#### III.1.2.1. - Texture des sols

En géologie, la texture désigne "la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux naturellement groupés en une population au sein de la roche" (BROUSSE, 1968).

L'étude systématique de matériaux argileux au Microscope Electronique à Balayage a permis de cerner l'organisation des particules d'argile et de dégager certaines textures types.

D'après TESSIER et PEDRO (1976), la constitution des argiles comprend plusieurs niveaux superposés :

- . le feuillet argileux (à 7  $\text{\AA}$  pour les kaolinites, à 10  $\text{\AA}$  pour les micas et les smectites)
- . la particule primaire (appelée également cristallite élémentaire), qui est un empilement de feuillets
- . l'unité morphologique, à savoir la plus petite unité stable c'est : soit une particule primaire, soit une agrégation bord-bord de particules primaires, soit une agrégation bord-bord et face-face de particules primaires.
- . l'association des unités morphologiques; soit bord-face, elle est caractérisée par une porosité importante et une isotropie marquée, soit face-face, elle est caractérisée par une faible porosité et une forte anisotropie.

Cette classification reprend le modèle microscopique en agrégats proposé par SANKARAN et VENKATESCHWAR (1973) qui précisent de plus que les particules primaires se constituent pendant la diagenèse, alors que les agrégats (unités morphologiques) qui se forment sous l'action de pressions importantes, peuvent être dus à des conditions anthropiques. Reprenant QUIRK (1968), SANKARAN et VENKATESCHWAR ajoutent que la double couche diffuse ne se forme qu'autour des agrégats et non pas autour des particules, à cause de leur assemblage trop compact.

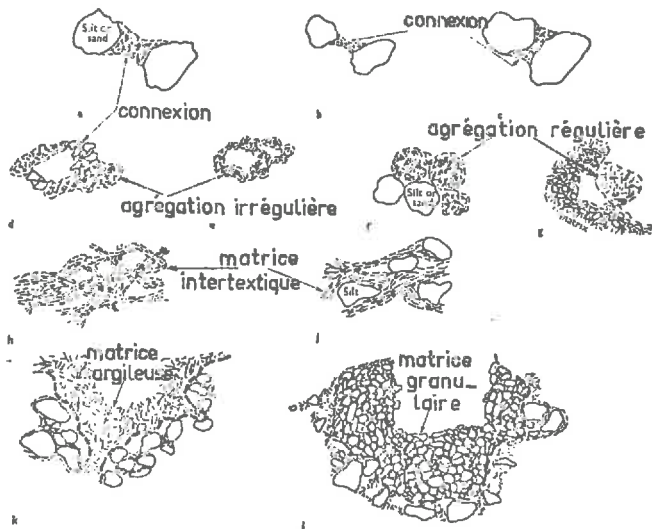


Fig. III.1.2. — Relation entre particules argileuses et grains non argileux.  
( d'après COLLINS et Mc GOWN )

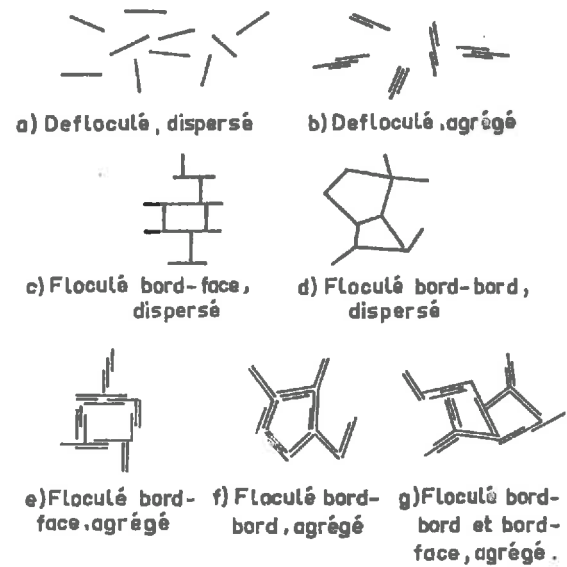


Fig. III.1.1. — Arrangements des particules d'argile.  
( d'après Van OLPHEN )

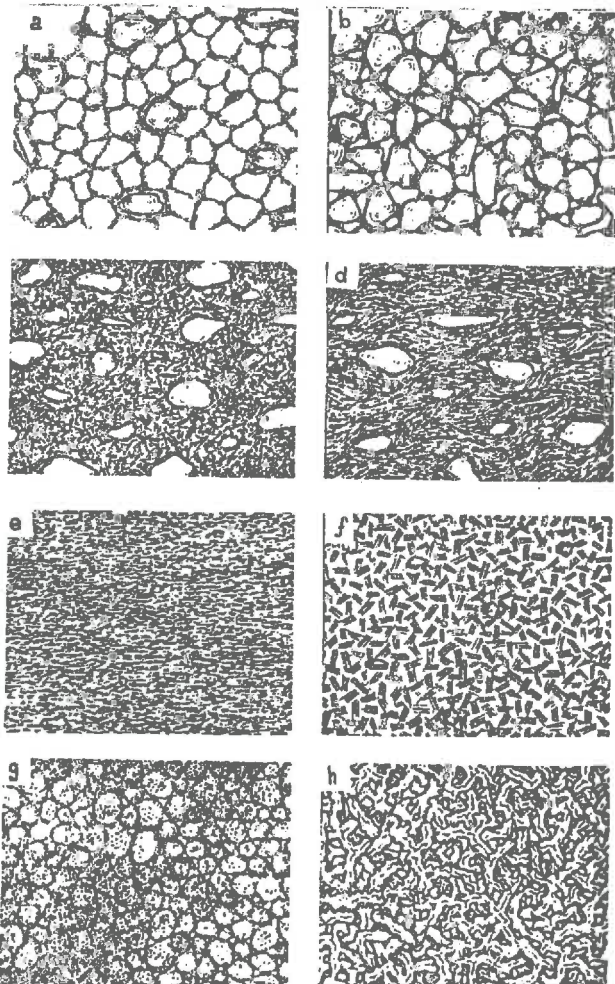


Fig. III.1.3. —  
Classification des textures des sols  
( d'après SERGEYEV et al. )

- a\_ TEXTURE EN NIDS D'ABEILLES .
- b\_ TEXTURE EN SQUELETTE
- c\_ TEXTURE MATRICIELLE
- d\_ TEXTURE FLUIDALE
- e\_ TEXTURE LAMINAIRE
- f\_ TEXTURE EN DOMAINE
- g\_ TEXTURE PSEUDOGLOBULAIRE
- h\_ TEXTURE EN EPONGE .

C'est l'organisation de ces diverses unités constitutives entre elles et avec les éléments non argileux (feldspaths, quartz, calcite...) qui définit la texture d'un sol argileux.

A partir des unités constitutives, différentes classifications de la texture des sols ont été mises au point.

Historiquement, on peut citer la classification de VAN OLPHEN (1963), basée sur l'association des particules entre elles (Figure III.1.1.), à partir des critères : dispersé, agrégé (particules face contre face en agrégats), floculé (association d'agrégats ou de particules bord-bord ou bord-face), défloclé (aucune association entre les particules ou entre les agrégats). Cette classification ne repose pas sur une observation directe, mais sur les possibilités d'assemblage géométrique.

LE ROUX (1972) distingue trois classes principales de textures, à partir d'observations sur des marnes :

- . texture homogène où tous les minéraux sont intimement mélangés et où aucune direction n'est privilégiée ;
- . texture orientée où une direction privilégiée apparaît dans l'arrangement des grains ;
- . texture floconneuse ou en microagrégats où la phase argileuse se présente sous forme de flocons grossièrement sphériques.

Cette classification est intéressante mais incomplète puisqu'on peut rencontrer des textures en microagrégats orientées ou non.

COLLINS et MAC GOWN (1974) tentent d'aller plus loin dans le cas des sols contenant une proportion non négligeable de grains non argileux, et définissent une classification des relations existant entre particules argileuses et grains sableux ou silteux (Figure III.1.2.) : connections argileuses entre grains silteux, agrégation irrégulière (en nid d'abeille), agrégation régulière, rubans argileux intertextiques (avec ou sans inclusions silteuses), matrice argileuse, matrice granulaire.

Plus récemment Y.H. SERGEYEV et al. (1978) ont établi une classification de la texture des sols argileux en relation avec leur formation et leur degré de compaction (Figure III.1.3.).

Les sols d'origine sédimentaire sont classés en cinq types :

- . texture en nid d'abeille (honeycomb) prédominante dans les dépôts récents d'origine marins et lacustres n'ayant pas subi de forte compaction ;
- . texture en squelette (skeletal) prédominante dans les dépôts glaciaires ne contenant que peu d'argile ;
- . texture matricielle (matrix) prédominante dans les dépôts d'origine alluviale et glaciaire peu compactés ;

- . texture fluidale (turbulent) prédominante dans les dépôts d'origine alluviale fortement compactés ;
- . texture laminaire (laminar) prédominante dans les dépôts d'origine glacio-lacustre .

Les sols d'origine eluviale. sont classés en 3 types :

- . texture en domaines (domain) prédominante dans les kaolinites originaires des granites ;
- . texture pseudoglobulaire (pseudoglobular) et texture en éponge (sponge) prédominantes dans les montmorillonites et nontronites originaires des serpentines.

De plus, différentes textures intermédiaires peuvent exister, selon le degré de compaction subi par les sols étudiés. Cette dernière classification, établie à partir de l'observation au microscope électronique à balayage d'un très grand nombre de sols différents, peut être considérée comme une des plus complètes et peut certainement être utilisée dans la majorité des cas.

#### III.1.2.2. - Le M.E.B. appliqué à l'étude du gonflement

Le microscope électronique à balayage n'a été que peu utilisé pour une application directe à l'étude du gonflement, sauf pour les sols à prépondérance smectitique et en tous cas le plus souvent pour des échantillons reconstitués.

OSIPOV et SOKOLOV (1978) montrent que la texture compacte en micro-agrégats d'une poudre sèche de montmorillonite se transforme avec le gonflement en une texture en nid d'abeille formée d'alvéoles dont les faces composées d'aggrégats de particules délimitent des pores isovolumiques.

COLLINS, MC GOWN et BARDEN (1973) reprenant les idées de DE BRUYN, affirment qu'un sol argileux contenant une proportion non négligeable d'éléments non argileux présente un potentiel de gonflement si les gros minéraux en grains (quartz, feldspaths,...) sont réunis par des ponts argileux, ou sont entourés par une couche argileuse, textures dénommées respectivement par KUBIENA, texture intertextique et texture chlamidomorphe.

#### III.1.2.3. - La porosimétrie appliquée à l'étude du gonflement

La microscopie électronique à balayage permet de visualiser la texture des sols, la porosimétrie à injection de mercure permet, elle, d'en quantifier le volume poreux.

Les travaux antérieurs de PELLERIN (1980) ont permis d'affiner l'interprétation des courbes porosimétriques d'injection et de retrait de mercure. Actuellement la porosimétrie au mercure livre trois paramètres indépendants :

- . la répartition des seuils de pores ou de fissures (rayons d'accès) en fonction du volume des vides accessibles par ces seuils
- . la porosité libre
- . la porosité piégée

Mais il faut préciser que les courbes porosimétriques ne permettent pas d'obtenir des renseignements sur l'interconnexion de l'espace poreux (tortuosité...).

Cette technique, bien que d'utilisation récente en ce qui concerne les sols, a déjà donné des résultats prometteurs. Des travaux antérieurs ont montré que les phénomènes mécaniques de consolidation statique (KONSTANKIEWICZ et STAWINSKI, 1976) et de gonflement dynamique (M. ARNOULD et al. 1980) ont une influence non négligeable sur la distribution de l'espace poreux, influence qui s'exerce principalement sur la porosité inter-agrégats.

### III.2. - OBSERVATIONS AU MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

#### III.2.1. - Terminologie

Les termes utilisés pour décrire la texture des sols étant très nombreux, puisque variant considérablement d'un auteur à l'autre, il est utile de définir ici tous ceux que nous utiliserons dans les pages suivantes.

##### . Phase solide

Les différents niveaux de constitution de la phase solide seront appelés :

- particule ou cristallite élémentaire : empilement d'un certain nombre de feuillets, constituant la plus petite unité visible au MEB .
- agrégat primaire : assemblage de particules constituant l'unité morphologique homogène (anisotrope ou non) à l'échelle de l'observation d'un état de référence, l'état naturel.
- agrégat secondaire : unité morphologique provenant de l'évolution d'un agrégat primaire (division : l'agrégat secondaire est plus petit que l'agrégat primaire- soudure : l'agrégat secondaire est plus gros que l'agrégat primaire).

##### . Pores

Les différents types de pores rencontrés seront classés en fonction de leur géométrie :

- si les 3 dimensions sont du même ordre de grandeur nous parlerons de pores sub sphériques
- si une dimension est grande par rapport aux deux autres nous parlerons de canaux ou de canalicules
- si deux dimensions sont grandes par rapport à la troisième nous parlerons de fractures à l'échelle macroscopique, et de pores bidimensionnels à l'échelle microscopique (de taille équivalente aux microfissures rencontrées dans les roches)

#### III.2.2. - Présentation de l'étude expérimentale

Chaque type de sol étudié est décrit séparément, en dégagant l'éventuelle évolution de texture engendrée par le gonflement, et une conclusion fait la synthèse de toutes nos observations.

Il faut préciser que celles-ci ayant pour but d'étudier l'influence du



ARGILE PLASTIQUE DE PROVINS — Après gonflement jusqu'à  $\omega = 30\%$

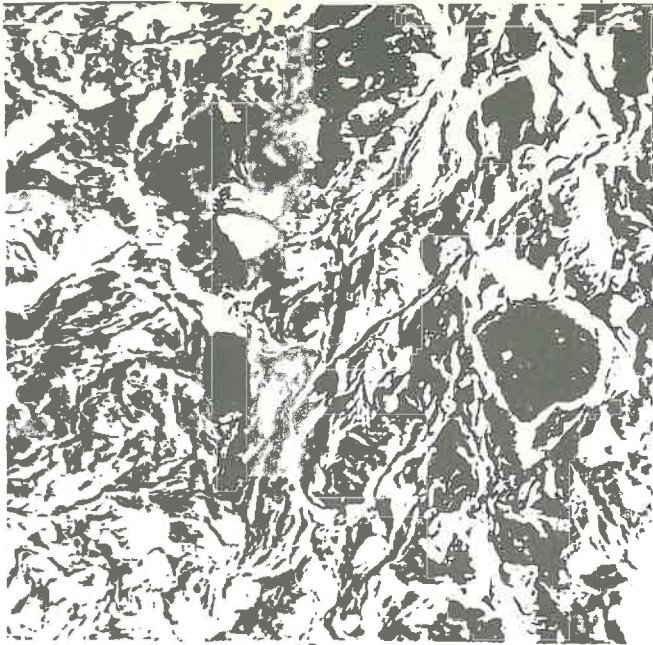


PHOTO 1 10  $\mu$



PHOTO 2 10  $\mu$

ARGILE PLASTIQUE DE PROVINS — Après gonflement jusqu'à  $\omega = 40\%$

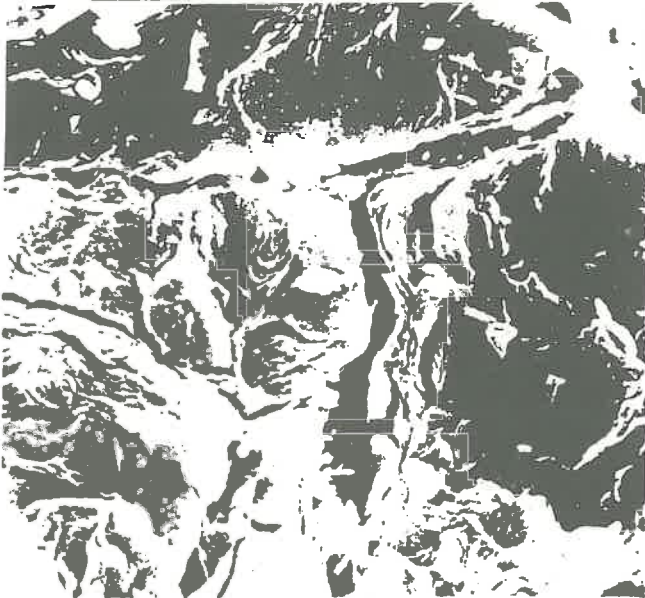


PHOTO 3 10  $\mu$



PHOTO 4 1  $\mu$

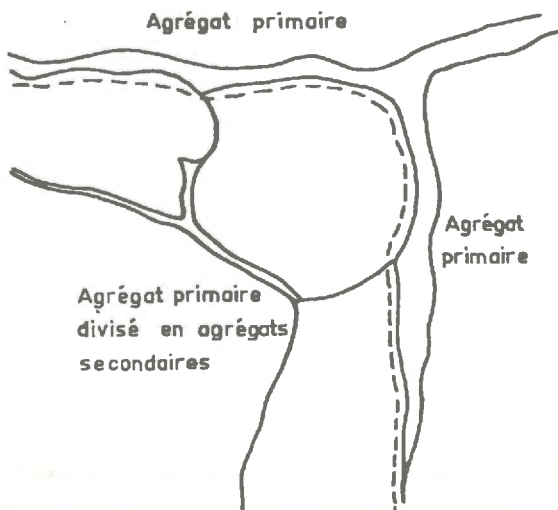


PHOTO 5 10  $\mu$

Fig. — Schéma de la photo n° 3

gonflement sur la texture, nous n'avons pas cherché à entrer systématiquement dans une des classifications décrites au § III.1.2.1.

Néanmoins si nous avons à caractériser un type de texture, nous utiliserons la terminologie de SERGEYEV et al. (1978).

Enfin il est utile d'ajouter que les photographies que nous présentons ne sont qu'une illustration des nombreuses observations effectuées sur plusieurs échantillons pour une même teneur en eau.

Toutes les observations et photographies sont faites à partir de tranches d'échantillon verticales, puisque le gonflement réalisé macroscopiquement est unidimensionnel vertical (échantillon confiné latéralement donc la variation volumique s'effectue dans le plan vertical).

### III.2.3. - Argile Plastique de Provins

Rappelons brièvement que l'Argile de Provins est un sol essentiellement composé de kaolinite et de quartz, s'apparentant à la famille des fire-clays et de granulométrie fine ( $76 \% < 2 \mu$ ).

Deux types d'échantillons sont présentés :

- . après gonflement jusqu'à :  $w = 30 \%$
- . après gonflement jusqu'à :  $w = 40 \%$

#### III.2.3.1. - Description des observations

##### Après gonflement jusqu'à $w = 30 \%$ - Photos n° 1, 2

La texture observée est assez compacte et présente une légère orientation. Elle s'apparente globalement au type fluidal. Des pores bidimensionnels délimitent des agrégats primaires de grande taille, (plusieurs dizaines de microns) (Photo n° 1). Ceux-ci sont relativement tassés les uns contre les autres, les pores ayant une épaisseur à 1 micron. On ne remarque qu'un niveau de porosité et d'agrégation.

Les agrégats sont constitués de particules de kaolinite de forme pseudo-hexagonale et de diamètre environ 0,2 à 0,4 microns, et se présentent aussi bien de face que sur la tranche (Photo n° 2).

##### Après gonflement jusqu'à $w = 40 \%$ - Photos 3, 4, 5

La texture est ici beaucoup plus aérée, sans orientation préférentielle. Des pores bidimensionnels d'environ 1 à 2 microns d'épaisseur délimitent des agrégats primaires de plusieurs dizaines de microns de dimension moyenne, redivisés eux-mêmes en agrégats secondaires plus petits séparés par des pores d'épaisseur inférieure à 1 micron (Photo n° 3 et Figure III.2.1.).



Certains de ces agrégats primaires sont en cours de division (phénomène visualisé par des amorces de pores).

### III.2.3.2. - Comparaison des échantillons - interprétation des observations

L'évolution de texture au cours du gonflement est très nette. La texture en agrégats se conserve tout au long du processus, mais ceux-ci s'écartent sensiblement les uns des autres et se divisent en unités plus petites (agrégats secondaires) selon des plans de résistance mécanique plus faible. Les pores sont de nature plutôt bidimensionnelle et leur épaisseur s'accroît au cours du gonflement. Plusieurs tailles de pores apparaissent sur l'échantillon le plus humide. Il faut enfin préciser que les agrégats eux-mêmes sont très compacts, la porosité intra-agrégat n'étant pas visible au M.E.B.

### III.2.4. - Fausses Glaïses

Les Fausses Glaïses sont essentiellement composées de kaolinite et d'interstratifiées illite-smectite. La granulométrie est très fine ( $98 \% < 2\mu$ ) et la surface spécifique assez grande ( $92 \text{ m}^2/\text{g}$  obtenu par la méthode B.E.T.).

Trois types d'échantillons sont présentés :

- |                             |          |
|-----------------------------|----------|
| . à teneur en eau naturelle | w = 34 % |
| . après gonflement jusqu'à  | w = 40 % |
| . après gonflement jusqu'à  | w = 46 % |

#### III.2.4.1. - Description des échantillons

##### Echantillon naturel (w = 34 %) - Photos 6,7,8,9

La texture observée ne présente pas d'orientation privilégiée, mais est relativement compactée. Elle s'apparente au type matriciel. On ne note pas d'agrégats nettement formés séparés par des pores, mais plutôt un réseau de pores bidimensionnels d'épaisseur (0,2 à 0,4 microns) (Photos n° 7 et 9) amorçant des délimitations d'agrégats primaires de grande taille (plusieurs dizaines de microns) (Photos n° 6 et 8).

**FAUSSES GLAISES** — Echantillon naturel  $\omega = 34\%$

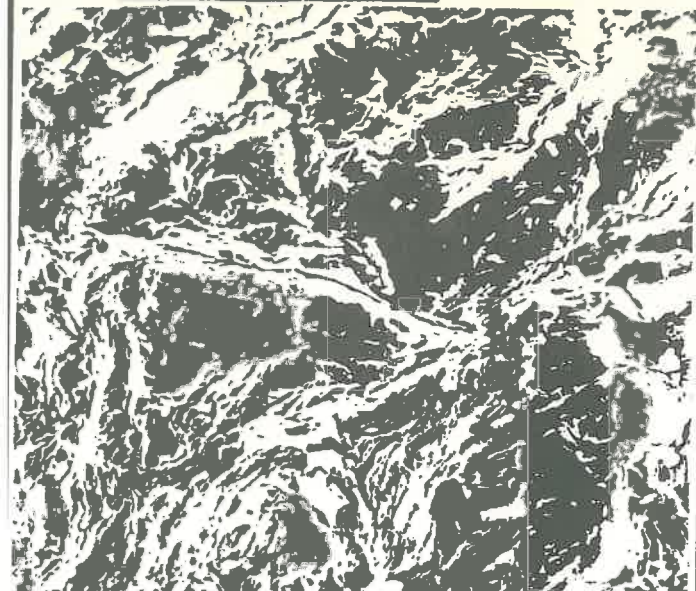


PHOTO 6 10  $\mu$



PHOTO 7 10  $\mu$

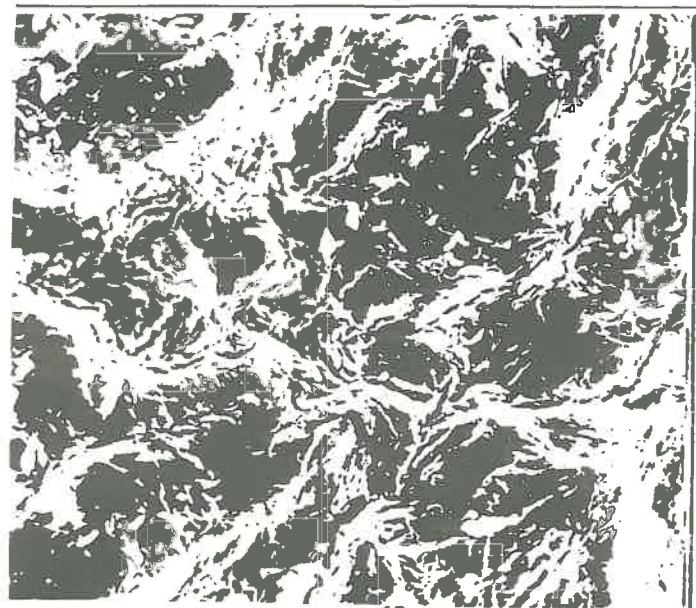


PHOTO 8 10  $\mu$



PHOTO 9 10  $\mu$

**FAUSSES GLAISES** — Après gonflement jusqu'à  $\omega = 40\%$

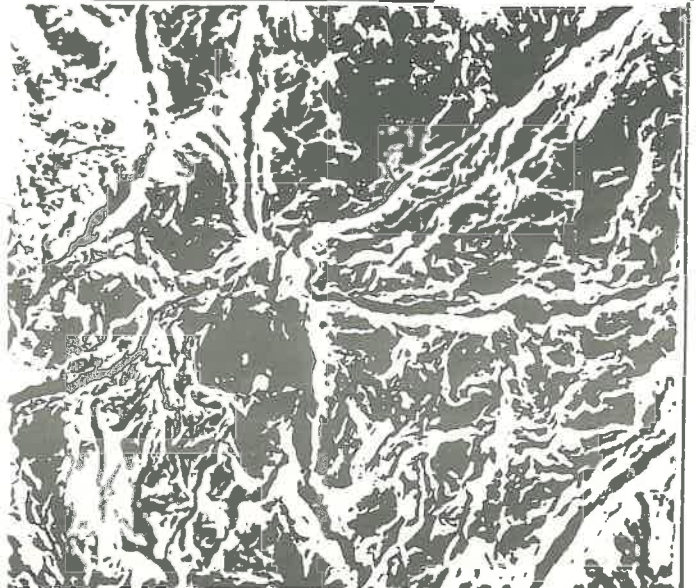


PHOTO 10 10  $\mu$



PHOTO 11 10  $\mu$



## FAUSSES GLAISES

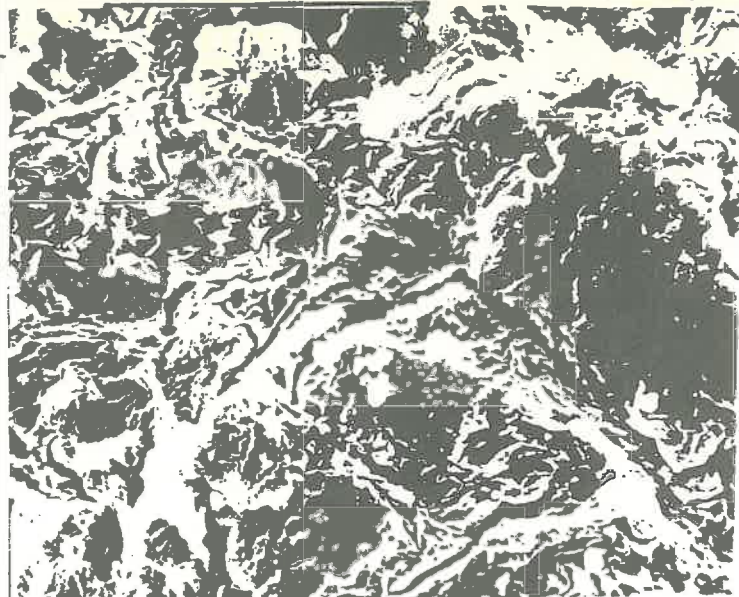
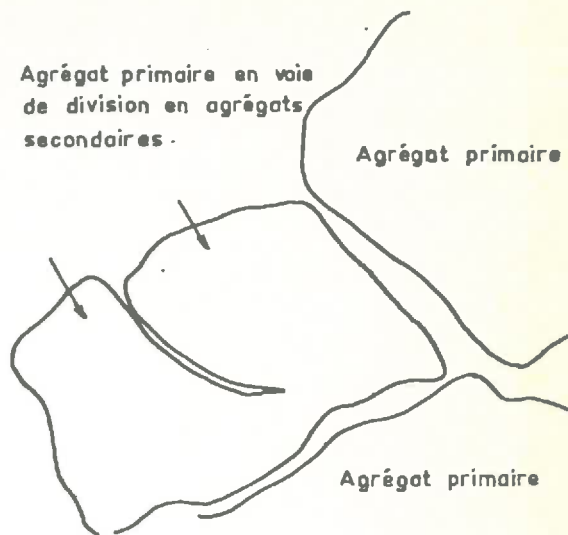
— Après gonflement jusqu'à  $\omega = 40\%$ 

PHOTO 12

10  $\mu$ 

Agrégal primaire en voie de division en agrégats secondaires.

Agrégal primaire



Agrégal primaire

Fig. — Schéma de la photo n°12

## FAUSSES GLAISES

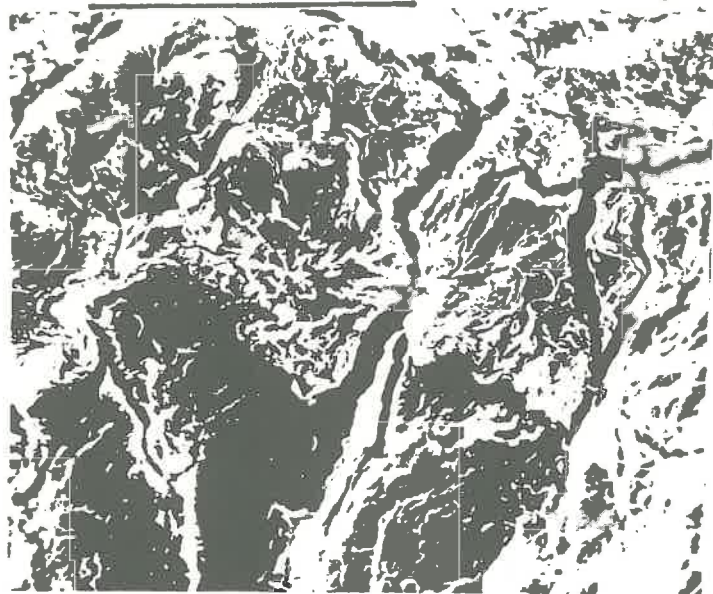
— Après gonflement jusqu'à  $\omega = 46\%$ 

PHOTO 13

10  $\mu$ 

Agrégal primaire

Agrégal primaire

Agrégal primaire divisé en agrégats secondaires.

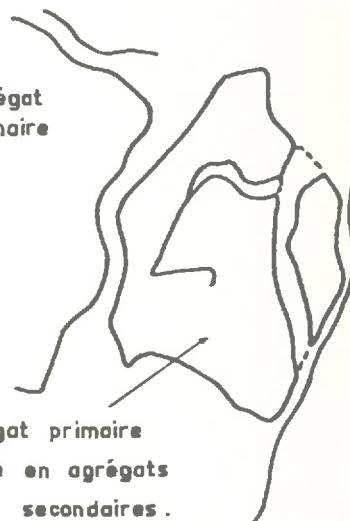


Fig. — Schéma de la photo n°13

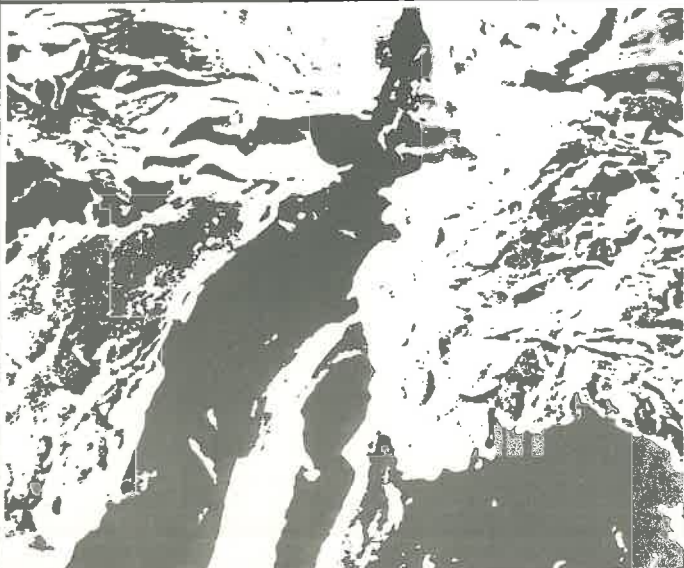


PHOTO 14

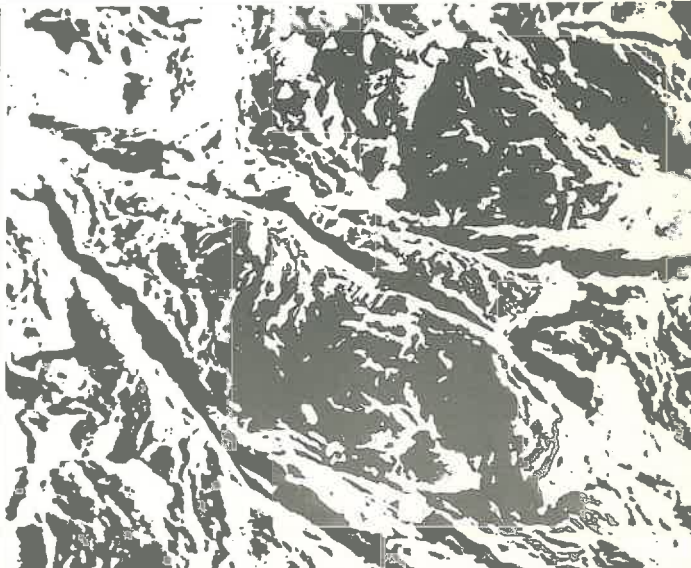
10  $\mu$ 

PHOTO 15

10  $\mu$

Les agrégats eux-mêmes sont constitués de particules de kaolinite de forme pseudo hexagonale et de diamètre d'environ 0,2 microns.

Après gonflement jusqu'à  $w = 40\%$  - Photos 10, 11, 12

On observe une texture de même type mais plus aérée (Photos n° 10 et 12). Les agrégats sont en moyenne assez gros (de 20 à 60 microns de taille), les pores délimitant les agrégats sont plus épais, environ 1 micron (Photo n° 11). Certains agrégats primaires sont divisés en agrégats secondaires plus petits, d'autres sont en cours de division (c'est le cas où un agrégat se recoupe en plusieurs plus petits (Photo n° 12 - et Figure III.2.2.).

Après gonflement jusqu'à  $w = 46\%$  - Photos 13, 14, 15

On remarque une texture très aérée et sans orientation préférentielle, constituée d'agrégats de tailles variables (de 10 à 30 microns de dimension moyenne) séparés par des pores allongés d'épaisseur 2 à 3 microns voire plus aux interconnexions (Photos n° 13, 14, 15). Les agrégats sont reliés entre eux par des ponts argileux appartenant ou n'appartenant pas à l'un des agrégats. Ceux-ci sont souvent redivisés en agrégats secondaires ou en voie de redivision (Photo n° 13 et Figure III.2.3.) par des pores d'épaisseur plus faible.

III.2.4.2. - Comparaison des échantillons : interprétation des observations

De même que pour l'Argile Plastique de Provins, l'évolution de texture est ici très nette. Le sol possède, en son état naturel, une texture compacte aux pores fins et allongés. C'est dans ces zones privilégiées (certainement de moindre résistance mécanique) que l'eau est attirée pendant le processus de gonflement. Ces pores s'agrandissent au cours du gonflement, et délimitent des agrégats, d'abord primaires et assez gros puis qui se subdivisent en agrégats secondaires plus petits, faisant apparaître ainsi plusieurs tailles de pores. Par contre la compacité des agrégats eux-mêmes ne semble pas être affectée.

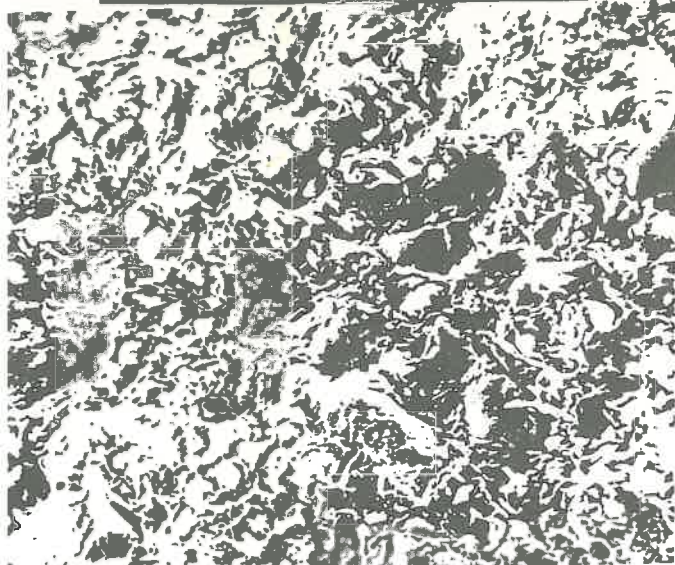
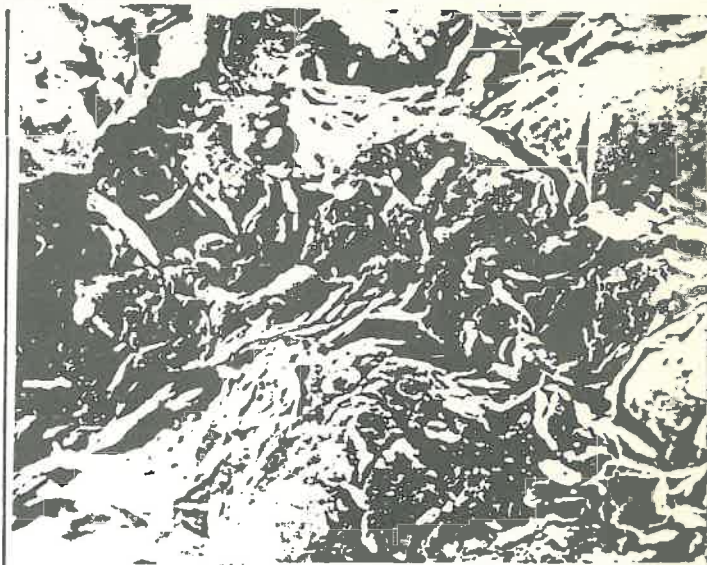
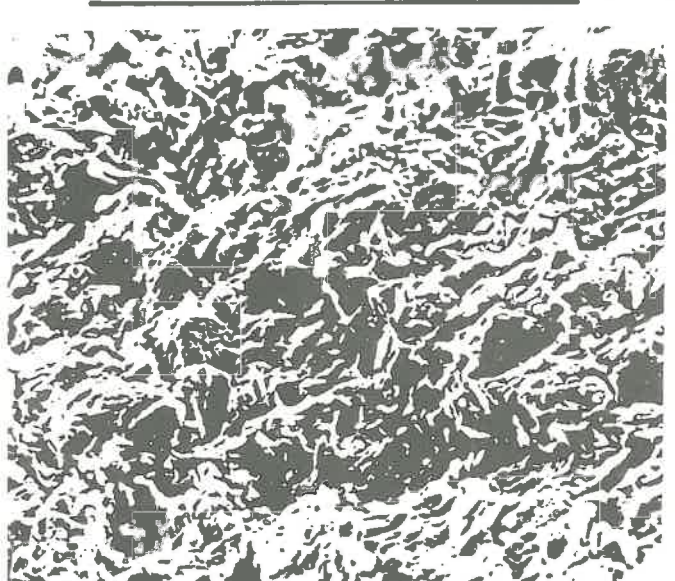
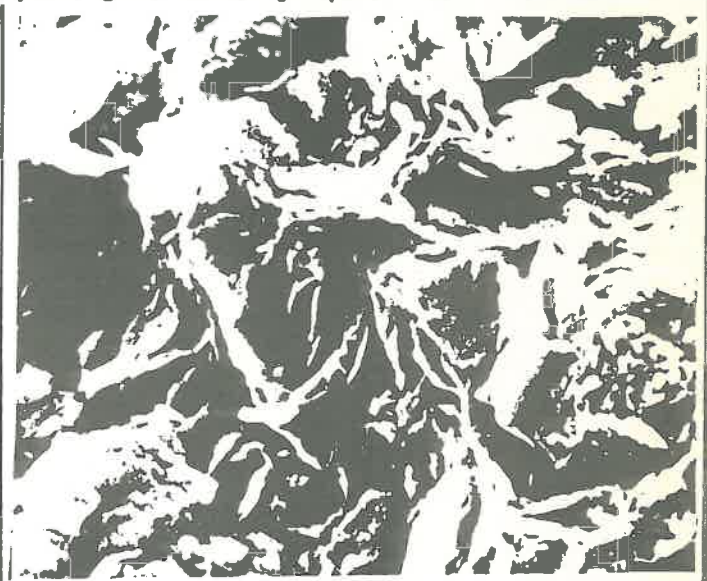
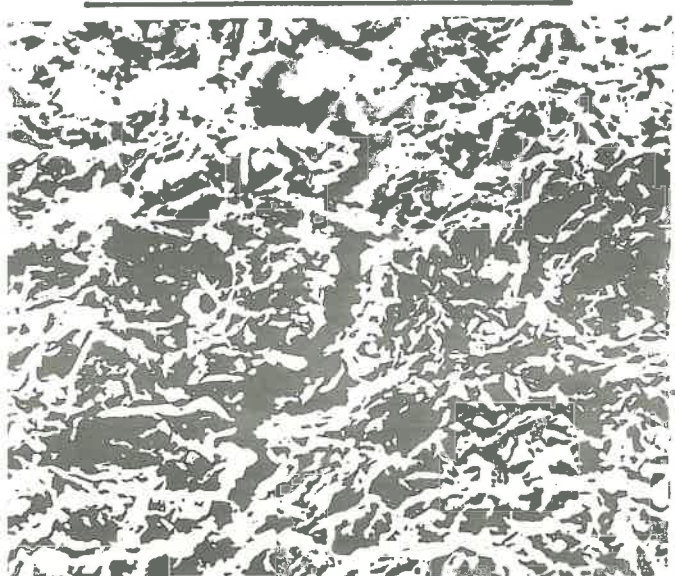
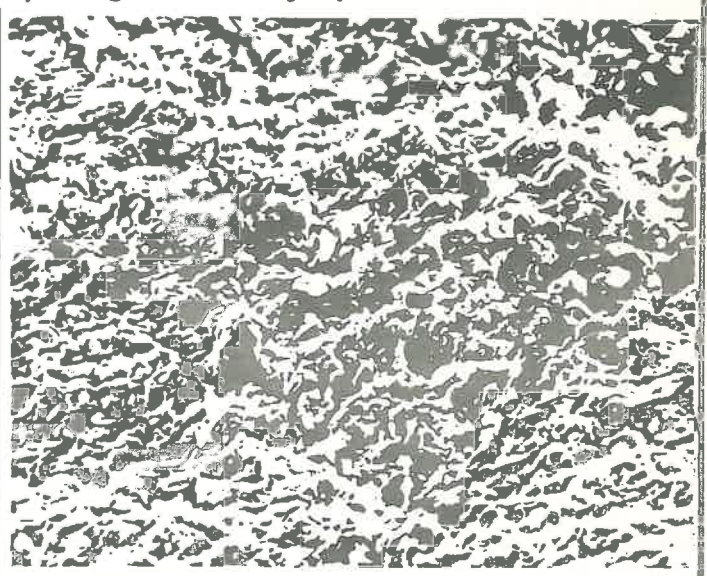
III.2.5. - Argile Verte de Montreuil

L'Argile Verte de Montreuil est composée essentiellement d'illite, d'interstratifié illite-smectite et de calcite. Elle contient également un peu de kaolinite et de smectite, et sa granulométrie est fine ( $76\% < 2\mu$ )

Trois types d'échantillons sont présentés :

- |                             |            |
|-----------------------------|------------|
| . à teneur en eau naturelle | $w = 30\%$ |
| . après gonflement jusqu'à  | $w = 43\%$ |
| . après gonflement jusqu'à  | $w = 47\%$ |



ARGILE VERTE DE MONTREUILPHOTO 16 10  $\mu$ Echantillon naturel  $\omega = 30\%$ PHOTO 17 10  $\mu$ ARGILE VERTE DE MONTREUILAprès gonflement jusqu'à  $\omega = 43\%$ PHOTO 18 10  $\mu$ PHOTO 19 10  $\mu$ ARGILE VERTE DE MONTREUILAprès gonflement jusqu'à  $\omega = 47\%$ PHOTO 20 10  $\mu$ PHOTO 21 10  $\mu$

### III.2.5.1. - Description des échantillons

#### Echantillon naturel w = 30 % - Photos 16, 17

On remarque une texture compacte, non orientée, où des pores fins bidimensionnels délimitent des agrégats primaires tassés les uns contre les autres et liés parfois par des ponts argileux (Photo n° 17)

On note la présence de grains non argileux (Photo n° 16) entourés de cristallites argileuses. La texture s'apparente globalement au type matriciel avec par endroits abondance de grains non argileux.

#### Après gonflement jusqu'à w = 43 % - Photos 18, 19

La texture est ici un peu plus aérée, on ne note pas d'agrégats primaires de grande taille, mais plutôt de dimension moyenne 10 microns environ, et séparés par des pores d'environ 1 micron d'épaisseur. La porosité intra agrégat est elle-même assez lâche (Photo n° 19).

#### Après gonflement jusqu'à w = 47 % - Photos 20, 21

On observe une texture très aérée et isotrope. Des pores bidimensionnels d'épaisseur 1 à 2 microns délimitent des agrégats primaires. Ceux-ci sont constitués d'agrégats secondaires de tailles très diverses (de quelques microns à 20 microns) formés de cristallites argileuses assemblées face contre face. Néanmoins la texture est ici en partie masquée par la porosité intra-agrégat lâche.

### III.2.5.2. - Comparaison des trois échantillons : interprétation des observations

Bien que les observations soient ici moins nettes que pour les matériaux précédemment décrits, en raison de la porosité intra-agrégat et de la présence de grains de calcite, la texture évolue dans le même sens au cours du gonflement.

Si le sol naturel a une texture assez compacte aux pores fins et bidimensionnels, le gonflement se produit dans ces pores et écarte les agrégats primaires les uns des autres. De plus la taille des agrégats diminue au cours du gonflement, preuve de leur redivision.



### III.2.6. - Marne Bleue de Nogent

La Marne Bleue de Nogent est composée essentiellement d'illite, d'interstratifié illite-smectite et de calcite. Elle contient également un peu de chlorite et de quartz. La granulométrie est fine ( $86 \% < 2 \mu$ ) et sa surface spécifique assez grande ( $86 \text{ m}^2/\text{g}$  obtenu par la méthode B.E.T).

Deux types d'échantillons sont présentés :

- . à teneur en eau naturelle      w : 30 %
- . après gonflement jusqu'à      w : 50 %

#### III.2.6.1. - Description des échantillons

##### Echantillon naturel w = 30 % - Photos 22 et 23

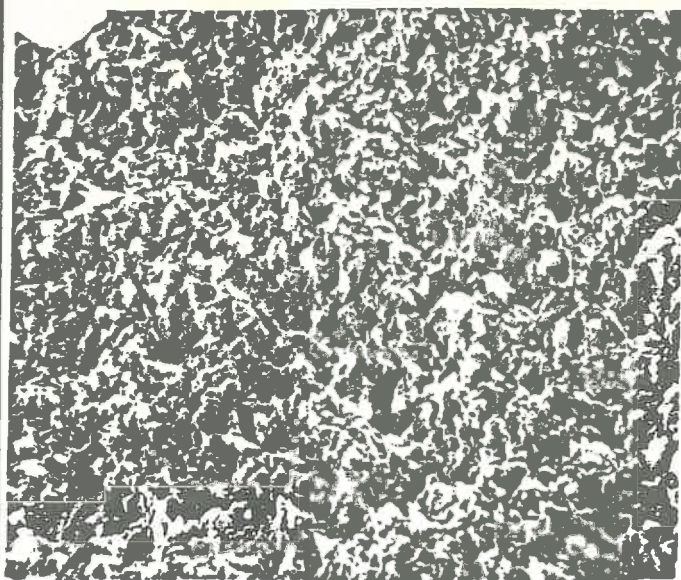
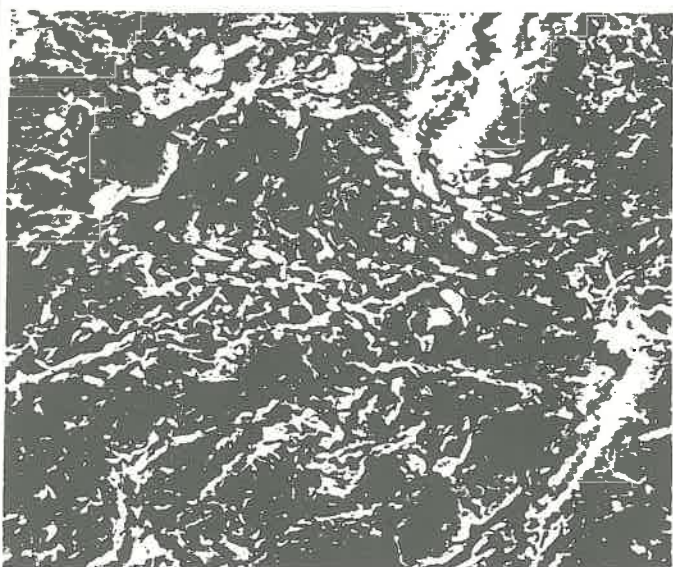
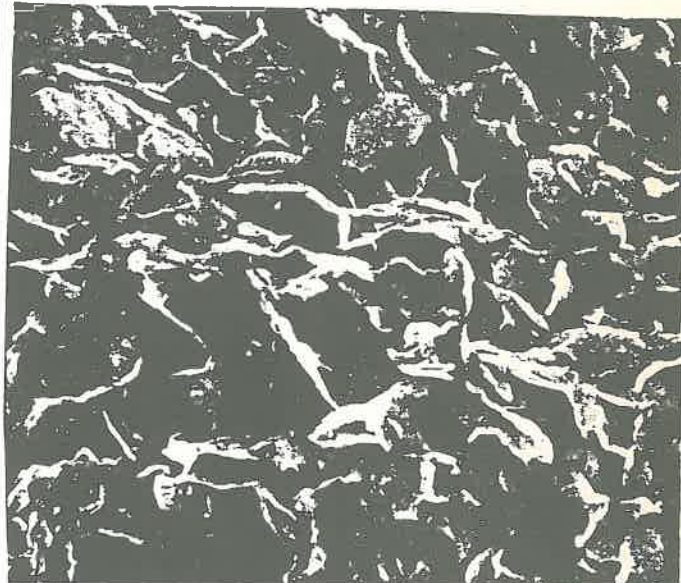
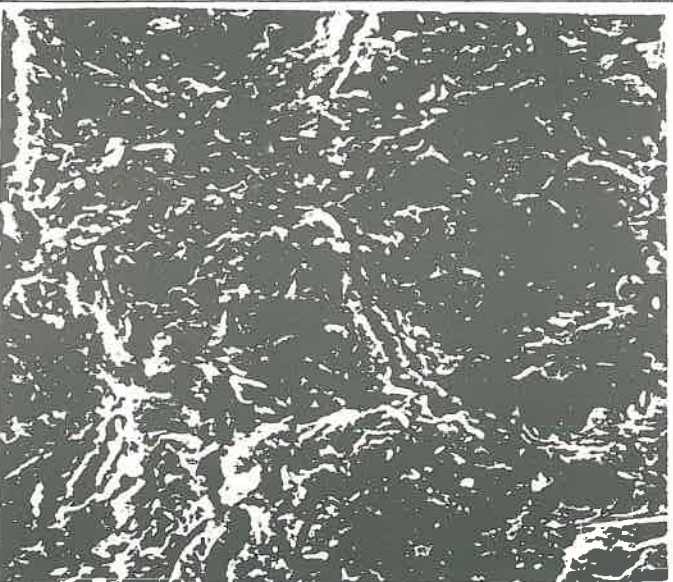
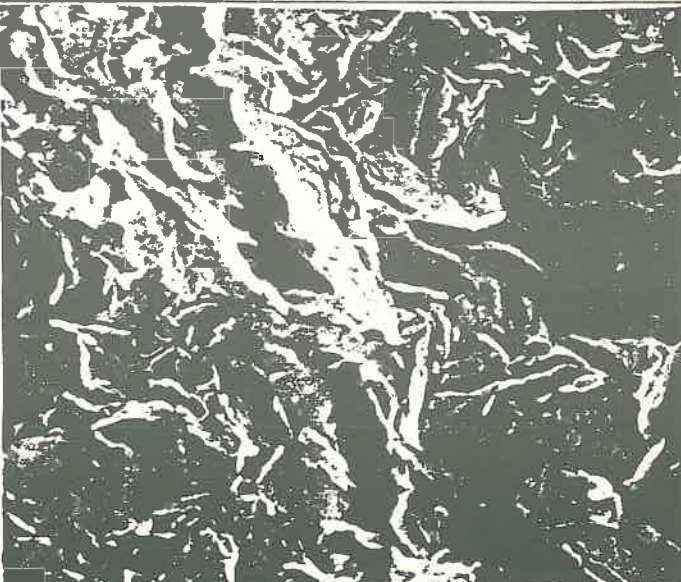
La texture est uniforme, compacte, et relativement anisotrope. Elle s'apparente globalement au type laminaire. On ne constate pas d'agrégats bien formés, les cristallites sont assez bien assemblées bord-bord et face-face uniformément, délimitant ainsi un volume solide assez compact.

##### Après gonflement jusqu'à w = 50 % - Photos 24, 25, 26, 27

On observe une texture très aérée et isotrope, constituée d'agrégats de dimension 20 à 30 microns (Photos 24 et 26), séparés par des pores bidimensionnels de 1 micron d'épaisseur (Photo n° 27). Les agrégats eux-mêmes, constitués de cristallites assemblées bord-bord et face-face sont compacts, mais présentent parfois des zones assez lâches en nids d'abeille (Photo n° 25) typiques d'un caractère plus smectitique.

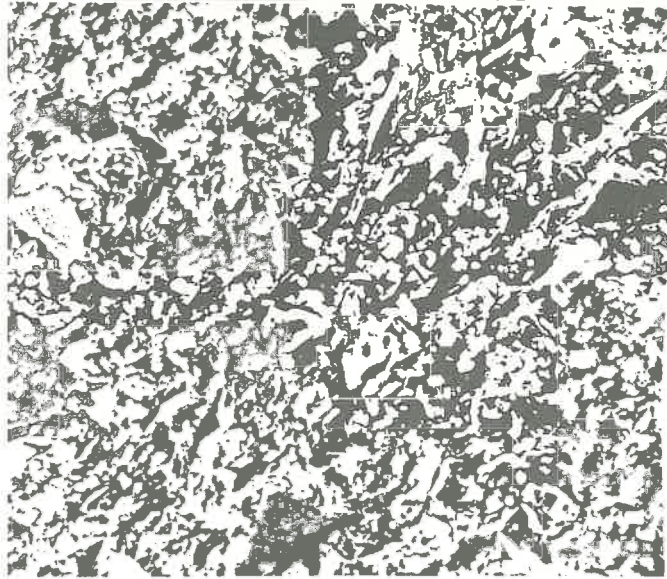
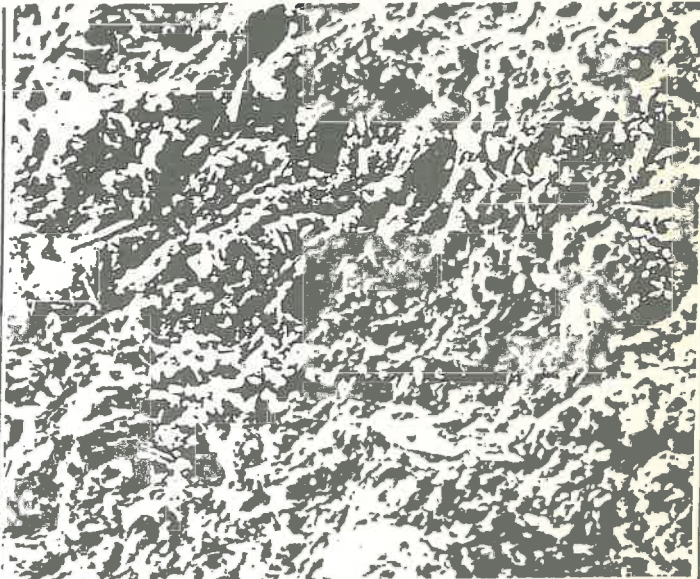
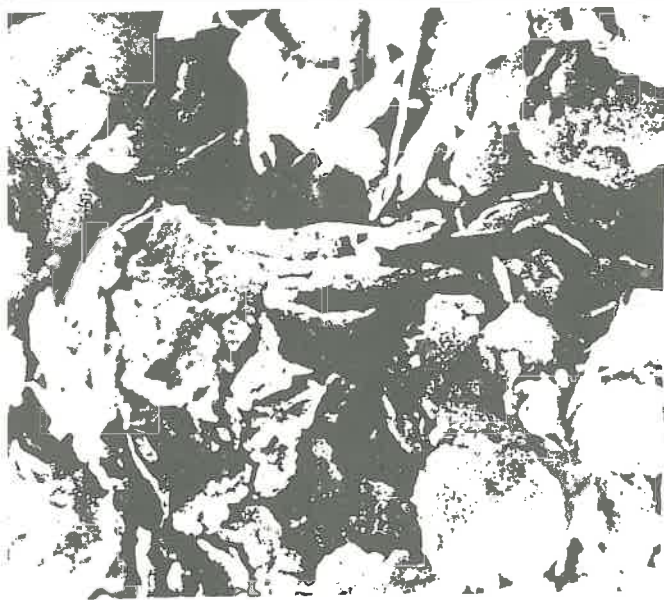
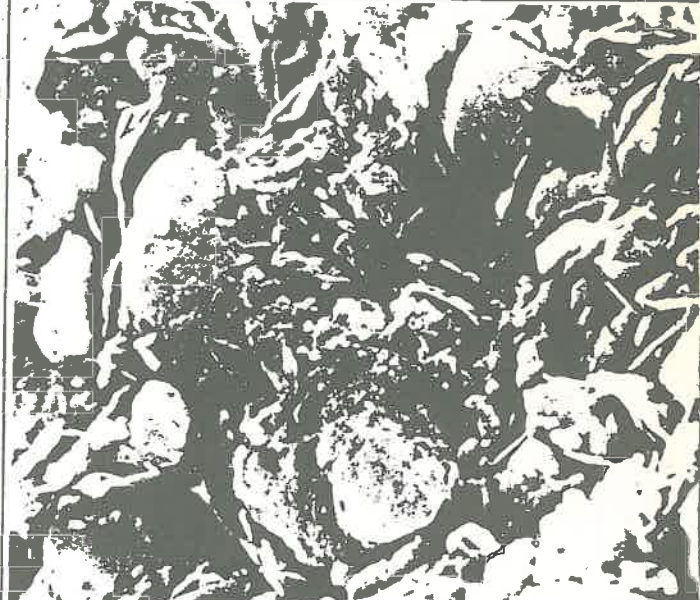
#### III.2.6.2. - Comparaison des deux types d'échantillons : interprétation des observations

L'évolution de texture est encore plus marquée que pour les sols précédemment décrits. Le matériau passe d'un état naturel compact et uniforme à une texture en agrégats nettement séparés par des pores bidimensionnels.

MARNE BLEUE DE NOGENTEchantillon naturel  $\omega = 30\%$ PHOTO 22  $10\ \mu$ PHOTO 23  $10\ \mu$ MARNE BLEUE DE NOGENTAprès gonflement jusqu'à  $\omega = 50\%$ PHOTO 24  $10\ \mu$ PHOTO 25  $10\ \mu$ PHOTO 26  $10\ \mu$ PHOTO 27  $10\ \mu$



## ARGILE D'AIX LES BAINS

Echantillon  $\alpha$   $\omega = 26\%$ PHOTO 28 10  $\mu$ PHOTO 29 10  $\mu$ PHOTO 30 1  $\mu$ PHOTO 31 1  $\mu$

### III.2.7. - Argile d'Aix-Les-Bains

L'Argile d'Aix-Les-Bains est composée d'illite et de chlorite très bien cristallisées de quartz, de feldspath et de calcite. Elle ne comporte que 40 % d'éléments inférieurs à 2 microns, et s'apparente plutôt aux silts. Les échantillons naturels avant consolidation, et les échantillons après consolidation suivie de gonflement, présentent la même teneur en eau, et nous avons constaté globalement une texture identique dans les deux cas.

Nous présentons donc seulement un type d'échantillon à 26 % de teneur en eau (Photos n° 28, 29, 30, 31 ).

On note l'abondance des grains non argileux qui constituent l'ossature du squelette (Photos n° 28 et 31 ). La texture, isotrope (alors que macroscopiquement l'échantillon est anisotrope), est constituée de grains non argileux entourés et séparés par des cristallites d'argile.

Mais localement la texture est matricielle (Photo n° 30). Les phyllites peuvent alors s'associer en unités bidimensionnelles de 1 à 2 microns de diamètre sur une faible épaisseur (0,1 à 0,2 microns). Ce type d'association est différent de celui observé pour les sols précédents, mais rappelle les textures d'autres formations glaciaires (Argiles Sensibles du Québec, P. DELAGE, 1979).

### III.2.8. - Conclusion - Evolution de la texture des sols au cours du gonflement appréciée au M.E.B.

Les observations au M.E.B. montrent que le gonflement des sols argileux est intimement lié à leur texture. D'une façon générale les sols étudiés possèdent à l'état naturel une texture compacte où les agrégats sont assez mal individualisés, évoluant au cours du gonflement en une texture nettement en agrégats de plus en plus divisés.

La Figure III.2.4. ci-dessous modélise cette évolution.

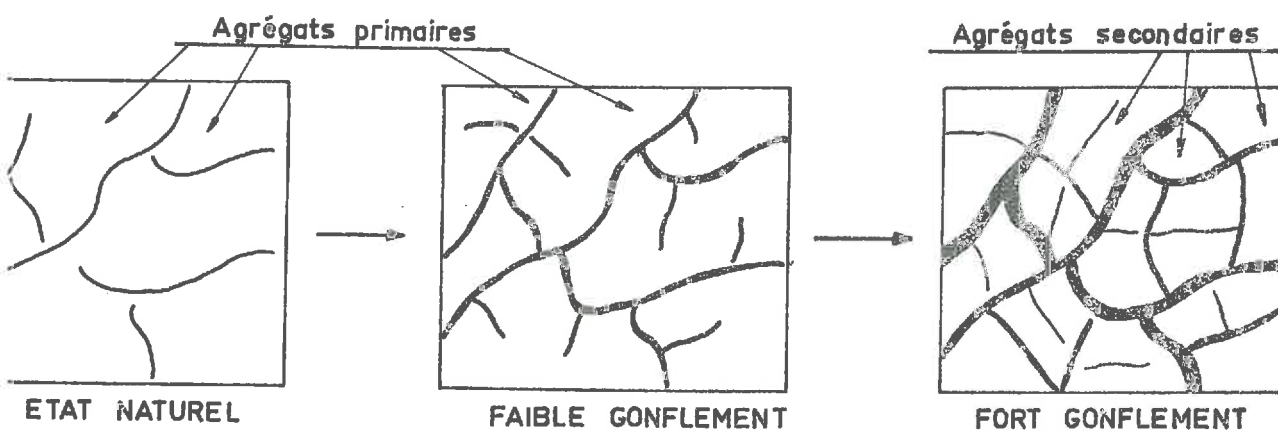


Figure III.2.4. - Evolution de texture des sols au cours du gonflement

Les agrégats sont séparés par des pores bidimensionnels dont l'épaisseur augmente pendant le gonflement tandis que la taille moyenne des agrégats diminue. Les noeuds du réseau poreux (interconnexions des agrégats) doivent s'apparenter à des pores sub-sphériques. Les agrégats primaires, de grande taille, existant à l'état naturel, se divisent en agrégats secondaires plus petits, tout en s'écartant progressivement les uns des autres, faisant apparaître ainsi plusieurs niveaux d'agrégation et de porosité inter-agrégat.

Le M.E.B. ne permet pas d'apprécier finement la porosité intra-agrégats, mais la compacité de ceux-ci semble ne pas varier pendant le gonflement.

### III. 3. - ETUDE POROSIMETRIQUE

#### III.3.1. - Terminologie - Représentations graphiques - Unités

Des essais porosimétriques ont été effectués pour chacun des 5 types de sol sur des échantillons ayant gonflé jusqu'à diverses teneurs en eau. Nous avons pu ainsi obtenir la distribution du volume poreux dans chacun des cas.

Deux types de représentation de base sont utiles :

- . la courbe porosimétrique cumulée d'injection de mercure, qui donne pour chaque rayon d'accès  $R$  le volume poreux accessible par un rayon inférieur ou égal à  $R$ , et celle de retrait de mercure, qui donne le volume poreux piégé, représentées en coordonnées semi-logarithmiques. Les rayons ainsi calculés sont des rayons équivalents, égaux soit à un rayon réel dans le cas d'un canal, soit à une épaisseur dans le cas d'un pore bidimensionnel.
- . la courbe porosimétrique dérivée, qui permet d'obtenir avec plus de précision le ou les modes de la distribution (c'est-à-dire le ou les points d'inflexions de la courbe cumulée), correspondant au plus grand volume poreux accessible par une classe de rayons. L'assimilation entre les classes de rayons d'accès ainsi définies et les familles de pores observées au M.E.B. n'est pas immédiate, elle dépend de l'adéquation entre le modèle porosimétrique utilisé et l'observation directe. Un des buts de cette étude est de vérifier cette adéquation.

De façon à faciliter l'interprétation nous avons représenté pour chaque type de sols les divers essais réalisés sur un même diagramme, pour visualiser l'évolution de la distribution du volume poreux au cours du gonflement.

Nous présentons ainsi pour chaque type de sol 4 diagrammes :

- . les courbes porosimétriques cumulées d'injection et de retrait  
(Figure III.3.4. a à e)
- . les courbes porosimétriques dérivées  
(Figure III.3.5. - a à e)
- . un diagramme de synthèse représentatif de la variation des divers paramètres accessibles par porosimétrie en fonction du gonflement apprécié par la variation  $\Delta w$  des teneurs en eau par rapport à la teneur en eau naturelle  
(Figure III.3.6. - a à e).

à savoir :

- la teneur en eau  $w$  de l'échantillon
- le volume poreux  $V_T$  accessible par des rayons compris entre 50 Å et 100 microns



- le volume poreux piégé  $V_p$  au cours du retrait entre 50 A° et 100 microns
- le volume poreux libre  $V_L = V_T - V_p$
- un volume poreux  $V_m$  défini arbitrairement par une coupure à 500 A° que nous appellerons volume microporeux et qui a pour but de caractériser la porosité la plus fine.
- . le diagramme représentant le logarithme du ou des rayons modaux de la distribution en fonction de la teneur en eau (Figure III.3.7. - a à d).

De plus, un tableau récapitulatif (Tableau III.3.6 .) présente les résultats numériques essentiels des essais porosimétriques effectués.

#### / Remarque / - Unités

La porosimétrie au mercure permet d'apprécier des volumes poreux. Ceux-ci sont directement mesurés en  $\text{mm}^3$  de porosité par gramme de sol sec ( $\text{mm}^3/\text{g}$ ) Nous allons être amenés à comparer des volumes poreux à des teneurs en eau. Une teneur en eau est classiquement exprimée en pourcentages, mais pour les comparaisons effectuées il est nécessaire d'exprimer les teneurs en eau en  $\text{mm}^3/\text{g}$  :

$$w \text{ en } \text{mm}^3/\text{g} = 10.w \text{ en } \%$$

Nous utiliserons donc dans ce paragraphe l'unité  $\text{mm}^3/\text{g}$  à la fois pour les volumes poreux et les teneurs en eau, lorsque nous serons amenés à les comparer.

Alors que les observations au M.E.B. entraînaient d'elles-mêmes une description détaillée de la texture type de sol par type de sol, il est préférable ici, en raison du nombre de paramètres en jeu, d'étudier chaque paramètre successivement pour tous les sols en question afin d'apprécier leur évolution au cours du gonflement.

C'est pourquoi l'ensemble des diagrammes présentés est regroupé à la fin de ce paragraphe, chacun d'entre eux pouvant pratiquement être utilisé à toutes les étapes de l'étude.

#### III.3.2. - Modèle d'interprétation d'un essai porosimétrique

Tout essai porosimétrique permet d'obtenir directement une courbe porosimétrique cumulée. Plaçons nous dans le cas le plus simple d'une distribution unimodale (Figure III.3.1.)

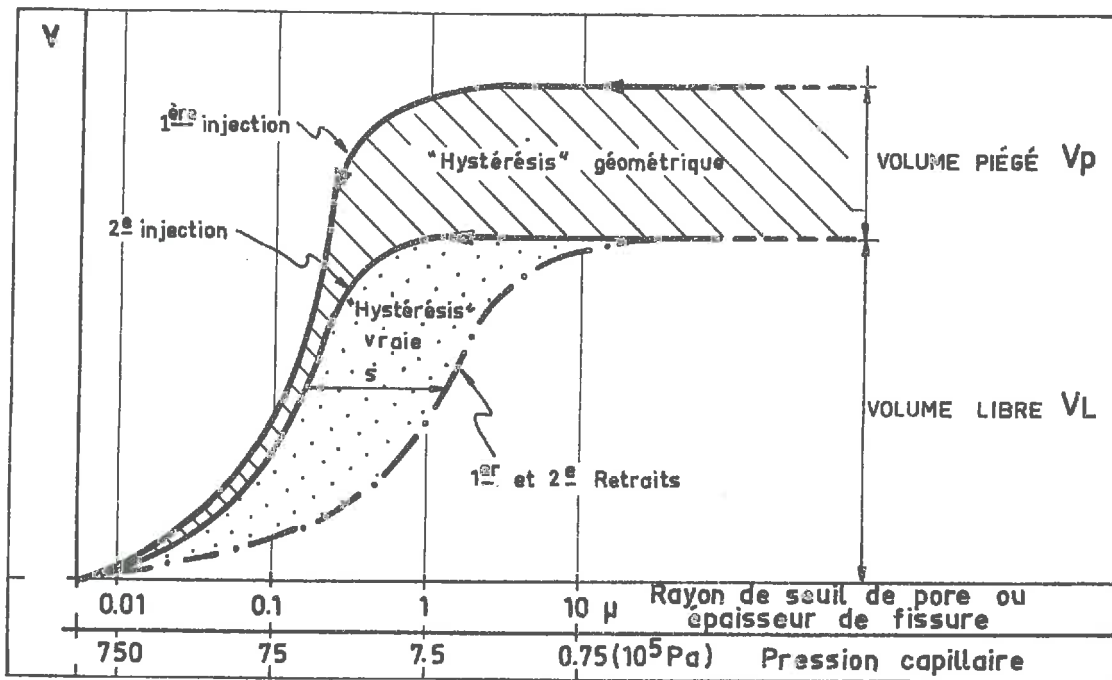


Figure III.3.1. - Courbe type de cycles de pressions capillaires sur un milieu unimodal

La courbe de 1ère injection livre directement la distribution du volume poreux total  $V_T$  accessible par tout rayon d'accès inférieur à une dimension donnée et les valeurs de la porosité libre  $V_L$  et de la porosité piégée  $V_p = V_T - V_L$ . L'hystérésis entre la courbe de 1ère injection et la courbe de retrait est une hystérésis géométrique due au mercure qui reste piégé dans les évasements des pores, les vacuoles, et dans les pores connectés par toutes leurs extrémités à d'autres pores de plus petite taille. Si le rayon d'accès de tout pore était égal à son rayon moyen, il n'y aurait pas de porosité piégée (cas du faisceau de capillaires cylindriques parallèles).

La courbe de 2ème injection livre la distribution de la porosité libre. L'hystérésis entre la courbe de 2ème injection et la courbe de 2ème retrait (confondue à celle de 1er retrait) est une hystérésis "vraie", thermodynamique (variation de la valeur de l'angle de raccordement du ménisque  $\theta$  en injection et en retrait due à des phénomènes irréversibles tels que la mouillabilité, etc...). Chaque classe de pores (ici une seule) est centrée autour du point d'inflexion correspondant sur la courbe (ou autour du pic de la courbe dérivée), qui représente le noyau modal de la classe en question, c'est-à-dire la taille de rayon d'accès la plus représentée.

La porosimétrie s'appuie sur des schématisations simples du milieu poreux. La plus simple consiste à assimiler le réseau poreux à un faisceau de tubes capillaires cylindriques, modèle qui a été utilisé longtemps dans le cas des roches. Pour les sols nous sommes conduits (grâce aux observations au M.E.B.) à compliquer un peu ce modèle. La schématisation la plus générale consiste à considérer le réseau poreux comme un ensemble de canaux cylindriques, de pores bidimensionnels, de vacuoles et d'étranglements subsphériques, interconnectés de toutes les manières possibles. On voit ici la nécessité d'utiliser le rayon d'accès de pore, qui peut être très différent du rayon moyen du pore (tout dépend de l'interconnexion des pores). Malheureusement il est impossible d'appréhender l'interconnexion des pores (notions de tortuosité et d'accessibilité) à l'aide de la porosimétrie.

### III.3.3. - Etude du spectre de porosité des matériaux naturels

Nous avons représenté sur un même diagramme Figure III.3.2., les courbes porosimétriques cumulées des cinq sols étudiés à l'état naturel. On constate que l'Argile Plastique de Provins et les Fausses Glaises présentent une courbe porosimétrique nettement bimodale. Deux classes de pores sont mises en évidence, une première classe de pores fins (rayons d'accès  $< 0,05 \mu$ ) dont l'essentiel doit constituer la porosité intra agrégats, et une deuxième classe de pores plus gros (rayons d'accès  $> 0,05 \mu$ ) dont l'essentiel doit constituer la porosité inter-agrégats. On remarque que la courbe semble se prolonger très nettement (pente forte) en deçà de  $50 \text{ A}^\circ$ , accusant ainsi une porosité très fine importante et non prise en compte.

Ce point est en accord avec la finesse de leur granularité mise en évidence par les courbes granulométriques.

Pour les trois autres sols, Argile Verte de Montreuil, Marne Bleue de Nogent, Argile d'Aix-Les-Bains, la première classe (pores fins) est très nettement moins importante et s'estompe en deçà de  $50 \text{ A}^\circ$  (courbe tangente à l'axe des rayons d'accès) dans le cas de l'Argile d'Aix-Les-Bains.

Il paraît plausible d'affirmer que la porosité d'accès inférieur à  $50 \text{ A}^\circ$  est plus faible pour les Marnes Bleues et l'Argile Verte, et quasi nulle pour l'Argile d'Aix-Les-Bains, mais pour étudier en détail cette porosité, il serait nécessaire d'employer une méthode telle que la désorption d'azote qui prolonge l'essai BET.

Enfin pour les cinq sols étudiés, on ne remarque pas (ou très peu) de porosité d'accès supérieur à  $10 \text{ microns}$  (la courbe devient horizontale), qui dans le cas des sols est généralement attribuée à une porosité fissurale de retrait.

Il est donc possible de classer les sols étudiés en 3 catégories :

- . les sols à microporosité importante : Argile Plastique de Provins et Fausses Glaises

- . les sols à microporosité de moyenne importance : Argile Verte de Montreuil et Marne Bleue de Nogent
- . un sol à microporosité très faible : Argile d'Aix-Les-Bains

Il est à remarquer que le seul sol (Argile d'Aix) ne présentant qu'une classe de pores (courbe unimodale) est aussi le seul à ne pas bien exprimer une texture en agrégats ou évoluant en agrégats au gonflement.

#### III.3.4. - Evolution du volume poreux total

Le volume poreux total  $V_T$ , qui n'est en fait que le volume poreux accessible par des rayons compris entre 50 Å et 100 microns, augmente avec le gonflement. Mais on constate un écart entre le volume poreux total  $V_T$  et la teneur en eau mesurée expérimentalement  $w$  (Figure III.3.6. - a à e),  $V_T$  étant pratiquement toujours inférieur à  $w$ . Cet écart relatif est important (30 %) pour l'Argile de Provins et les Fausses Glaïses, moyen (15 %) pour l'Argile Verte de Montreuil et la Marne Bleue de Nogent, nul pour l'Argile d'Aix-Les-Bains.

A part quelques possibilités d'erreurs de manipulation (retrait à la lyophilisation mais inférieur à 2 % absolus, mesure de la teneur en eau prise à côté de l'échantillon lyophilisé) dont l'importance reste très faible, et la porosité d'accès supérieur à 100 microns, qui est quasi nulle pour les sols étudiés, l'écart entre le volume poreux total et la teneur en eau mesurée provient de la porosité d'accès inférieur à 50 Å non prise en compte. La variation de cet écart selon les sols est parfaitement en accord avec les remarques effectuées sur la porosité d'accès inférieur à 50 Å (§ III.3.3.) il est donc ainsi possible d'obtenir une estimation de cette porosité non mesurée, directement par différence entre la teneur en eau et le volume poreux total.

#### III.3.5. - Evolution de la microporosité

Nous avons défini un volume microporeux  $V_m$  par une coupure arbitraire à 500 Å (0,05  $\mu$ ). Cette coupure n'a rien de formel mais a été choisie au vu des courbes porosimétriques en raison de sa position toujours intermédiaire entre les deux familles de pores. Elle nous permet de caractériser un volume microporeux de type intra-agrégats, étant bien entendu qu'aux environs de 500 Å la porosité correspondante peut appartenir aussi bien à l'une qu'à l'autre des deux classes de pores. Cette coupure, systématisée à tous les sols étudiés, n'a évidemment aucune signification physique dans le cas de l'Argile d'Aix-Les-Bains pour laquelle l'agrégation des particules



d'argile n'est pas bien exprimée et qui ne possède qu'une classe de pores.

On remarque (Figure III.3.6. - a à e) que, pour chaque type de sol, la microporosité  $V_m$  ne varie pratiquement pas au cours du gonflement, sa valeur moyenne variant selon les sols dans le même sens que la porosité inférieure à 50 Å (Tableau III.3.1.).

|                             | Argile Provins | Fausse Glaise | Argile Verte | Marne Bleue | Moraine d'Aix |
|-----------------------------|----------------|---------------|--------------|-------------|---------------|
| $V_m \text{ mm}^3/\text{g}$ | 120            | 105           | 70           | 70          | 40            |

Tableau III.3.1. - Volume microporeux  $V_m$  pour chaque type de sol étudié

Ceci confirme les observations effectuées au M.E.B. : la compacité des agrégats ne varie pas au cours du gonflement.

### III.3.6. - Evolution de la porosité piégée et de la porosité libre

La porosité totale définie par l'injection de mercure se scinde en deux : la porosité libre qui se vide pendant le retrait de mercure, et la porosité piégée.

Différents modèles de géométrie de pores ont été définis dans les travaux antérieurs de B. VAYSSADE (1978), P. DELAGE (1979), P. BOUSQUIE (1979). En première approximation, ceux-ci définissent la porosité piégée comme le volume des noeuds du réseau poreux inter-agrégats. La porosité libre quant à elle, comprend la porosité des pores les plus fins (intra-agrégats) et une partie de la porosité inter-agrégats.

Nous constatons au vu des courbes porosimétriques cumulées (Figure III.3.4 - a à e) et des digrammes de synthèse (Figure III.3.6. - a à e) que :

- . la porosité piégée augmente considérablement au cours du gonflement
- . la porosité libre ne varie pratiquement pas au cours du gonflement si ce n'est globalement par une légère décroissance.

Il en ressort clairement que l'accroissement du volume poreux dû au gonflement est en première approximation un accroissement de porosité piégée représentatif d'un écartement des agrégats argileux les uns des autres.

Un essai de deuxième injection de mercure a été fait sur trois des sols étudiés, les Fausses Glaises, la Marne Bleue de Nogent, et l'Argile d'Aix-Les-Bains, afin de préciser la distribution de la porosité libre. On remarque (Figure III.3.3.) que la porosité libre a une distribution similaire à la porosité totale, c'est-à-dire qu'elle comprend à la fois une partie de la porosité inter-agrégats et une partie de la porosité intra-agrégats. Ce dernier point semble contredire l'identité entre microporosité et porosité libre suggérée par leur constance au cours du gonflement et même par la coïncidence de leurs valeurs absolues pour l'Argile Plastique de Provins et les Fausses Glaises. En fait, il apparaît que la plus grande partie de la porosité libre  $V_L$  est bien à attribuer à la microporosité  $V_m$  (Tableau III.3.2.), d'autant plus que la valeur de la microporosité libre des

|                             | Fausses Glaises | Marne Bleue | Argile d'Aix |
|-----------------------------|-----------------|-------------|--------------|
| % de $V_L$ dans $V_T$       | 46              | 39          | 70           |
| % de $V_L$ dans $V_m$       | 62              | 81          | 77           |
| % de $V_L$ dans $V_T - V_m$ | 39              | 32          | 66           |

Tableau III.3.2.- Répartition de la porosité libre  $V_L$

Fausses Glaises est donnée par défaut (existence d'une microporosité inférieure à 50 Å importante). Le cas de l'Argile d'Aix-Les-Bains ne peut être pris en compte car sa microporosité n'a pas de signification physique, (distribution unimodale).

On en conclut que l'essentiel de la porosité inter-agrégats (macroporosité) est une porosité piégée (à 61 % pour les Fausses Glaises et à 68 % pour la Marne Bleue). On peut en effet facilement supposer que cette porosité inter-agrégats se compose d'une suite d'étranglements et de vacuoles, donc à forte part piégée, alors que la porosité intra-agrégat, du fait de l'assemblage face contre face des particules se présente plus régulièrement sous forme de canaux cylindriques ou de pores bidimensionnels très fins. La part de la porosité inter-agrégat libre est alors constituée de canaux et pores bidimensionnels directement interconnectés sans variation de dimension.

### III.3.7. - Evolution des classes de pores

L'examen des courbes porosimétriques dérivées (Figure III.3.5 - a à e) permet de mettre en évidence les différentes classes de pores (pics

ou dômes) et les rayons modaux associés (sommets des pics). Une classe de pores sera bien classée si le pic est étroit, elle sera mal classée (pores de toutes tailles) dans le cas contraire. On remarque tout d'abord que pour l'Argile Plastique de Provins et les Fausses Glaisses la première classe est très importante et assez bien classée et se prolonge nettement en deçà de  $50 \text{ A}^\circ$ , le rayon modal se situant en dessous de  $50 \text{ A}^\circ$ , alors que l'Argile Verte et la Marne Bleue ont une première classe de faible importance mal classée, et l'Argile d'Aix une première classe inexistante. Dans tous les cas cette première classe (correspondant à la porosité intra-agrégats) demeure constante pendant le gonflement, tandis que la seconde classe (correspondant à la porosité inter-agrégat) se déplace dans le sens des rayons d'accès croissants. On retrouve ainsi l'ouverture des pores inter-agrégats visualisée au M.E.B.

La porosité inter-agrégats de l'Argile de Provins et des Fausses Glaisses, assez mal classée pour les échantillons les moins humides, a tendance à se reclasser au cours du gonflement. Au contraire, la porosité inter-agrégats de l'Argile Verte et de la Marne Bleue, très bien classée à l'état naturel, a tendance à se déclasser légèrement au cours du gonflement. Ce phénomène, apparemment contradictoire, repose sur l'influence de la texture initiale. En effet, pour l'Argile de Provins et les Fausses Glaisses, nous avons à l'état naturel une série presque continue de pores allant de la porosité intra-agrégat à la porosité inter-agrégat, et le gonflement, favorisant la création d'agréats et leur écartement mutuel, privilégie la famille de pores inter-agrégats qui se reclassent. Par contre pour l'Argile Verte et la Marne Bleue, l'état naturel ne présente essentiellement qu'une classe de pores importante (les pores inter-agrégats) et donc le gonflement par la création de divers niveaux de porosité inter-agrégats (division des agrégats primaires en agrégats secondaires), a tendance à déclasser légèrement cette classe. Ces phénomènes ont été observés au M.E.B.

Il existe une corrélation linéaire croissante entre le logarithme du rayon modal de la classe de pores inter-agrégats et la teneur en eau de l'échantillon (Figure III.3.7. - a à d). Ce point est fondamental car il permet de rattacher cette étude de texture à l'étude mécanique effectuée précédemment (Chapitre II), et de préciser l'importance de la classe des pores inter-agrégats dans le phénomène de gonflement.

Nous avons montré (§ II.4.) qu'il existe une relation linéaire décroissante entre la teneur en eau d'un sol et son  $pF$  :

$$pF = -aw + b \quad (1)$$

Or si l'on assimile l'essentiel de la porosité du sol à un ensemble de canaux cylindriques de rayon  $R$  ou de pores bidimensionnels d'épaisseur  $R$  égaux au rayon modal de la classe inter-agrégat, la loi de JURIN est applicable, et le  $pF$  du sol est corrélé linéairement au logarithme du rayon modal :

$$P = \frac{K}{R} \quad \text{soit} \quad \log P = pF = \log K - \log R \quad (2)$$

L'égalité des relations (1) et (2) montre qu'il doit alors exister une relation linéaire croissante entre la teneur en eau du sol  $w$  et le logarithme

du rayon modal  $R$ , ce que les essais porosimétriques nous ont permis de vérifier (Figure III.3.7. - a à d).

On en conclut :

- 1/ - que le modèle porosimétrique le plus simple est applicable à l'étude du gonflement des sols argileux
- 2/ - que dans le cas du gonflement la classe de pore inter-agrégats à une influence déterminante et peut, en première approximation, être utilisée seule pour l'étude des variations de texture.

On remarque de plus que le rayon modal est différent selon les sols pour une teneur en eau donnée :

|                                 | Argile Provins | Fausse Glaise | A. V. Montreuil | M. B. Nogent |
|---------------------------------|----------------|---------------|-----------------|--------------|
| Rayon modal pour<br>$w = 35 \%$ | 0,3 $\mu$      | 0,32 $\mu$    | 0,15 $\mu$      | 0,1 $\mu$    |

Tableau III.3.3. - Rayon modal de la classe de pores inter-agrégats pour  $w=35 \%$

Il en est de même pour la pente de la droite reliant le logarithme du rayon modal à la teneur en eau :

|                                  | Argile Provins | Fausse Glaise | A. V. Montreuil | M. B. Nogent |
|----------------------------------|----------------|---------------|-----------------|--------------|
| $\frac{\Delta \log R}{\Delta w}$ | 0,57           | 0,59          | 0,22            | 0,20         |

Tableau III.3.4. - Pente de la droite reliant le logarithme du rayon modal à la teneur en eau

Les différences de texture observées jusqu'à présent se confirment. opposant Argile de Provins et Fausses Glaisses d'une part, à Argile Verte de Montreuil et Marne Bleue de Nogent d'autre part.

Pour un même type de gonflement, c'est-à-dire pour une même variation  $\Delta w$  de teneur en eau, l'Argile de Provins et les Fausses Glaisses voient leurs rayons modaux augmenter beaucoup plus que l'Argile Verte et la Marne Bleue. De plus pour tous les sols étudiés la microporosité (première classe de pores) ne bouge pas au gonflement, donc la variation du rayon modal de la

macroporosité (seconde classe) est représentative de la variation de texture. Par conséquent pour une même variation  $\Delta w$  de teneur en eau, on en déduit que le "nombre de pores" par unité de volume doit être plus faible pour l'Argile de Provins et les Fausses Glaises et donc les agrégats en moyenne plus gros.

Ce raisonnement, bien que simpliste, en particulier pour la Marne Bleue de Nogent où la présence de smectites se manifeste par quelques zones à texture en nid d'abeille disséminées parmi les agrégats, reflète néanmoins assez bien les observations effectuées au M.E.B.

Il est bien entendu que les rayons d'accès équivalents utilisés pour la lecture des courbes porosimétriques correspondent en fait à des épaisseurs d'accès de pores bidimensionnels. Les épaisseurs de pores observées au M.E.B. sont plus grandes que les rayons d'accès modaux définis par la porosimétrie (Tableau III.3.5) :

|                      | Argile Provins<br>w=40 % | Fausses Glaises<br>w=46 % | A.V. Montreuil<br>w=47 % | M.B. de Nogent<br>w=54 % |
|----------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| e observée ( $\mu$ ) | 2                        | 3                         | 1,2                      | 1                        |
| R modal ( $\mu$ )    | 0,8                      | 1,15                      | 0,3                      | 0,3                      |
| e/R                  | 2,5                      | 2,6                       | 4                        | 3,4                      |

Tableau III.3.5. -

C'est ce phénomène qui est responsable de la porosité piégée (les accès sont inférieurs à la dimension réelle des pores).

TABEAU III.3.6. CARACTERISTIQUES DES COURBES POROSIMETRIQUES

| Echantillon                                | Argile de Provins |      |      |      | Fausse Glaise |     |     |      |      | A.V: de Montreuil |      |      |      | M.B.Argenteuil |      |      | Molasse d'Aix |   |       |
|--------------------------------------------|-------------------|------|------|------|---------------|-----|-----|------|------|-------------------|------|------|------|----------------|------|------|---------------|---|-------|
|                                            | 1                 | 2    | 3    | 4    | 1             | 2   | 3   | 4    | 2bis | 1                 | 2    | 3    | 4    | 1              | 2    | 3    | 1             | 2 | 3     |
| <u>1ère Injection</u>                      |                   |      |      |      |               |     |     |      |      |                   |      |      |      |                |      |      |               |   |       |
| $w \text{ mm}^3/\text{g}$<br>Teneur en eau | 305               | 337  | 360  | 385  | 345           | 395 | 400 | 460  | 395  | 347               | 370  | 420  | 467  | 297            | 430  | 540  | 257           |   | 257   |
| Volume poreux<br>Total $V_T$               | 250               | 253  | 235  | 300  | 228           | 295 | 252 | 315  | 295  | 310               | 313  | 343  | 380  | 237            | 350  | 510  | 265           |   | 257   |
| Volume poreux<br>Piégé $V_p$               | 105               | 116  | 115  | 167  | 113           | 145 | 147 | 230  | 158  | 110               | 123  | 143  | 210  | 72             | 150  | 310  | 60            |   | 77    |
| Volume poreux<br>Libre $V_L$               | 145               | 137  | 120  | 133  | 115           | 150 | 105 | 85   | 137  | 200               | 190  | 200  | 170  | 165            | 200  | 200  | 205           |   | 180   |
| Volume microporeux $V_m$                   | 135               | 117  | 125  | 127  | 110           | 110 | 105 | 100  | 103  | 75                | 65   | 72   | 85   | 73             | 75   | 70   | 45            |   | 30    |
| Rayon Modal $R \mu$                        | 0.17              | 0.25 | 0.34 | 0.60 | 0.25          | 0.5 | 1   | 1.50 | 0.60 | 0.15              | 0.19 | 0.22 | 0.29 | 0.08           | 0.14 | 0.27 | 0.12          |   | 0.135 |
| <u>2ème Injection</u>                      |                   |      |      |      |               |     |     |      |      |                   |      |      |      |                |      |      |               |   |       |
| Volume microporeux $V_m$                   |                   |      |      |      |               |     |     |      | 63   |                   |      |      |      | 55             |      | 57   |               |   | 23    |
| Rayon Modal $R$                            |                   |      |      |      |               |     |     |      | 0.25 |                   |      |      |      | 0.095          |      | 0.14 |               |   | 0.14  |

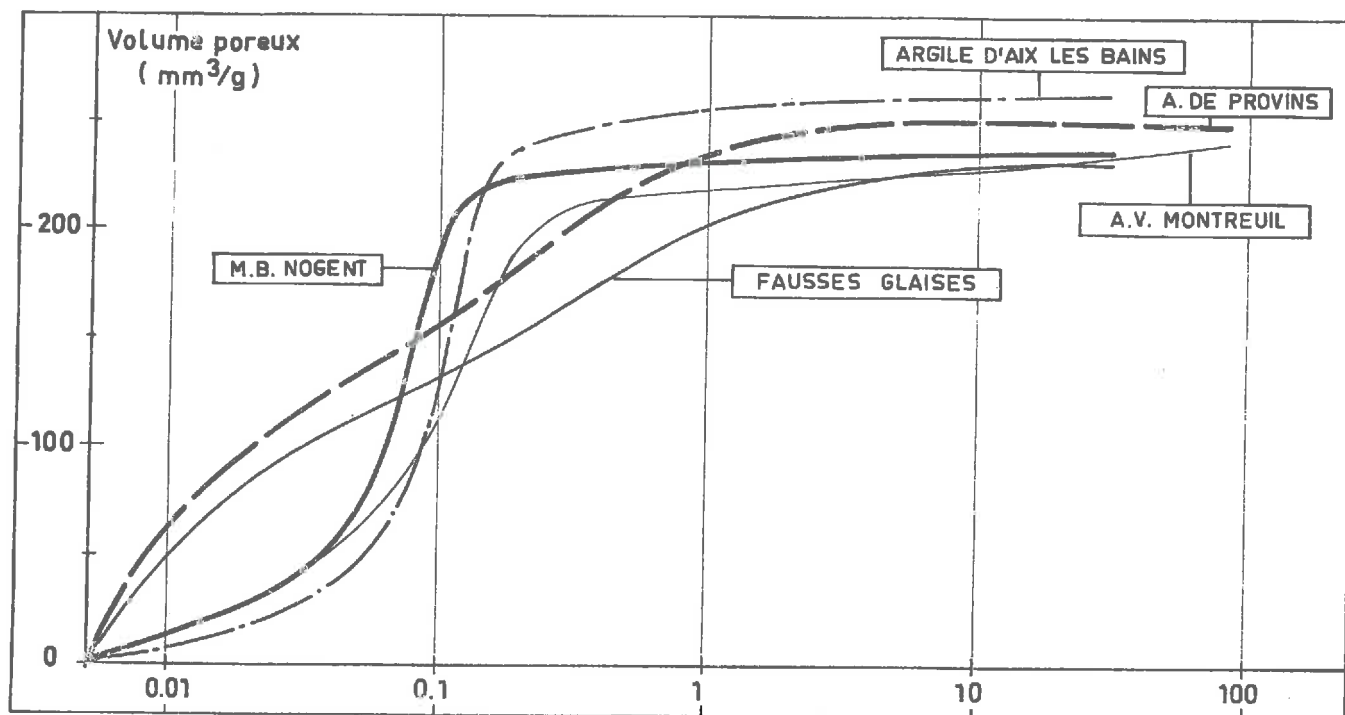


Fig. III.3.2. — Courbes porosimétriques cumulées d'injection de mercure — Echantillons naturels.

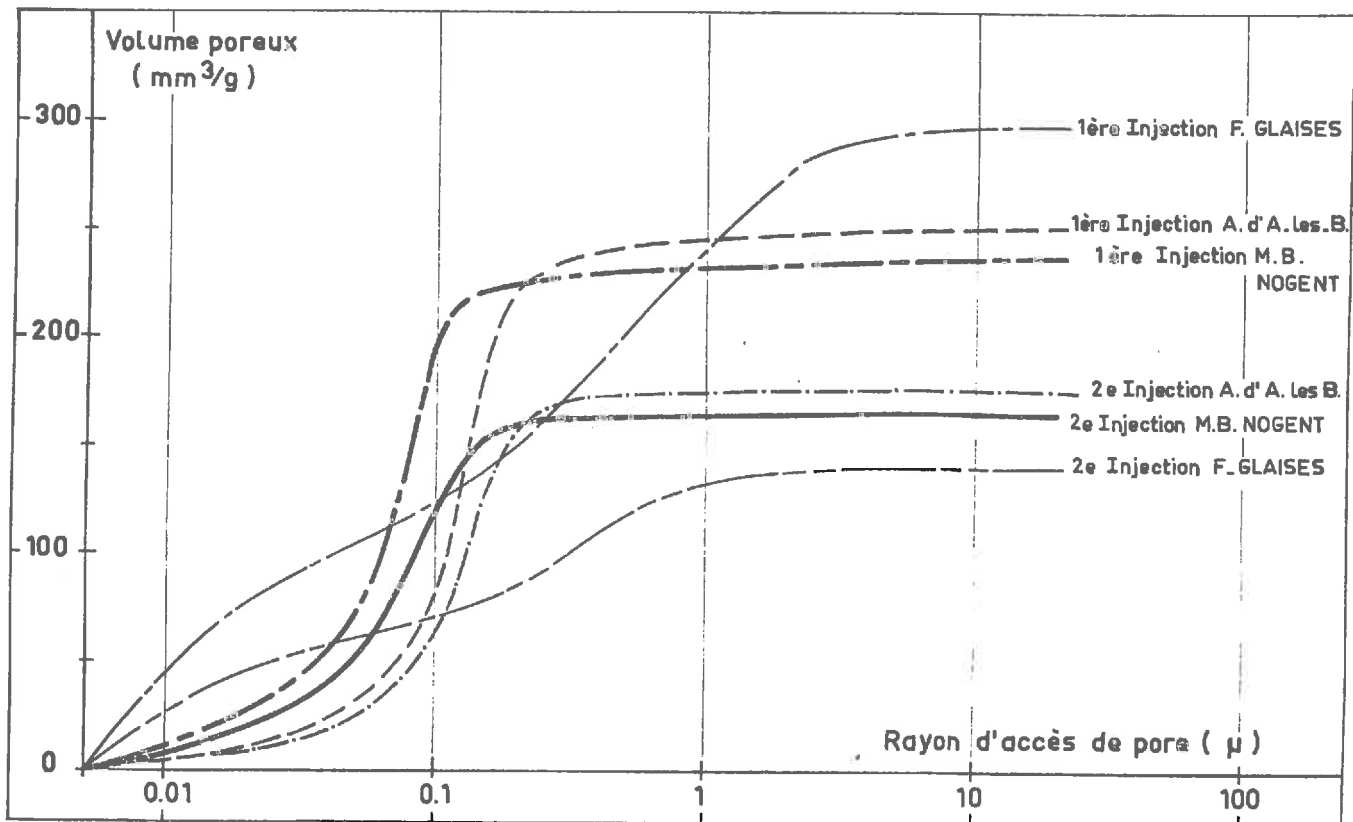


Fig. III.3.3. — Courbes de 1ère et de 2ème injection de mercure.

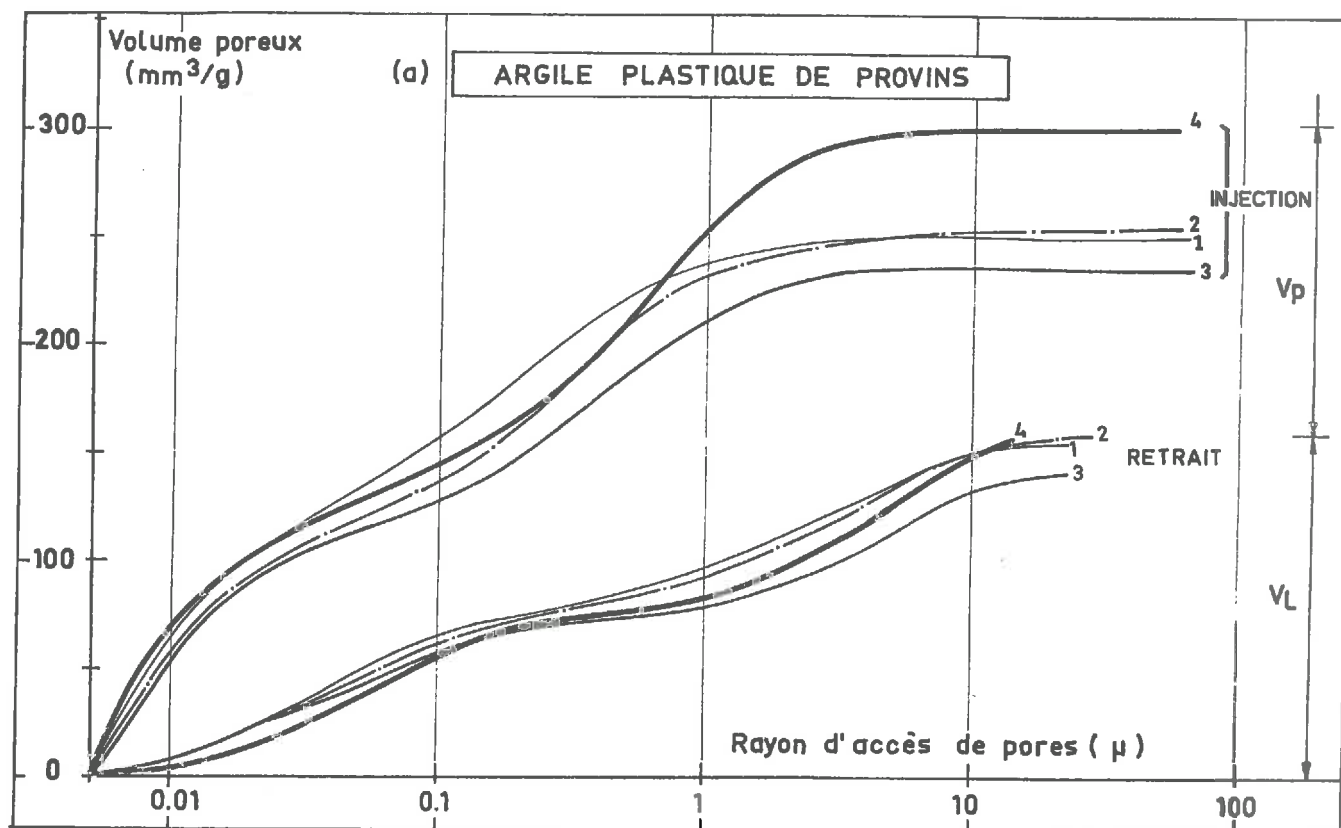


Fig. III.3.4. — Courbes cumulées d'injection et de retrait de mercure .

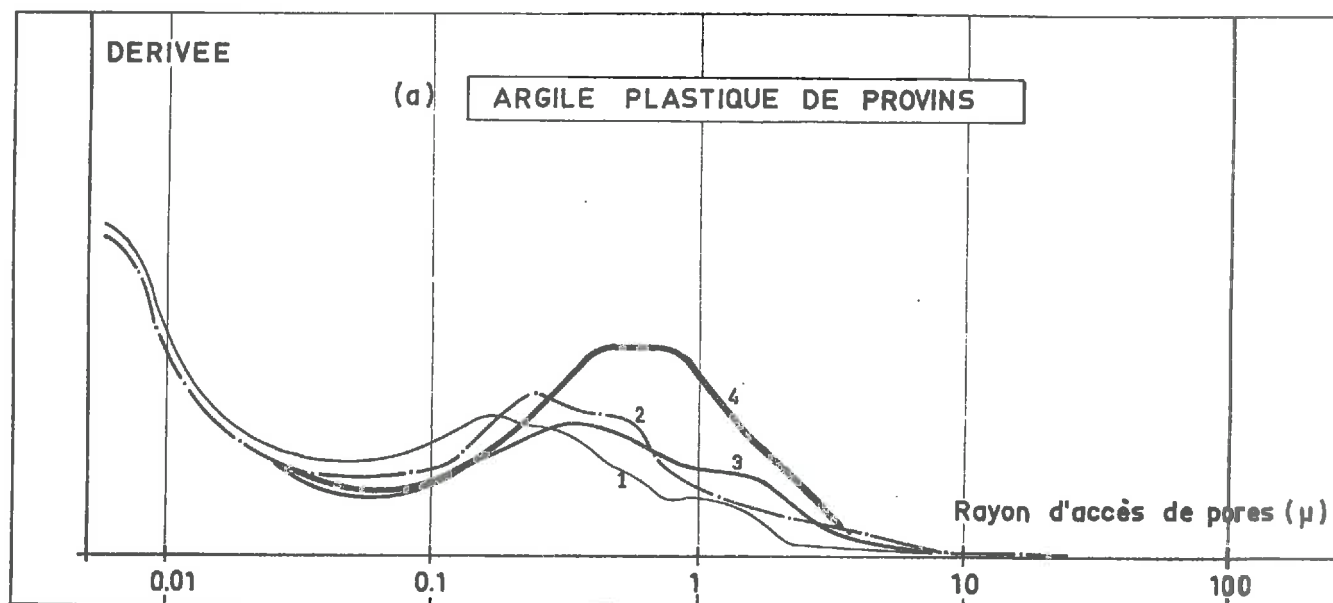


Fig. III.3.5. — Courbes dérivées des courbes d'injection .



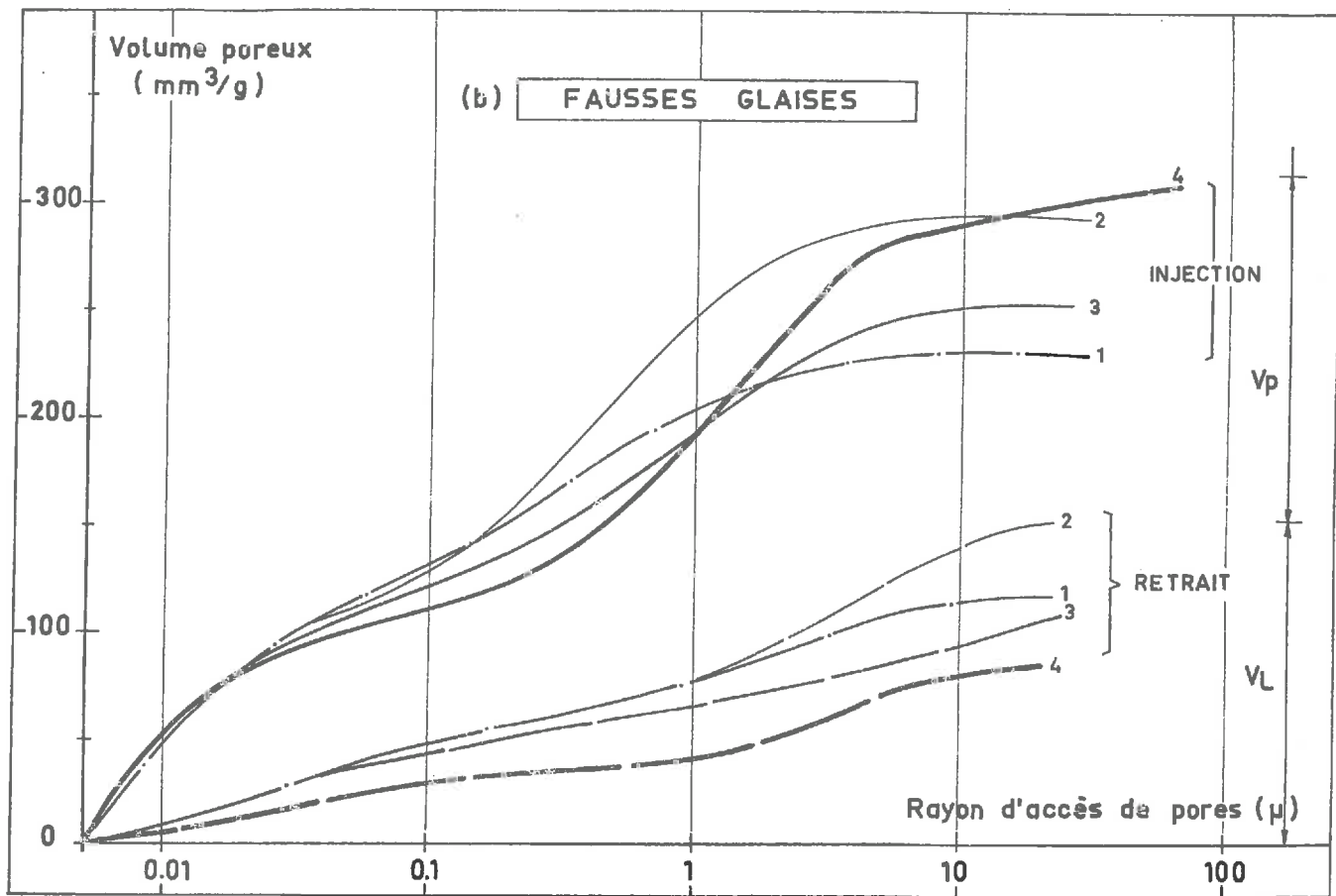


Fig. III.3.4. — Courbes cumulées d'injection et de retrait de mercure.

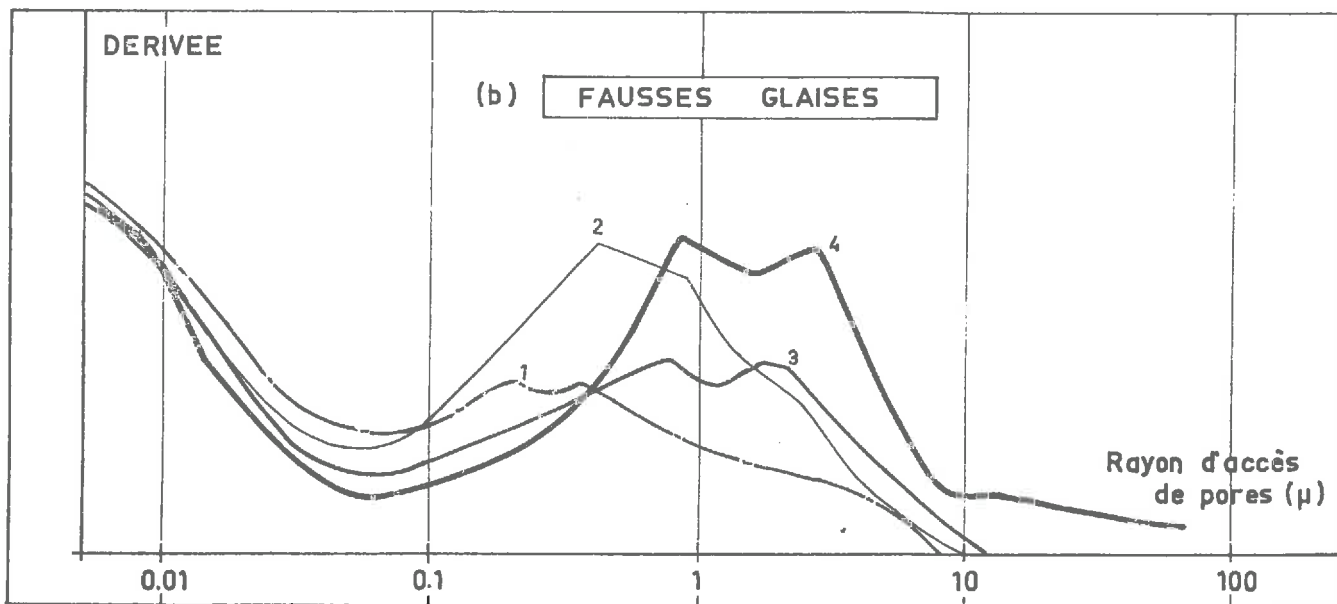


Fig. III.3.5. — Courbes dérivées des courbes d'injection.

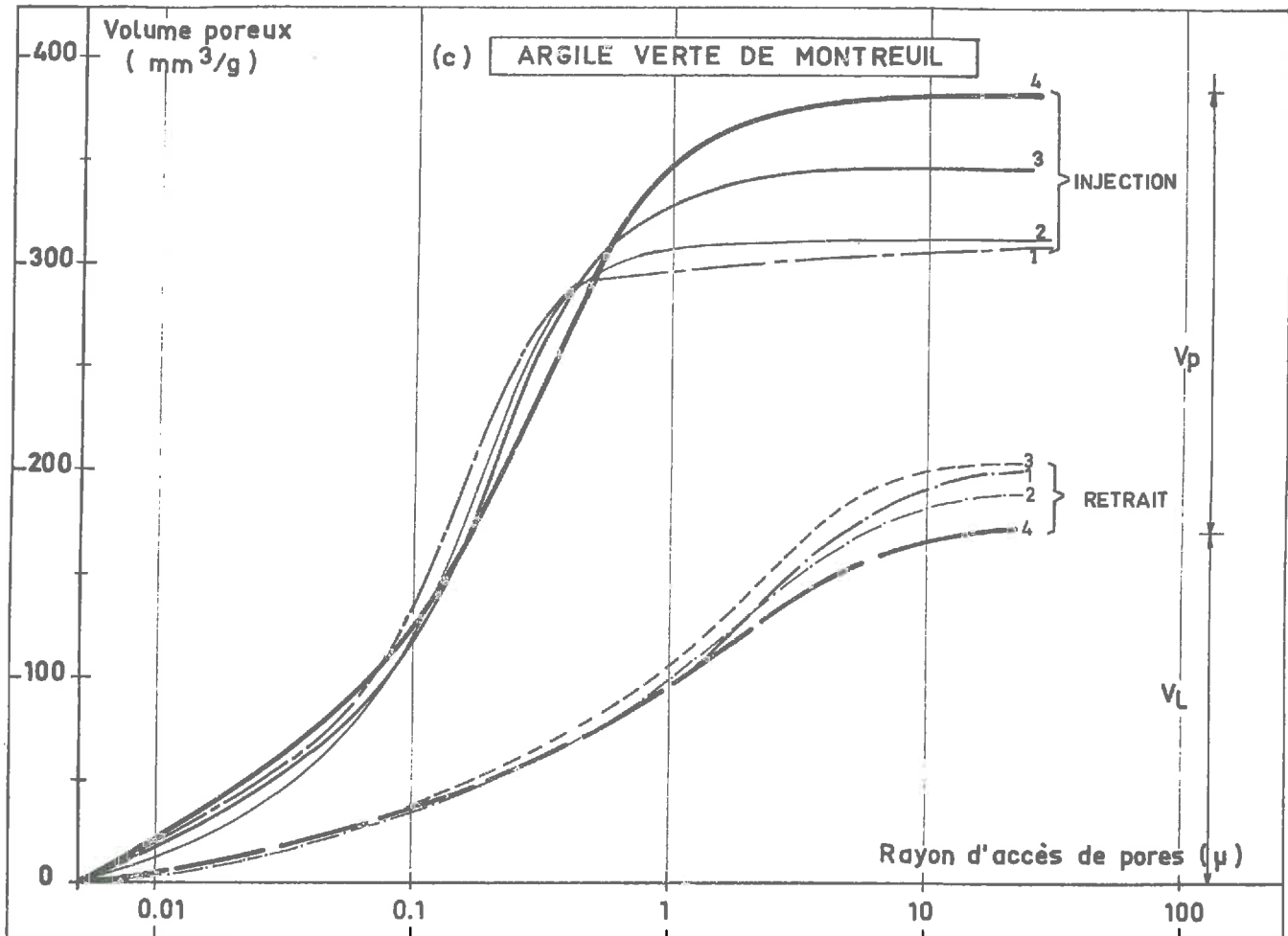


Fig. III.3.4. — Courbes cumulées d'injection et de retrait de mercure .

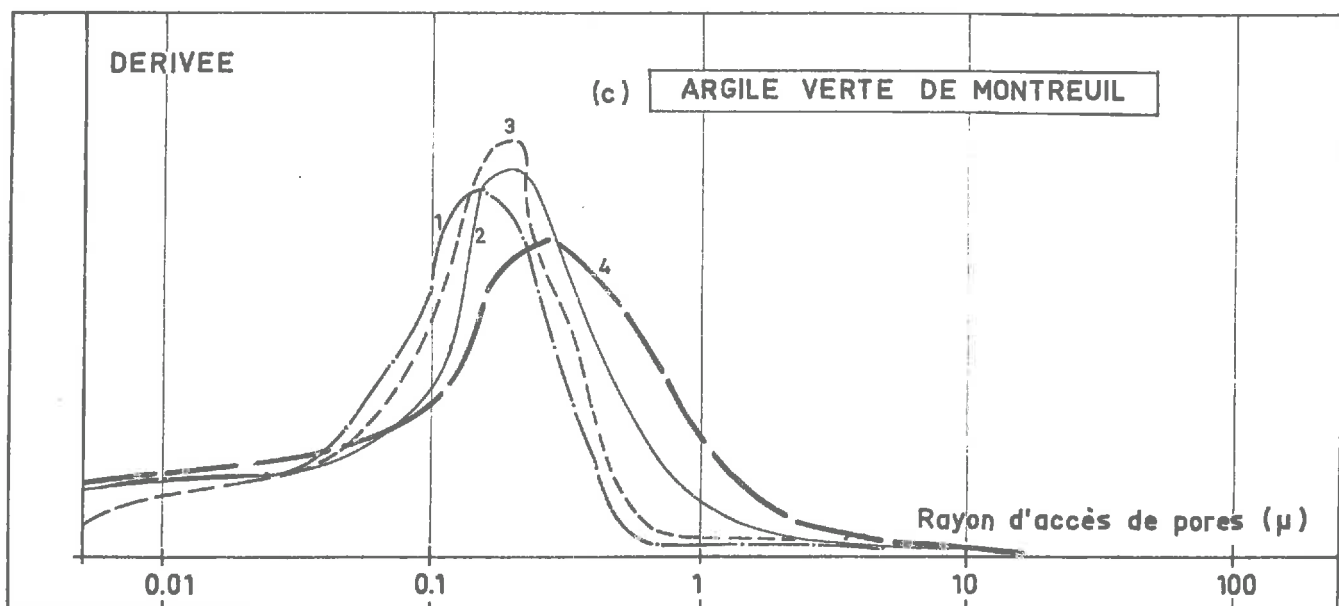


Fig. III.3.5. — Courbes dérivées des courbes d'injection .

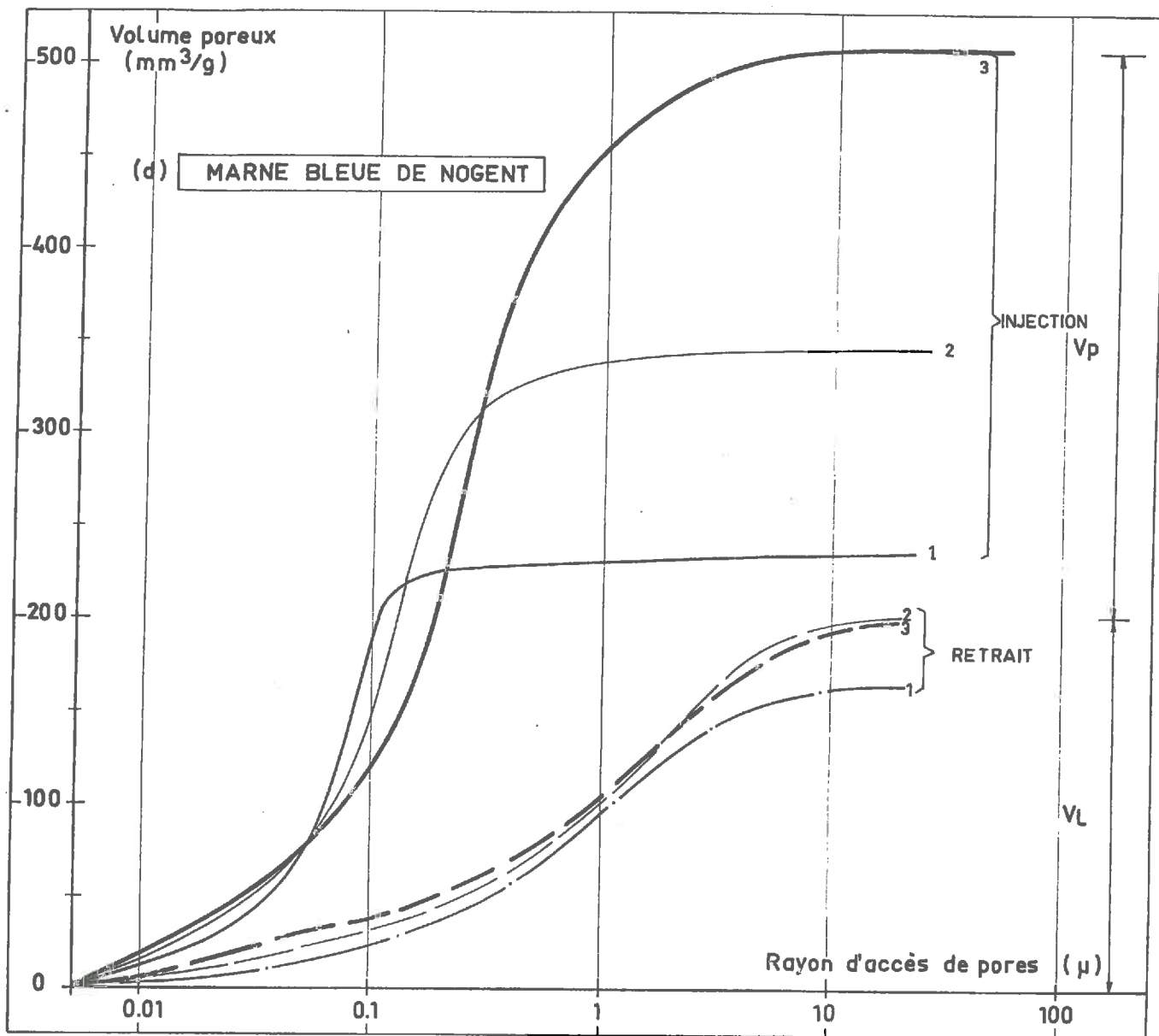


Fig. III.3.4. — Courbes cumulées d'injection et de retrait de mercure.

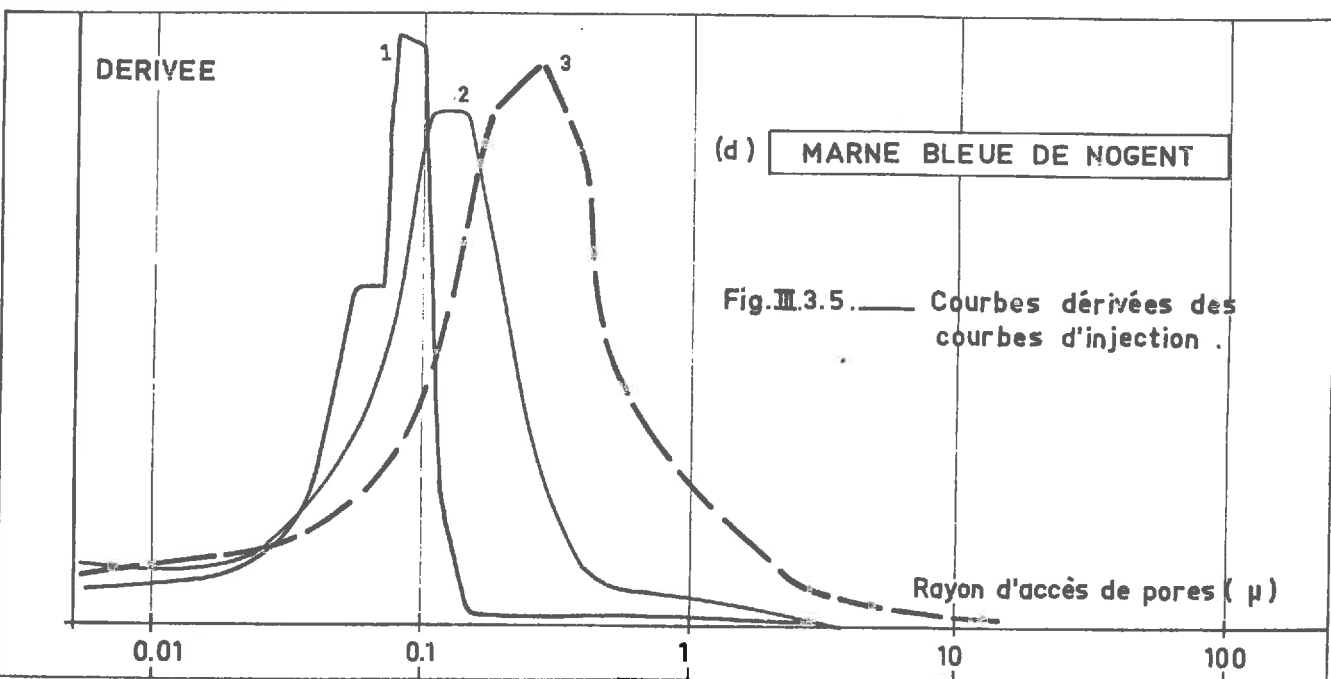


Fig. III.3.5. — Courbes dérivées des courbes d'injection.

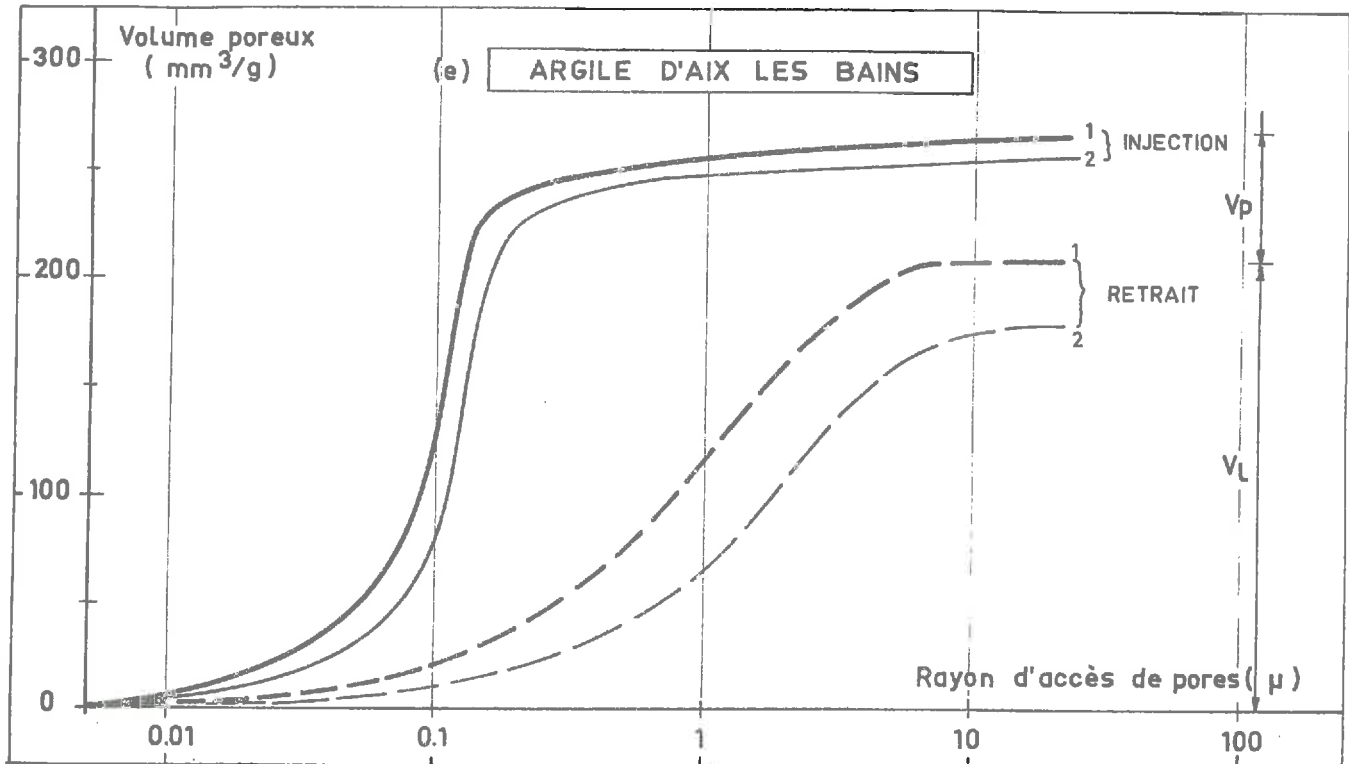


Fig. III.3.4. — Courbes cumulées d'injection et de retrait de mercure.

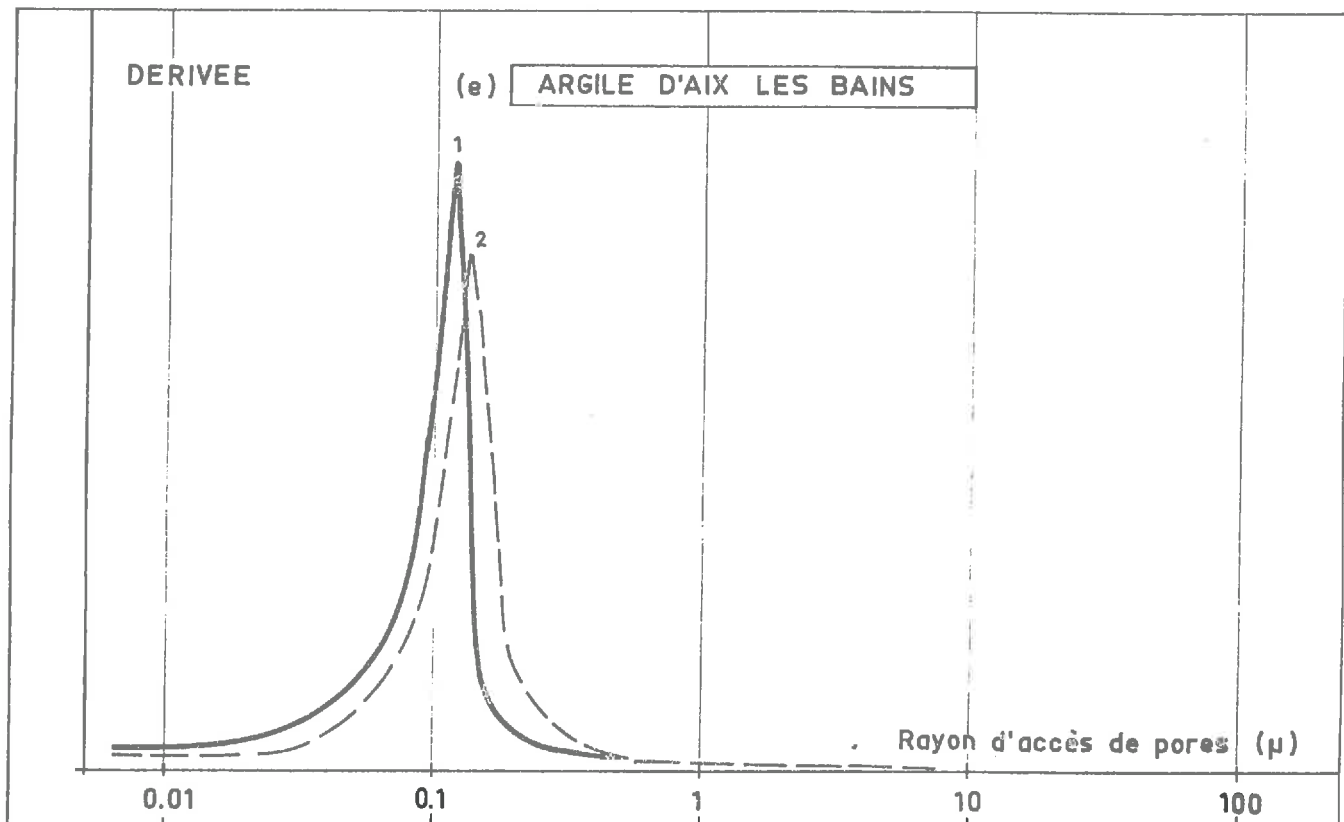


Fig. III.3.5. — Courbes dérivées des courbes d'injection.

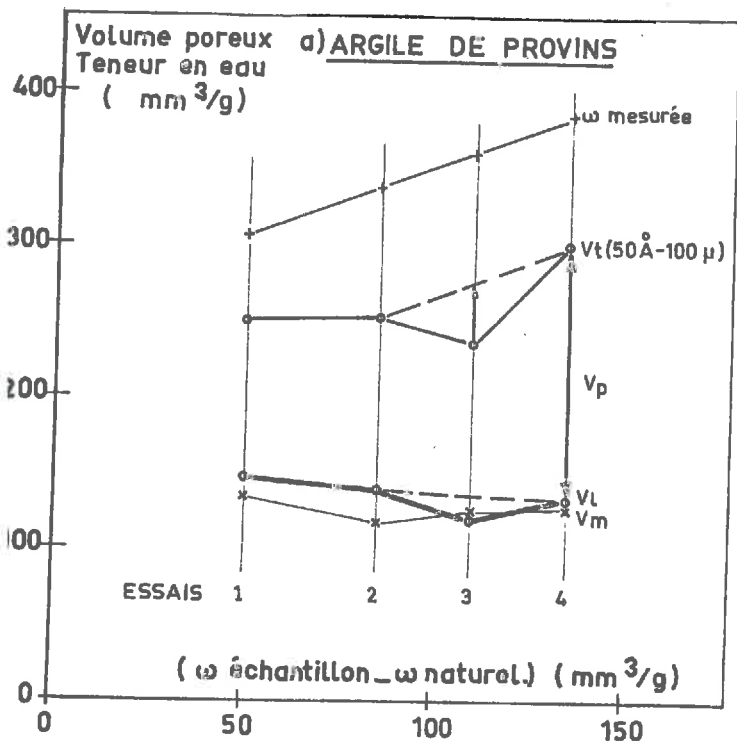


Fig. III.3.6. — Evolution des différents volumes poreux.

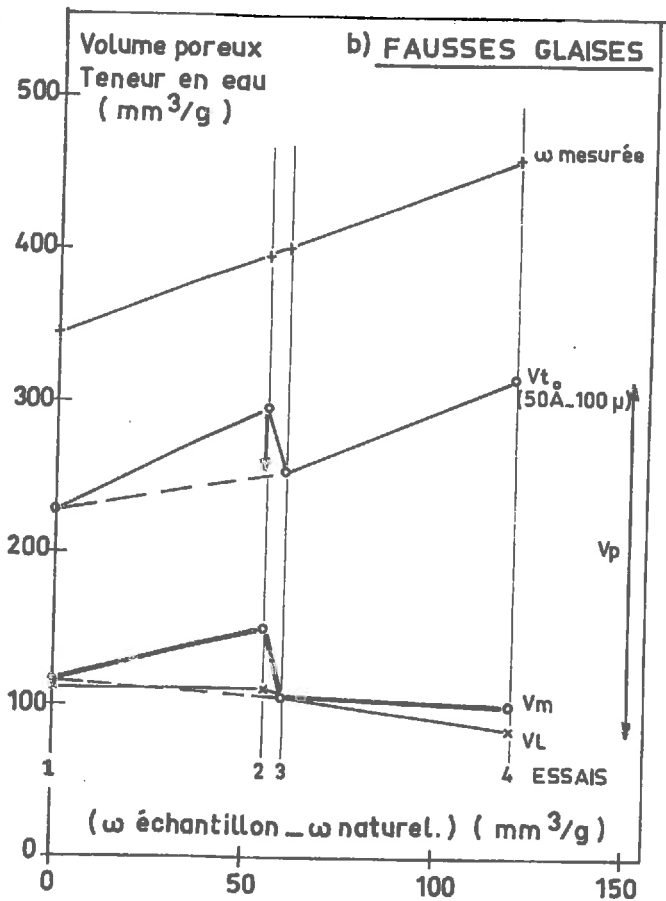


Fig. III.3.6. — Evolution des différents volumes poreux.

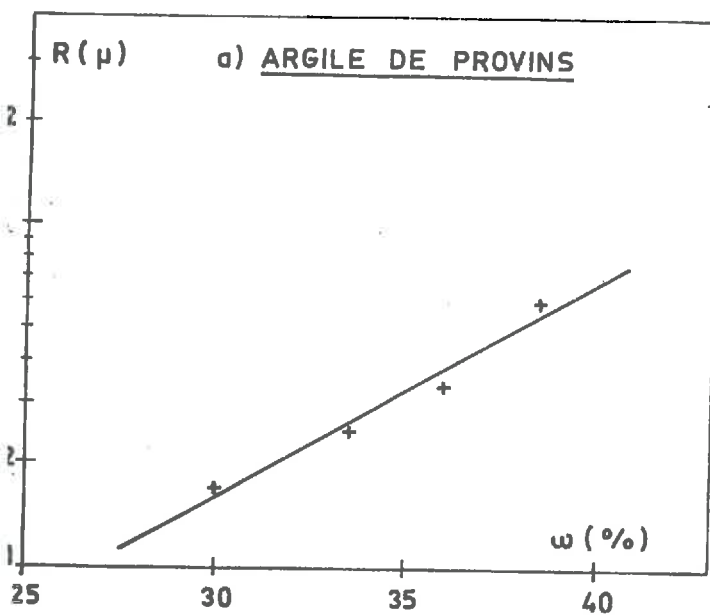


Fig. III.3.7. — Variation du rayon modal au cours du gonflement.

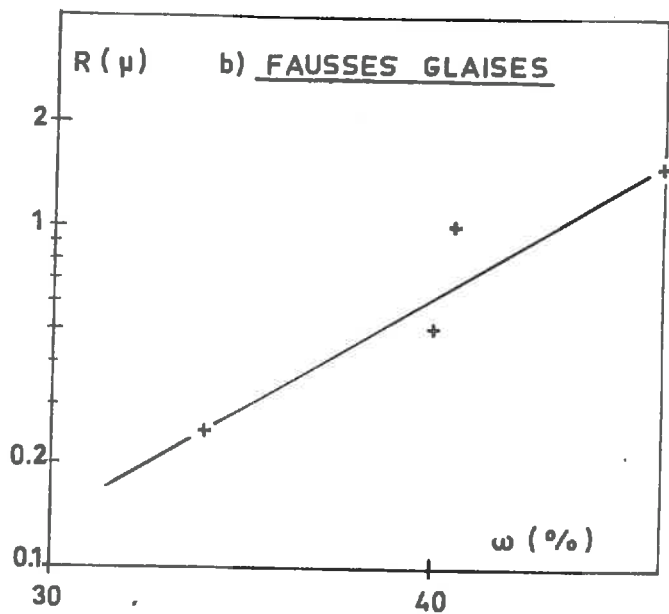


Fig. III.3.7. — Variation du rayon modal au cours du gonflement.

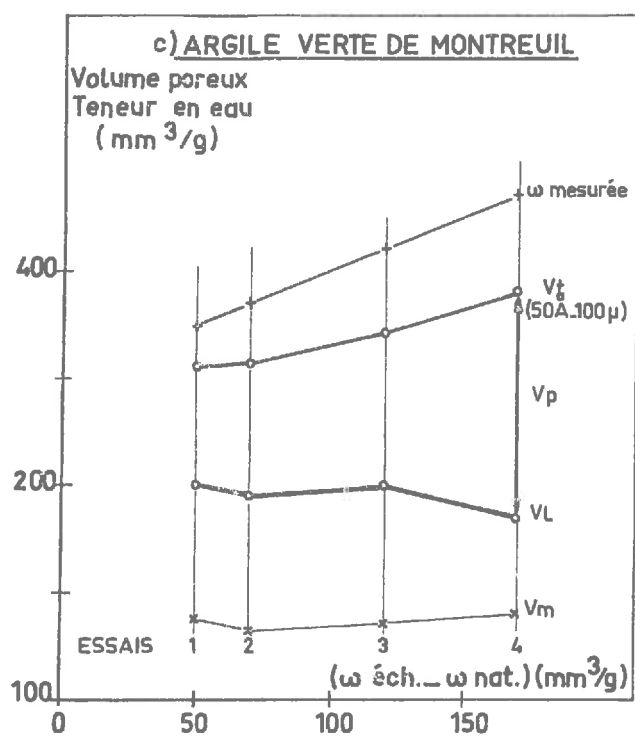


Fig. III.3.6. — Evolution des différents volumes poreux.

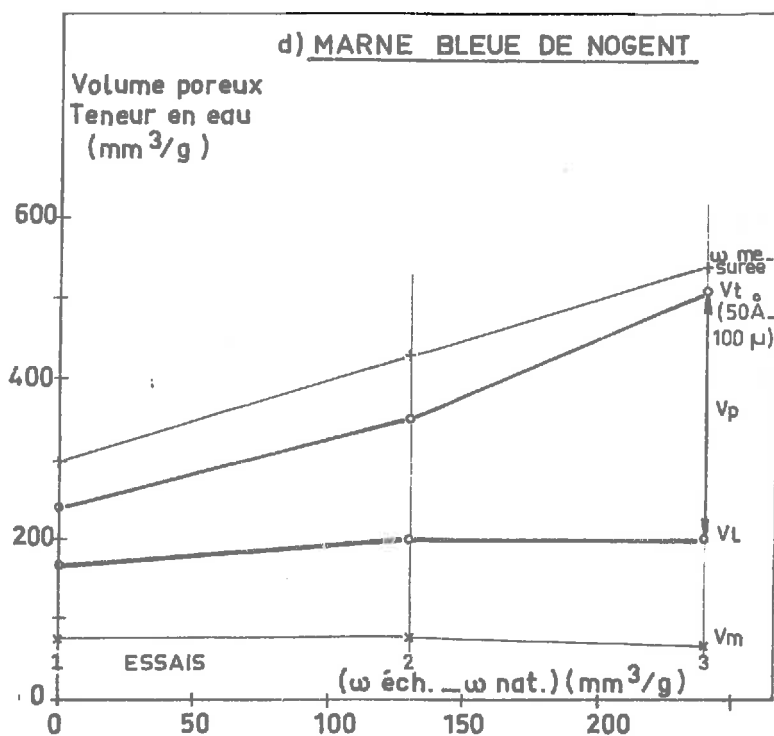


Fig. III.3.6. — Evolution des différents volumes poreux.

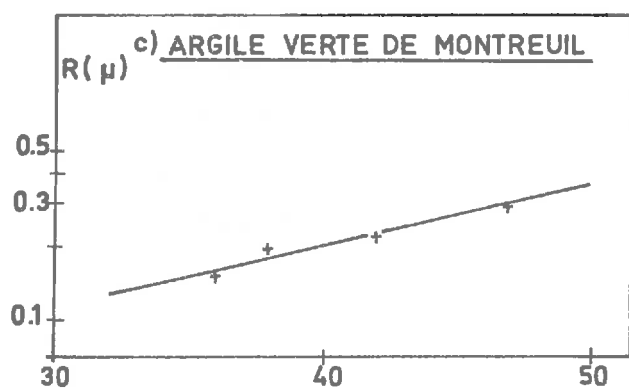


Fig. III.3.7. — Variation du rayon modal au cours du gonflement.

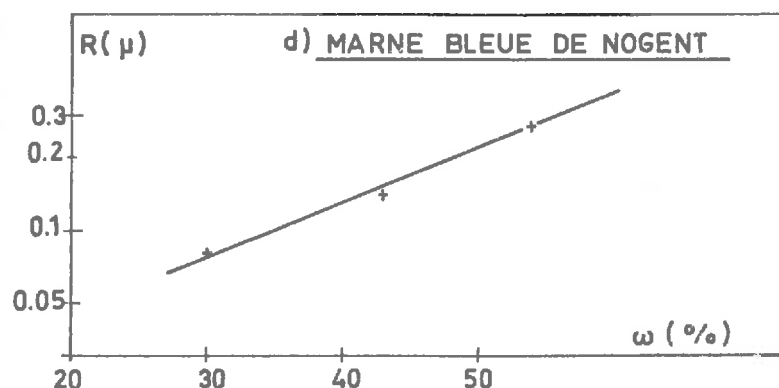


Fig. III.3.7. — Variation du rayon modal au cours du gonflement.

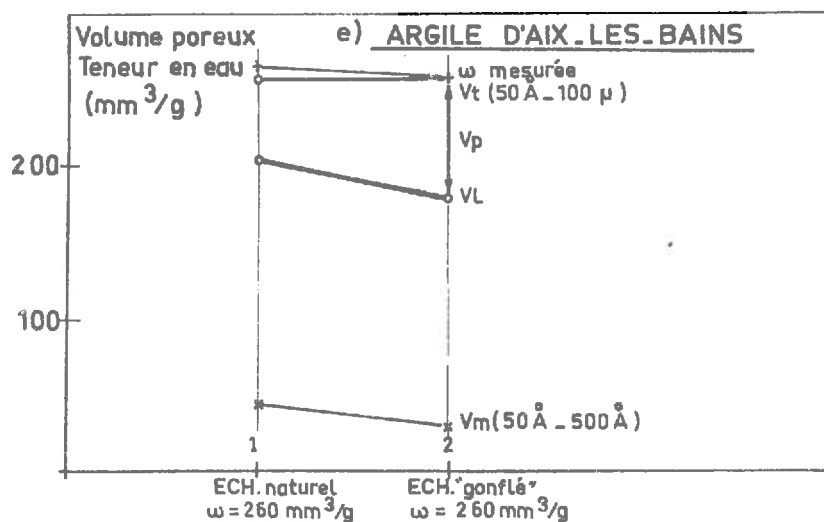


Fig. III.3.6. — Valeurs des différents volumes poreux.

#### III.4. - CONCLUSIONS GENERALES CONCERNANT L'ETUDE DE LA TEXTURE

Les premières conclusions tirées à partir d'observations au microscope électronique à balayage sont parfaitement corroborées par l'emploi de la porosimétrie au mercure, qui nous a permis de plus de quantifier certains paramètres.

Si certains caractères texturaux nous ont amené à classer les sols étudiés en trois catégories, correspondant d'ailleurs aux différences de minéralogie et de granulométrie :

- . première catégorie : Argile Plastique de Provins et Fausses Glaises à microporosité importante
- . Deuxième catégorie : Argile Verte de Montreuil et Marne Bleue de Nogent à microporosité moyenne
- . Troisième catégorie : Argile d'Aix-Les-Bains à microporosité quasi nulle,

on retrouve un comportement général commun aux quatre premiers sols :

- . la porosité intra-agrégats ne varie pas au cours du gonflement
- . la porosité inter-agrégats augmente et se déplace dans le sens des rayons d'accès croissants
- . l'augmentation de porosité pendant le gonflement est entièrement attribuable à l'augmentation de la porosité piégée
- . le logarithme du rayon modal de la famille de pores inter-agrégats est en relation linéaire croissante avec la teneur en eau, résultats en accord avec le modèle porosimétrique utilisé.

Néanmoins la texture initiale a une influence déterminante sur l'importance de la transformation au cours du gonflement, ainsi que le montrent les différences quantitatives observées entre la première et la deuxième catégorie de sols. Ainsi on a pu constater que pour une même teneur en eau, l'Argile de Provins et les Fausses Glaises ont un rayon modal inter-agrégat supérieur à l'Argile Verte et la Marne Bleue et que, pour un même taux de gonflement, le rayon modal des deux premiers sols augmente plus que celui des deux suivants, induisant par là des tailles d'agréats différentes, et donc certainement des propriétés géotechniques (par exemple la résistance au cisaillement) différentes.

L'évolution de texture décrite est d'autant plus nette et significative que le matériau est plus fin et plus riche en minéraux argileux.

Il nous est donc possible de penser, à l'issue de cette étude, que le gonflement des sols argileux saturés ne contenant pas de grandes quantités de minéraux dits "gonflants" (smectites sodiques à l'état pur) est un

phénomène qui se produit au niveau des zones de faible résistance analogues à des fissures (pores bidimensionnels) qui individualisent un réseau tridimensionnel d'agrégats argileux.

Au cours du gonflement ces pores bidimensionnels s'agrandissent et leurs connexions sub-sphériques augmentent de volume, écartant les agrégats les uns des autres, et les agrégats eux-mêmes diminuent de taille par suite de leur division en unités plus petites (agrégats secondaires). Le gonflement à l'échelle de la particule élémentaire n'intervient pas ici, il doit correspondre à des niveaux d'énergie supérieurs certainement obtenus dans le domaine de non saturation. Nous voulons par là-même dire que pour un sol saturé, le gonflement "réellement" inter-particulaire, s'il existe, est déjà terminé. Il est à remarquer que nos conclusions s'accordent parfaitement avec celles de D. TESSIER et J. QUIRK (1979), obtenues à partir d'observations au microscope électronique à balayage et au microscope électronique à transmission, sur des échantillons d'illite reconstitués.

Il apparaît probable que les études de texture par porosimétrie au mercure et microscopie électronique permettront dans l'avenir, de modéliser de plus en plus finement la distribution du réseau poreux des sols argileux, voire la distribution du squelette solide (par étude porosimétrique de réplique d'échantillons), afin de mieux comprendre l'évolution des propriétés géotechniques d'un même sol en présence d'eau, ou de différents sols à même teneur en eau.



CONCLUSIONS GENERALES

---

BIBLIOGRAPHIE

---

ANNEXES

---

## CONCLUSIONS GENERALES - PRINCIPAUX RESULTATS

### 1 - ETUDE MACROSCOPIQUE DU GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX

L'étude macroscopique du gonflement des sols argileux a été effectuée dans une optique modélisatrice afin d'exprimer, à partir d'essais de laboratoire, les variations des principaux paramètres du gonflement unidimensionnel.

Des études partielles, en fonction des variables temps, épaisseur d'échantillons, contraintes mécaniques, succion, ont permis de mettre en évidence les points suivants :

- la cinétique du phénomène peut être approchée par une relation hyperbolique de la forme

$$\frac{\Delta h}{h_0} = G \cdot \frac{t}{B+t}$$

où G représente le taux de gonflement final et B le temps nécessaire pour que la moitié du gonflement ait lieu, ou temps de demi-gonflement.

Le coefficient G, malgré une assez forte dispersion des résultats, notamment pour des échantillons non préalablement consolidés, oscille autour d'une valeur moyenne pour un type de sol dans un état de contraintes donné.

Le coefficient B peut être considéré comme proportionnel à l'épaisseur  $h_0$  de l'échantillon :  $B = C \cdot h_0$  où C dépend de la nature du sol et des contraintes appliquées.

On a observé qu'à l'intérieur d'un échantillon, la cinétique de tout sous-échantillon est identique à celle de l'échantillon complet. Cette cinétique a été étudiée à la fois à partir de plusieurs essais oedométriques classiques sur des échantillons d'épaisseurs différentes et à partir d'un seul essai sur un échantillon très épais ( $\sim 10$  cm) assorti de repères visuels et placé dans un moule transparent.

- les coefficients G et B ont été étudiés, dans le cas du déchargement d'un sol normalement consolidé, en fonction des contraintes  $\sigma'_i$  initiale et  $\sigma'_f$  finale. Leurs variations ont pu être approchées par les relations :

$$G = \frac{\sigma'_i - \sigma'_f}{u \sigma'_i \sigma'_f + v (\sigma'_i - \sigma'_f) + s} \quad \text{et} \quad B = \frac{x \sigma'_i + y}{\sigma'_i (\sigma'_f + z)}$$

où u, v, s, dépendent de la nature du sol et x, y, z, dépendent en outre de l'épaisseur de la couche.

La détermination des 6 coefficients u, v, s, x, y, z, demande un minimum de 5 essais oedométriques sur des échantillons d'épaisseur constante, en encadrant inférieurement et supérieurement les valeurs des contraintes  $\sigma'_i$  et  $\sigma'_f$  que l'on désire étudier.

- une étude expérimentale a montré qu'avec une alimentation en eau uniquement par le haut, le gonflement se propage dans la partie inférieure d'une couche argileuse avant sa réalisation complète dans la partie supérieure en raison de l'existence de succions différentielles dans la carotte. La distance de propagation du front d'eau, associée à la propagation du gonflement, est en relation linéaire avec la racine carrée du temps :  $D = V \cdot \sqrt{t}$ .

Le phénomène progresse de plus en plus lentement au cours du temps et quand la durée de l'essai devient très grande, le taux de gonflement tend vers une valeur unique en tout point de la couche si l'épaisseur de celle-ci reste suffisamment faible pour que l'influence de la contrainte géostatique demeure négligeable.

~ le moteur du gonflement est la succion  $\tau$  du sol (succion due à un séchage ou à un déchargement mécanique). L'application de chemins de contraintes par paliers de succion croissants ou décroissants entraîne une réponse différente selon les sols, qui dépend de l'histoire du matériau.

Dans le domaine de saturation, il y a égalité entre succion  $\tau$  et pression de gonflement  $P_s$ . La mise au point d'une méthode simple pour mesurer directement la succion d'un sol dans un état donné (méthode du papier filtre) a permis de montrer qu'il existe une relation linéaire décroissante entre le logarithme de la succion (exprimé en  $pF$ ) et la teneur en eau :

$$\log \tau = \log P_s = pF = a w + b$$

Cette relation donne directement une estimation de la pression de gonflement d'un sol saturé en fonction de sa teneur en eau.

## 2 - ETUDE MICROSCOPIQUE DU GONFLEMENT DES SOLS ARGILEUX

La variation de texture des sols au cours du gonflement a été appréciée à l'aide de deux techniques complémentaires : microscopie électronique à balayage (M.E.B.) et porosimétrie par injection de mercure.

Les observations au M.E.B. ont montré que les sols étudiés ont à l'état naturel une texture assez compacte constituée plus ou moins nettement d'agrégats argileux mal individualisés et tassés les uns contre les autres. Au gonflement, cette texture évolue en une texture nettement en agrégats séparés par des pores de géométrie plutôt bidimensionnelle. La taille des agrégats diminue et l'épaisseur des pores augmente au cours du gonflement.

Par injection de mercure deux classes de pores ont été mises en évidence pour l'essentiel des sols étudiés : une classe de pores intra-agrégats (rayon d'accès inférieur à  $0,05\mu$ ) et une classe de pores inter-agrégats (rayon d'accès supérieur à  $0,05\mu$ ). Il apparaît que la classe de pores intra-agrégats ne varie pas au cours du gonflement. L'augmentation de porosité est due à l'augmentation de la porosité inter-agrégats, avec augmentation croissante des rayons d'accès de pores en cours de gonflement, preuve de l'ouverture de ces pores. Le logarithme du rayon modal  $R$  de la classe de pores inter-agrégats est en relation linéaire croissante avec la teneur en eau du sol :  $\log R = \alpha w + \beta$ ; montrant que l'évolution de texture au cours du gonflement peut être décrite par un modèle capillaire simple.

### 3 - APPLICATIONS PRATIQUES ET HYPOTHESES D'ETUDES

Il est possible, à partir d'un nombre réduit d'essais assez simples, de déterminer les principaux paramètres du gonflement : taux de gonflement  $\frac{\Delta h}{h_0}$  à tout instant, taux de gonflement final G et temps de demi-gonflement B selon l'épaisseur de la couche considérée et les contraintes mécaniques.

La pression de gonflement d'un sol saturé peut être approchée à partir d'un essai très simple, la méthode du papier filtre, qui pourrait être appliqué systématiquement au laboratoire et sur chantier comme un essai de routine caractérisant l'aptitude des sols au gonflement.

L'étude microscopique a montré que l'évolution de la texture des sols est très nette au cours du gonflement.

La méthodologie employée au cours de ce travail pourrait, à notre avis, être utilisée ou développée dans plusieurs directions :

- comparaison entre les résultats obtenus par la méthode du papier filtre et les résultats obtenus par d'autres méthodes plus classiques de mesure de la pression de gonflement ;
- étude de la réponse des sols à des paliers de succion imposés en fonction de leur "histoire", et comparaison avec les courbes classiques de consolidation-gonflement à l'oedomètre ;
- relations entre la progression du gonflement à l'intérieur d'une couche et la perméabilité des sols (en particulier l'influence de la perméabilité sur le débit d'eau dans le sol, faible quand la succion est forte, devient prépondérant quand la succion tend vers zéro) ;
- étude de la distribution de la phase solide (et non plus seulement du réseau poreux), par réalisation de répliques, bien que la méthodologie paraisse assez délicate dans le cas des sols argileux ;
- étude tant macroscopique que microscopique d'un grand nombre de types de sols argileux en particulier à prépondérance smectitique.

En conclusion, il s'avère que malgré tous les travaux déjà effectués sur les relations entre sol et eau, et en particulier sur le phénomène de gonflement, un long chemin reste encore à parcourir, tant à l'échelle d'une couche argileuse en vraie grandeur qu'à l'échelle de la particule d'argile, et surtout dans les relations entre ces deux échelles.

## BIBLIOGRAPHIE

- AGARWAL, K.P., and SHARMA, S.C. (1973)  
A method for measuring swelling pressure of an expansive soil  
Proc. of the 3<sup>rd</sup> I.C.E.S., Haïfa, p. 155-159
- AITCHISON, G.D. (1965)  
Soil properties, shear strength and consolidation  
Proc. of the 6<sup>th</sup> I.C.S.M.F.E., Montréal, p. 318-321
- AITCHISON, G.D. (1969)  
Soil suction in foundation design  
Proc. of the 7<sup>th</sup> I.C.S.M.F.E., Mexico, p. 1-8
- AITCHISON, G.D. (1973)  
The quantitative description of the stress deformation behaviour of expansive soils  
Proc. of the 3<sup>rd</sup> I.C.E.S., Haïfa, p. 77-113
- AITCHISON G.D., MARTIN, R (1973)  
A membrane oedometer for complex stress-patch studies in expansive clays  
Proc. of the 3<sup>rd</sup> I.C.E.S., Haïfa, p. 161-167
- AL-KHAFAF, S (1972)  
Evaluation of the filter-paper method for estimating soil water potential  
Master of Science, Utah State Univ., Logan
- ARNOULD, M, AUDIGUIER-MARCEL, M, DELAGE P, PELLERIN FM, STRUILLLOU R, VAYSSADE B (1980)  
Etude de sols argileux par la porosimétrie en mesure. Contrôle des variations de texture sous diverses conditions.  
Proc. 26<sup>ème</sup> Congrès Géologique International, Paris (sous presse)
- AUBOUIN J, BROUSSE R et LEHMAN J.P. (1968)  
Précis de Géologie - Tome I  
Dunod Ed.
- AUDIGUIER-MARCEL, M (1979)  
Contribution à l'étude du comportement de l'eau dans les sols en fonction de leur texture  
D.E.A. - Paris, E.N.S.M.P
- BAKER R, KASSIF G, LEVY A (1973)  
Experience with a psychrometric technique  
Proc. of the 3<sup>rd</sup> I.C.E.S., Haïfa, p. 83-95

- . BAVER L.D., GARDNER W.H., GARDNER W.R. (1972)  
Soils physics  
John Wiley and Sons Ed.
- . BONAZ R. (1976)  
Quantification des corrélations entre l'anisotropie de structure et l'anisotropie  
mécanique des argiles  
Thèse 3ème Cycle, Faculté de Grenoble, 16 juillet 1976
- . BOTTERO A. (1971)  
Etude des propriétés mécaniques des matériaux argileux en fonction de leurs propriétés  
physico-chimiques  
Thèse 3ème Cycle, Faculté de Grenoble, 1971
- . BOUSQUIE P. (1979)  
Texture et porosité des roches calcaires  
Thèse Doct.-Ing., Paris, E.N.S.M.P.
- . BRACKLEY, I.J.A. (1973)  
Swell pressure and free swell in a compacted clay  
Proc. of the 3<sup>rd</sup> I.C.E.S., Haïfa, p. 169-176
- . BRACKLEY, I.J.A. (1975)  
Swell under load  
Proc. of the 6<sup>th</sup> R.C.A.S.M.F.E., Durban, p. 65-71
- . CAILLERES S, et HENIN S.  
Minéralogie des argiles  
Masson et Cie Ed.
- . CAROTHER, H.P. (1965)  
Engineered Foundations in expansive clays  
Proc. of the I.R.E.C.E.C.S., Texas, p. 302-323
- . CHAKLADER, A.C.D. and COOK, R.C. (1968)  
Kinetics of reactive hot pressing of clays and hydroxides  
Am. Ceram. Soc. Bull., Vol. 47, n° 8, Août 1968, p. 712-716
- . CHEN, F.H. (1973)  
The basic physical properties of expansive soils  
Proc. of the 3<sup>rd</sup> I.C.E.S., Haïfa, p. 17-25
- . CHEN, F.H. (1975)  
Foundations on expansive soils  
Elsevier Ed.
- . COLLINS K., MC GOWN A. and BARDEN L. (1973)  
Microstructural features of some Israeli expansive soils  
Proc. of the 3<sup>rd</sup> I.C.E.S., Haïfa, p. 27-33
- . COLLINS K., MC GOWN A. (1974)  
The form and function of microfabric features in a variety of natural soils  
Geotechnique, 1974, Vol. 24, p. 223-254

- DAKSHANAMURTHY, V. (1978)  
A new method to predict swelling using a hyperbolic equation  
Geotechnical Engng., Vol. 9, n° 1, June 1978, p. 29-38
- DAKSHANAMURTHY, V. (1979)  
A stress-controlled study of swelling characteristics of compacted expansive clays  
Geotech. Testing J., Vol. 2, N° 1, March 1979, p. 57-60
- DAVID D., KOMORNIK A. (1980)  
Field behaviour of unloaded piles in swelling clays  
Proc. of the 4th I.C.E.S., Denver, 1980 (sous presse)
- DE BRUIJN, C.M.A. (1961)  
Swelling characteristics of a transported soil profile at Leenhof Vereeniging (Transvaal)  
Proc. Of the 5th I.C.S.M.F.E., Paris, p. 43-49
- DELAGE, P. (1979)  
Etude du milieu poreux et de la texture d'Argiles Sensibles du Québec  
Thèse Doct.-Ing., E.N.S.M.P., Paris
- DIDIER, G. (1972)  
Etude du gonflement cristallin des Montmorillonites  
Bull. Groupe Français des Argiles, Tome XXIV, p. 99-110
- DIDIER, G. (1973)  
Swelling pressure of soils -Experimental device- Field of utilization  
Proc. of the 3rd I.C.E.S., Haïfa, p. 187-193
- DIDIER, G., KASTNER B., BOURDEAU Y. (1980)  
New cell for study of swelling soils  
Proc. of the 4th I.C.E.S., Denver, p. 18-33
- DONALDSON, G. (1980)  
Summary of progress of research on expansive soils in South Africa  
Proc. of the 4th I.C.E.S., Denver, (sous presse)
- ESCARIO, V. (1969)  
Swelling of soils in contact with water at a negative pressure  
Proc. of the 2nd I.C.E.S., Texas, p. 207-217
- ESCARIO, V. (1969)  
A new method for in situ measurement of pore water tension  
Proc. of the 2nd I.C.E.S., Texas, p. 194-205
- ESCARIO, V. (1973)  
Apparatus for measuring swelling and collapse of soils under controlled suction  
Proc. of the 8th I.C.S.M.F.E., Moscou, p. 123-124
- ESCARIO V, and SAEZ, J. (1973)  
Measurement of the properties of swelling and collapsing soils under controlled suction  
Proc. of the 3rd I.C.E.S., Haïfa, p. 195-200

- ESCARIO, V. (1980)  
Effects of suction on the bearing capacity and CBR values of the soils  
Proc. of the 4th I.C.E.S, Denver (sous presse)
- FAWCETT, R.G., and COLLIS-GEORGE, N. (1967)  
A filter-paper method for determining the moisture characteristics of soils  
Austr. Journ. of Exp. Agric. and Anim. Husb., Vol. 7, 1967, p. 162-167
- FRIPIAT, J., CHAUSSIDON, J, JELLI, A (1971)  
Chimie physique des phénomènes de surface  
Masson et Cie Ed.
- GARCIA-BENGOCHEA, I, LOVELL, C.W., and ALJSCHAEFFLA, G. (1979)  
Pore distribution and permeability of silty clays  
Journ. of the Geot. Engng. Div., July 1979, Vol. 105, p. 839-856
- GARDNER, R (1937)  
A method of measuring the capillary tension of soil moisture over a wide moisture range  
Soil Science, Vol 43, n° 4, 1937, p. 277-283
- GIGAN, J.P. (1973)  
Essai de cartographie géotechnique -Région de la Défense et boucle de Gennevilliers  
Thèse Doct.-Ing., E.N.S.M.P., Paris
- GIROUD, J.P., et BOTTERO, A (1972)  
Influence des propriétés physico-chimiques des argiles monominérales sur leur comportement mécanique  
Bull. Liais. P. et C., Inf. 1204, n° 62
- GRIM, R.E. (1962)  
Applied clay mineralogy  
Mc Graw-Hill Book Company Inc. Ed.
- GROMKO, G.J. (1974)  
Review of expansive soils  
J. of the Geot. Engng Div., Vol. 100, GTG, p. 667-687
- HARPER, T.R., APPEL, G, PENDLETON, M.W., SZYMANSKI, J.S., TAYLOR, R.K. (1979)  
Swelling strain development in sedimentary rock in Northern New York  
Int. J. Rock. Mec. and Mining Sci., Vol. 16, n° 5, 1979, p. 271-292
- HENIN, S (1977)  
Cours de physique du sol  
Orstom Editest
- HILLEL, D. (1974)  
L'eau et le sol. Principe et processus physiques  
Vander Ed.
- JENNINGS, J.E. (1965)  
The prediction of amount and rate of heave likely to be experienced in engineering construction on expansive soils  
Proc. of the 2nd I.A.E.C.E.C., Texas



- . JENNINGS, J.E., FIRTH, R.A., RALPH, T.K., and NAGAR, N. (1973)  
An improved method for predicting heave using the oedometer test  
Proc. of the 3<sup>rd</sup> I.G.E.S., Haifa, p. 149-154
- . JOHNSON, L.D., and SNETHEN, D.R. (1978)  
Prediction of potential heave of swelling soils  
Geot. Test. Journ., Vol. 1, n° 3, Sept. 78, p. 117-124
- . KASSIF, G. and BENSHALOM, A. (1971)  
Experimental relationship between swell pressure and suction  
Geotechnique 21, n° 3, p. 245-255
- . KERISEL, J. et SAVEY, P. (1977)  
Soulèvements d'une Argile Plastique et leurs prévisions  
Proc. of the Int. Symp. on Soil Mech., Tokyo, p. 593-596
- . KOMORNIK, A., LIVNEH, M., SMUCHA, S. (1980)  
Shear strength and swelling of clays under suction  
Proc. of the 4<sup>th</sup> I.C.E.S., Denver, p. 206-226
- . KONSTANKIEWICZ, K. and STAWINSKI, J. (1976)  
The use of the mercury porosimeter for studies of some soil properties  
Polish J. of Soil Science, Vol. IX, n° 1, 1976, p. 3-10
- . KROHN, J.P., SLOSSON, J.E. (1980)  
Assessment of expansive soils in the United States  
Proc. of the 4<sup>th</sup> I.C.E.S., Denver, p. 596-608
- . KULCHITSKIJ, L.I. (1970)  
Application d'un modèle osmotique à l'étude de la compressibilité et du gonflement des argiles saturées.  
Ministertvo Geologii, SSSR, Trudy VSEGINGEO, Vol. 31, Moscou, p. 12-29
- . LADD, C.C. (1973)  
The identification and behaviour of compacted expansive clays  
Proc. of the 3<sup>rd</sup> I.C.E.S., Haifa, p. 201-205
- . LAMBE, T.W. and LADD, C.C. (1961)  
The identification and behaviour of compacted expansive clays  
Proc. of the 5<sup>th</sup> I.C.S.M.F.E., Paris, p. 201-205
- . LAMBE, T.W., and WHITMAN, R.V. (1969)  
Soils Mechanics  
John Wiley and Sons, Ed.
- . LE ROUX, A. (1976)  
Classification des différentes textures de roches argileuses et marneuses en relation avec leur comportement  
Bull. Liais. P. et C., n° Spécial, 1976

MAC QUEEN, I.S., MILLER, R.F. (1968)

Calibration and evaluation of a wide range gravimetric method for measuring moisture stress

Soil Science, Vol. 106, n° 3, p. 225-231

MAC QUEEN, R.G. (1980)

Field studies of airport pavements on expansive clays

Proc. of the 4th I.C.E.S., Denver, p. 242-261

MADSEN, F.T. (1976)

Quelldruckmessung und Tongesteinen und berechnung des quelldrucks nach der DLVO-theorie  
Mitteilungen des Institutes für Grundbau, 1976

MADSEN, F.T. (1979)

Determination of the swelling pressure of claystones and marlstones using mineralogical data

Proc. of the 4th, I.C.I.S.M.R., Sept. 1979, Montreux

MAGNAN, J.P., BAGHERY, BRUCY, M., TAVENAS, F. (1979)

Etude numérique de la consolidation unidimensionnelle en tenant compte des variations de la perméabilité, de la compressibilité du sol, du fluage et de la non saturation

Bull. Liais. P. et C., n° 103, Sept-oct. 1979, p. 83-94

MARIOTTI, M. (1976)

Le gonflement des sols argileux surconsolidés (aspect du phénomène - influence sur les structures - précautions à envisager)

Revue des Géologues, n° 39, p. 13-28

MAZURIK, A., and KOMORNIK, A. (1973)

Interaction of superstructure and swelling clays

Proc. of the 3rd I.C.E.S., Haifa, p. 309-317

MARI, G and ROKHSAR, A. (1974)

Theory of consolidation for clays

Proc. of the Geot. Engng Div., Vol. 100, GT8, p. 889-904

MARI, G, ROKHSAR, A. and BOHOR (1975)

Composition and compressibility of typical samples of Mexico City clay  
Geotechnique, Vol. 25, n° 3, p. 527-554

MARI, G, ULLRICH, C.R., CHOI, Y.K. (1978)

The rate of swelling of overconsolidated clays subjected to unloading

Geotechnique, Vol. 28, n° 3, p. 281-307

MILLER, R.F.

Geologie des argiles

McGraw-Hill, Ed.

MURPHY, J.K. (1976)

Fundamental of soil behaviour

John Wiley and Sons Ed.

- MOURoux, P. (1969)  
Contribution à l'étude des problèmes de retrait et de gonflement des sols  
Thèse de Spécialité, Univ. Grenoble
- MYSLIVEC, A. (1969)  
Experimental study of clay in time  
Proc. of 7<sup>th</sup> I.C.S.M.F.E., Mexico, p. 307-309
- NEWLAND, P.L. (1965)  
The behaviour of soils in terms of two kinds of effective stress  
Proc. of the 2<sup>nd</sup> I.C.E.S., Texas, p. 78-92
- OBERMIER, S.F. (1974)  
Evaluation of laboratory techniques for measurement of swell potential of clays  
Bull. Ass. Eng. Geol., Vol. XI, n° 4, p. 293-314
- O'NEILL, M.W., and GHAZZALY, O. (1977)  
Swell potential related to building performance  
J. of Geot. Engng. Div., GT12, p. 1363-1379
- ORDEMIR, I., SOYDEMIR, C and BIRAND, A (1977)  
Swelling problems of Ankara clay, Turkey  
Proc. of the 9<sup>th</sup> I.C.S.M.F.E., Tokyo, Vol. 1, p. 243-246
- OSIPOV, V.I., and SOKOLOV, V.N. (1978)  
A study of the nature of the strength and deformation properties of clay soils with  
the help of the scanning electronic microscope  
Bull. A.I.G.I., n° 17, p. 91-94  
  
Relation between the microfabric of clay soils and their origin and degree of  
compaction  
Bull. A.I.G.I., n° 18, p. 73-81  
  
Structure formation in clay sediments  
Bull. A.I.G.I., n° 18, p. 83-90
- PELLERIN, F.M. (1978)  
Les altérations des maçonneries carbonatées de tunnels ferroviaires anciens  
Thèse Doct.-Ing., E.N.S.M.P., Paris
- PELLERIN, F.M. (1980)  
La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géotechnique des sols et des roches  
Bull. lias. P. et C., n° 106, (à paraître)
- PETRY, J.M., ARMSTRONG, J.C. (1980)  
Relationship and variation of properties of clays  
Proc. of the 4<sup>th</sup> I.C.E.S., Denver, p. 172-189
- PHAN, K.D. (1977)  
Elements de minéralogie appliquée  
E.N.S.M.P.

- . PHILLIPONAT, G. (1977)  
Mesure de la compressibilité des sols par un essai oedométrique accéléré  
Annales I.T.B.T.P., n° 347
- . PHILLIPONAT, G. (1978)  
Désordres dus à la présence de sols gonflants dans la région parisienne  
Annales I.T.B.T.P., n° 364  
  
Conception des chaussées sur argiles gonflantes  
Service Outre-Mer - Note Technique
- . PHILIPS, J.R. (1969)  
Hydrostatics and hydrodynamics in swelling soils  
Wat. Res. Research, Vol. 5, n° 5, p. 1070-1077
- . POMEROL, CH., FEUGUEUR, L. (1974)  
Guides Géologiques Régionaux - Bassin de Paris  
Masson et Cie Ed.
- . POPESCU, M.E. (1979)  
Engineering problems associated with expansive clays from Romania  
Engng. Geol., Vol. 14, n° 1, June 1979, p. 43-53
- . RANGANATHAM and SATYANARAYANA (1965)  
A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays  
Proc. of the 6<sup>th</sup> I.C.S.M.F.E. , Montréal, p. 92-96
- . RAO, S.N. (1979)  
The influence of fabric on the shrinkage limit of clay  
Geot. Engng., Vol. 10, 1979, p. 243-251
- . RICHARDS, L.A. (1931)  
Capillary conduction of liquids in porous mediums  
Physics 1, p. 318-333
- . RUNACHER, J.M. (1970)  
La structure des argiles. Application à l'étude de leurs propriétés macroscopiques  
Thèse 3ème Cycle, Univ. Grenoble - 20 février 1970
- . SAMPSON, E, SCHUSTER, R.L. and BUDGE, W.D. (1965)  
A method of determining swell potential of an expansive clay  
Proc. of the 2<sup>nd</sup> I.C.E.S., Texas, p. 255-275
- . SANKARAN, B.E. and VENKATESCHWAR, R. (1973)  
A microscopic model of expansive clay  
Proc. of the 3<sup>rd</sup> I.C.E.S., Haifa, p. 65-70
- . SERGEYEV, Y.M., OSIPOV, V.I., SOKOLOV, V.N and GRABOWSKA-OL SZEWSKA, B (1978)  
Types of the microstructure of clayed soils  
Proc. of the 3ème C.I. A.I.G.I., Madrid, sept. 1978, p. 319-327

- SNETHEN D.R. (1980)  
Characterization of expansive soils using soil suction data  
Proc. of the 4th I.C.E.S., Denver, p. 54-75
- STEPKOWSKA, E.T. (1980)  
Study in physical theory of expansiveness in clays  
Proc. of the 4th I.C.E.S., Denver, p. 136-157
- SULLIVAN, R.A., and MC CLELLAND, B. (1969)  
Prediction heave of buildings on unsaturated clays  
Proc. of the 2nd R.E.C.E.C.S., Texas, August 1969, p. 404-420
- TAVENAS, F, BRUCY, M, MAGNAN, JP, LAROCHELLE, P, ROY, M (1979)  
Analyse critique de la théorie de consolidation unidimensionnelle de TERZAGHI  
Rev. Franc. de Geot., n° 7, Mai 1979, p. 29-43
- TESSIER, D., PEDRO, J. (1976)  
Les modalités de l'organisation des particules dans les matériaux argileux  
Sciences du Sol, Bull. A.F.E.S., n° 2, p. 85-99
- TESSIER, D (1978)  
Etude de l'organisation des argiles calciques - Evolution au cours de la dessiccation  
Ann. Agro., n° 29 (4), p. 319-355  
  
Techniques d'étude de l'orientation des particules argileuses sur des échantillons secs ou humides  
Ann. Agro., n° 29 (2), p. 193-207
- TESSIER, D, BERRIER, J. (1978)  
Observations d'argiles hydratées au M.E.B. - Importance et choix de la technique de préparation  
Proc. of the 5th I.W.M.S.M., Granada, p. 117-135
- TESSIER, D, BERRIER, J. (1979)  
Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude des sols  
Sciences du Sol, Bull. A.F.E.S., n° 1, p. 67-82
- TESSIER, D, QUIRK, JP (1979)  
Sur l'aspect de la microscopie électronique à balayage dans la connaissance du gonflement des matériaux argileux  
Note présentée par G.MILLOT au C.R.Académie des Sciences, Paris, t.288, 14 mai 1979
- THIRY, M et WEBER, F (1977)  
Convergence du comportement entre les interstratifiés kaolinite-smectite et les fire-clays  
Clay Minerals, Vol. 12, n° 83, p. 83-91
- THIRY, M, LUCAS J, et TRAUTH, N (1977)  
Les minéraux argileux des sédiments paléogènes du Bassin Parisien. Evolution des smectites et des interstratifiés (7-14 Sm)  
Bull. Groupe Franc. des Arg., T. XXVI, p. 245-262

- . THURAIRAJAH, A. (1970)  
A study of the swelling characteristics of a remoulded clay  
J. of South As. Soc. of Soil Engng, Vol. 1, n° 1, p. 29-39
- . TOVEY, N.K., FRYDMAN, S, WONG, K.Y (1973)  
A study of swelling clay in the scanning electron microscope  
Proc of the 3rd I.C.E.S., Haifa, p. 45-54
- . ULLRICH, C.R. (1975)  
An experimental study of the time rate of swelling  
Ph. D. Thesis, Univ. of Illinois
- . UZAN, J. (1973)  
Two-dimensional restrained shrinkage of remoulded heavy clay  
Proc. of the 3rd I.C.E.S., Haifa, p. 137-141
- . UZAN, J (1976)  
Analysis of swelling-soil column infiltration test  
J of Geot. Engng. Div. GT9, p. 1014-1018
- . VAN OLPHEN (1963)  
An introduction to clay colloid chemistry  
Interscience Publishers, New York
- . VAYSSADE, B. (1978)  
Contribution à l'étude du gonflement interparticulaire des sols argileux  
Thèse Doct.-Ing., E.N.S.M.P., Paris, 30 nov. 1978
- . VIJAYVERGIYA, V.N. and GHAZZALY, D.I. (1973)  
Prediction of swelling potential for natural clays  
Proc. of the 3rd I.C.E.S., Haifa, p. 227-236
- . VIJAYVERGIYA V.N. and SULLIVAN, R.A. (1974)  
Simple technique for indentifying heave potential  
Bull. Of Ass. of Eng. Geol., Vol. XI, n° 4, p. 277-292
- . WILLIAMS, OB, SEDGLEY, R.H. (1965)  
A simplified filter-paper method for determining the 15-atmosphere percentage of soils  
Aust. J. of Exp. Agric. and Anim. Husb., Vol. 5, p. 201-202
- . WONG, HY, YONG, R.M. (1973)  
A study of swelling and swelling force during unsaturated flow in expansive soils  
Proc. of the 3rd I.C.E.S., Haifa, p. 143-151
- . YONG, RN, SCOTT, N, MC GILL (1973)  
On the physics of unsaturated flow in expansive clays  
Proc. of the 3rd I.C.E.S., Haifa, p. 1-9
- . YONG, R.N and WARKENTIN, B.P. (1975)  
Soil properties and behaviour  
Elsevier Science Pub. Comp.
- . ZEITLEN, JG, and KOMORNIK, A (1961)  
Deformations and moisture movements in expansive clays  
Proc. of the 5th I.C.S.M.F.E., Paris, p. 873-879

## ANNEXE 1

- MISE AU POINT DE L'ESSAI DE LIMITE DE RETRAIT
- RESUME DES PRINCIPALES METHODES D'IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE ET PETROGRAPHIQUE

### A.I.1. - ESSAI DE LIMITE DE RETRAIT

Rappelons que la limite de retrait  $W_R$  d'un sol est la teneur en eau à partir de laquelle le volume  $V$  de l'échantillon ne varie plus linéairement avec sa teneur en eau quand on se place en phase de séchage à l'air (Figur A.1.)

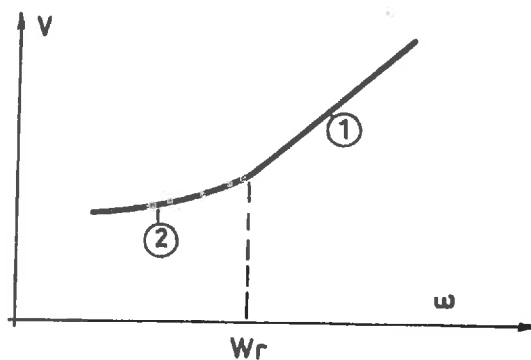


Figure A.1. - Courbe de séchage

Pendant toute la partie linéaire (1), le sol saturé au départ reste saturé car la diminution de volume est égale à la perte d'eau. A partir de la limite de retrait  $W_R$ , le sol perd de l'eau pratiquement sans variation de volume, il se désature.

La limite de retrait est donc de plus la teneur en eau de saturation du sol.

Cette limite de retrait dépend de la texture du sol (pour l'arrangement tri-dimensionnel du squelette solide) et ne peut donc être obtenue à partir d'échantillons remaniés, comme les limites d'ATTERBERG (limite de liquidité et limite de plasticité).

### Mode opératoire

Un échantillon de sol non remanié est taillé en forme parallélépipédique à l'aide d'un fil d'acier fin tendu. Il est conseillé de ne pas dépasser un volume de 3 à 4 cm<sup>3</sup> afin de réduire la durée de l'essai.

L'échantillon est pesé et son volume est mesuré au picnomètre à mercure ou au volumètre à mercure. Ce parallélépipède est ensuite placé dans une enceinte, de préférence thermostatée et à atmosphère sèche.

Toutes les heures l'échantillon est pesé et son volume mesuré.

L'essai est stoppé quand on ne constate plus de variation de volume significative, c'est-à-dire pratiquement au bout de 6 à 7 heures. L'échantillon est alors placé à l'étuve à 105° pendant 24 heures afin de déterminer conventionnellement son poids sec et de calculer les teneurs en eau correspondant à chaque mesure. On établit alors la courbe de variation du volume en fonction de la teneur en eau.

### Essais effectués

Tous les sols étudiés ont été testés :

|                                                    |          |
|----------------------------------------------------|----------|
| . Argile Plastique de Provins.....                 | 4 essais |
| . Argile Plastique Bariolée.....                   | 4 essais |
| . Fausses Glaises.....                             | 4 essais |
| . Argiles Vertes de Montreuil et de Villejuif..... | 2 essais |
| . Marne Bleue de Nogent.....                       | 1 essai  |
| . Argile d'Aix-Les-Bains.....                      | 4 essais |

Certains sols ont fait l'objet de plusieurs essais afin d'en tester la répétitivité. Les essais effectués sur l'Argile Plastique de Provins l'ont été à partir d'échantillons non remaniés mais à des teneurs en eau initiale différentes (entre 24 et 32 %), afin de noter une éventuelle influence de la teneur en eau initiale sur la limite de retrait.



### Résultats des essais et interprétation des résultats

Les courbes de retrait (volume en fonction de la teneur en eau) pour tous les essais et tous les types de sols sont présentés aux Figure A2a à A2f. Le Tableau A.1. nous donne pour chaque essai la teneur en eau initiale  $W_o$  et la limite de retrait  $W_R$  déterminée expérimentalement (intersection des deux demi-droites formant la courbe).

|   | A.P. Provins |       | A.P. Bariolée |       | Fausses Glaises |       | Argile Verte |       | Marne Bleue |       | Argile d'A |     |
|---|--------------|-------|---------------|-------|-----------------|-------|--------------|-------|-------------|-------|------------|-----|
|   | $W_o$        | $W_R$ | $W_o$         | $W_R$ | $W_o$           | $W_R$ | $W_o$        | $W_R$ | $W_o$       | $W_R$ | $W_o$      | $W$ |
| 1 | 30           | 15    | 30            | 17    | 36              | 17,6  | 26,4         | 19,7  |             |       | 26,4       | 22  |
| 2 | 24,3         | 15,5  | 31            | 17    | 32              | 17,2  | 26,3         | 19,5  |             |       | 25,8       | 21  |
| 3 | 31,7         | 15    | 32            | 17    | 31              | 16    |              |       | 25,2        | 21    | 26,3       | 22  |
| 4 | 26,3         | 14    | 32            | 17,6  | 32              | 16,8  |              |       |             |       | 26,7       | 22  |

Tableau A.1. - Résultats des essais de limite de retrait  $W_R$

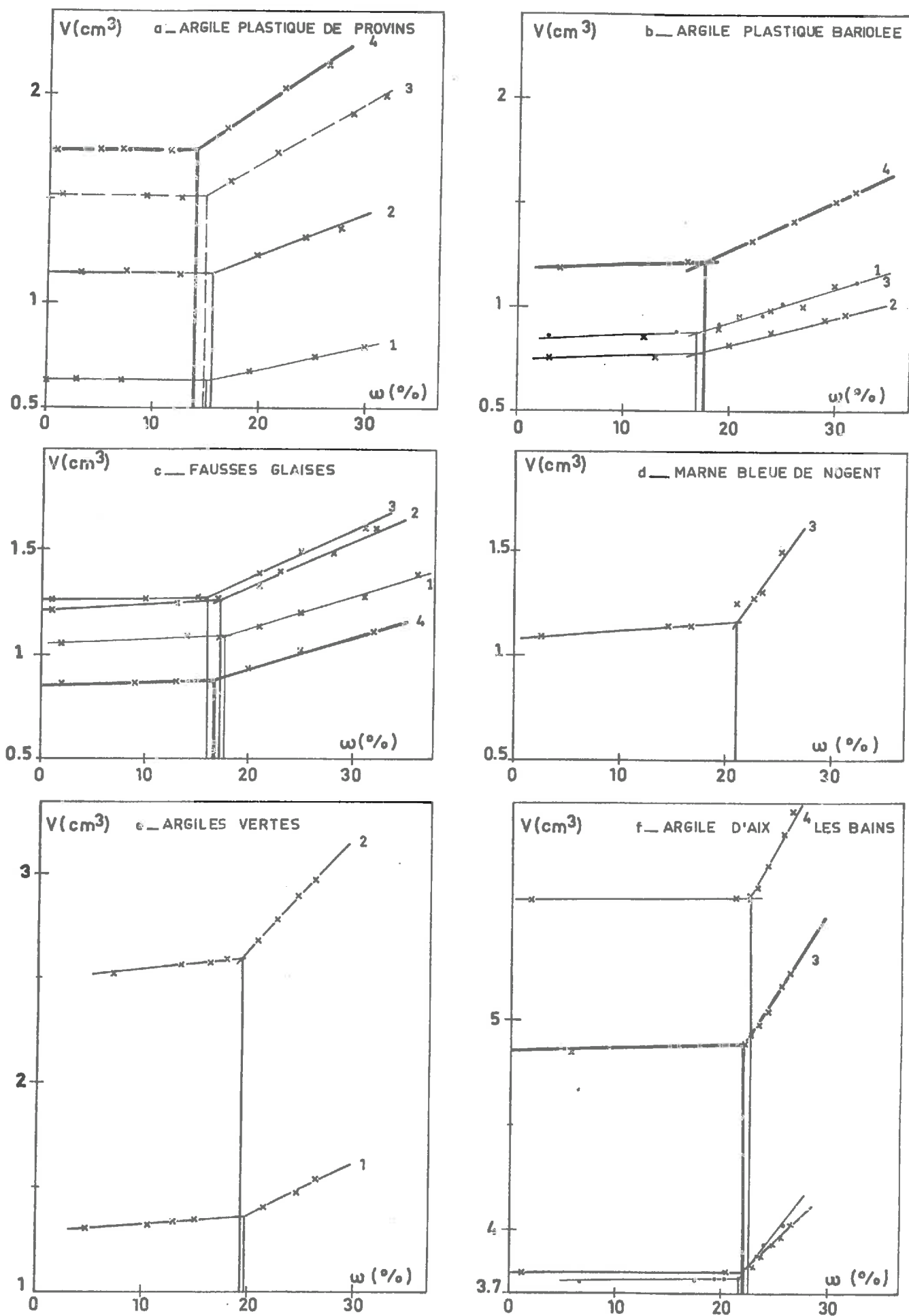
On remarque que les courbes de retrait sont effectivement composées de de demi-droites, la première (avec la plus grande pente) correspondant au domaine de saturation, et la seconde, presque horizontale, correspondant à la non saturation.

L'essai ainsi pratiqué est parfaitement répétitif pour un même sol comme le montrent les résultats voisins des quatre essais effectués sur l'Argil Plastique Bariolée, les Fausses Glaises et l'Argile d'Aix (Tableau A.1.).

Les résultats des essais effectués sur l'Argile Plastique de Provins semblent montrer que la teneur en eau initiale n'a pas d'influence sur la limite de retrait, pourvu que l'échantillon utilisé ne soit pas remanié.

Nous avons donc déterminé une valeur moyenne de la limite de retrait  $W_R$  pour chaque sol à partir des essais effectués :

Fig. A2 .— Courbes de retrait (volume — teneur en eau)



|     | A.P.Provins | A.P.Bariolée | Fausses Glaïses | Argiles Vertes | Marne Bleue | Argile d' |
|-----|-------------|--------------|-----------------|----------------|-------------|-----------|
| (%) | 15          | 17           | 17              | 20             | 21          | 22        |

Tableau A.2. - Limite de retrait  $W_R$  des sols étudiés

Ce sont ces valeurs que l'on retrouve au Paragraphe I.2. (caractérisation minéralogique et géotechnique des sols étudiés).

#### A.I.2. - RESUME DES PRINCIPALES METHODES D'IDENTIFICATION GEOTECHNIQUE ET PETROGRAPHIQUE

##### I.2.1. - Limites d'ATTERBERG

Les limites d'ATTERBERG sont des constantes physiques conventionnelles qui marquent les seuils entre :

- . le passage d'un sol de l'état liquide à l'état plastique (limite de liquidité  $W_L$ )
- . le passage d'un sol de l'état plastique à l'état solide (limite de plasticité  $W_p$ )

Ces limites ont pour valeur la teneur en eau du sol à l'état de transition considéré, exprimée en pourcentage du poids de matériau sec.

La différence  $I_p = W_L - W_p$  qui définit l'étendue du domaine plastique, est l'indice de plasticité.

##### I.2.1.1. - Limite de liquidité $W_L$

Deux méthodes sont utilisées en parallèle :

- . détermination de  $W_L$  à l'appareil de CASAGRANDE (Mode opératoire G.4. - LCPC - Dunod 1970)
- . détermination de  $W_L$  au cône suédois (Fall cone)

La valeur retenue est la moyenne obtenue sur les deux types d'essais effectués.

#### I.2.1.2. - Limite de plasticité $W_p$

Elle est déterminée par formation de rouleaux de 3 mm de diamètre. La limite de plasticité est atteinte lorsqu'en soulevant le rouleau il se fissure (Mode opératoire G.4. - LCPC - Dunod 1970).

#### I.2.2. - Dosage du carbone organique des sols

On utilise la méthode ANNE :

. oxydation de la matière organique par une solution de bichromate de potassium additionnée d'acide sulfurique, puis dosage du bichromate restant. Le calcul s'effectue en admettant que l'oxygène consommé est proportionnel au carbone organique du sol.

#### I.2.3. - Essai au Bleu

Il s'agit du dosage du bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir d'une couche monomoléculaire les surfaces externes et internes des particules fines en suspension dans de l'eau. Cet essai a pour but d'apprécier globalement la quantité et la qualité de la fraction argileuse ( $< 2 \mu$ ) présente dans un sol.

On utilise une solution de  $10 \pm 0,01$  g/l dans de l'eau déminéralisée. Les résultats s'expriment en nombre de grammes de bleu ramenés à 100 g de matériau.

L'essai au bleu mesure à la fois la surface externe, la surface interne des particules et aussi une partie des échanges de cations.

#### I.2.4. - Calcimétrie

On utilise la méthode DIETRICH-FRÜHING :

. attaque d'un échantillon broyé et séché par l'acide chlorhydrique (4 à 6 N) et mesure du volume de  $\text{CO}_2$  dégagé. Le poids de carbonate, traduit en calcite, est lu sur une courbe d'étalonnage.

### I.2.5. - Granulométrie par sédimentométrie

On utilise la méthode d'ANDREASEN, modifiée par RIVIERE :

- la méthode d'ANDREASEN est basée sur la loi de STOCKES. Le diamètre  $\phi$  d'une sphère est relié à sa vitesse de sédimentation  $V$  dans un fluide par :

$$\phi^2 = 4 V/C \quad \text{avec} \quad C = 2/g \cdot \frac{\rho_s - \rho_f}{\eta} \cdot g$$

$\rho_s$  : masse spécifique de la sphère

$\rho_f$  : masse spécifique du fluide

$\eta$  : viscosité du fluide

$g$  : constante de gravitation

Les échantillons sont décarbonatés à l'acide chlorhydrique et les matières organiques détruites à l'eau oxygénée. Ils sont ensuite dispersés dans l'eau distillée, et la suspension est défloculée à l'aide d'héxamétaphosphate de sodium à 5 %.

### I.2.6. - Lyophilisation

Cette méthode a pour but la déshydratation complète d'échantillons de sols sans modification sensible de leurs textures. Elle consiste à évacuer l'eau d'un matériau en passant de l'état liquide à l'état gazeux par l'intermédiaire de l'état solide.

L'essai s'effectue en deux parties :

- congélation brutale (trempe) du matériau dans du fréon liquide maintenu à sa température de congélation par de l'azote liquide (Figure A.3. a et b)
- sublimation de la glace sous vide, la vapeur d'eau étant cristallisée dans un piège intermédiaire (Figure A.4.)

Fig.A4— Schéma du lyophilisateur .

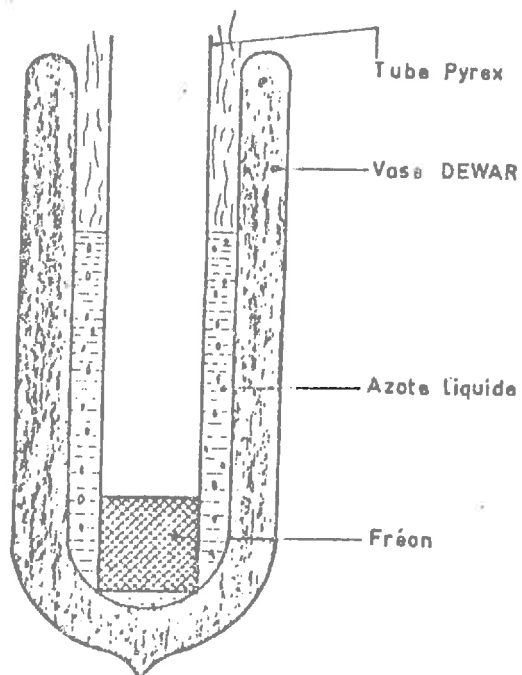
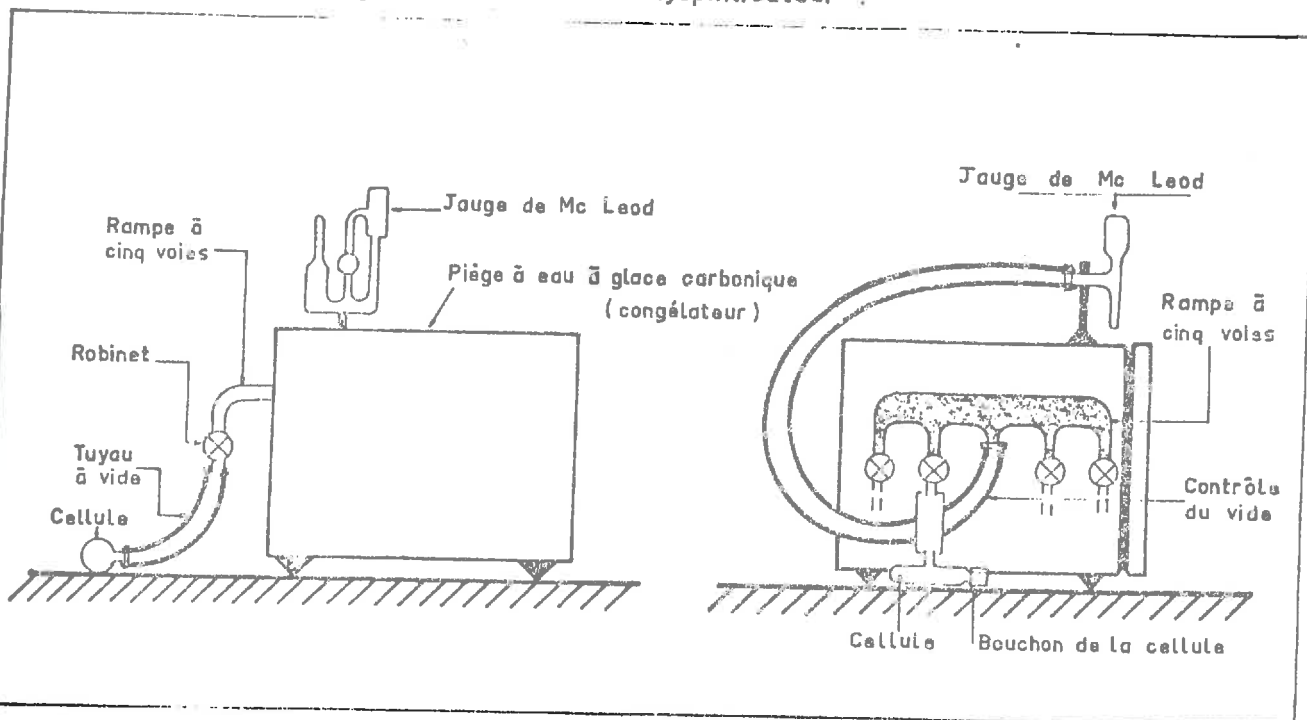


Fig.A3.a— Congélation au fréon de grands volumes .

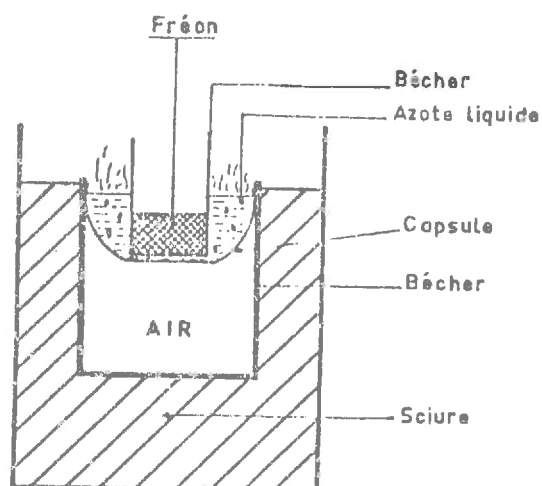


Fig.A3.b— Congélation au fréon de petits volumes .

## ANNEXE II

---

### LISTE DES POINTS DE MESURE EXPERIMENTAUX DES ESSAIS DE GONFLEMENT

---

- 1 - Essais de gonflement relatifs à l'étude de la cinétique du gonflement d'une couche argileuse dans son ensemble (§ II.1.) :

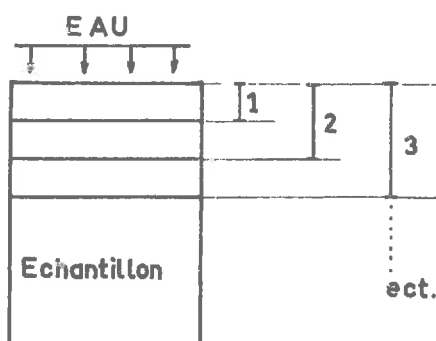
p. 238 à 249

Chaque essai fait l'objet d'une colonne de points de mesures où sont portés les taux de gonflement (en %) en fonction du temps. L'épaisseur de chaque échantillon est spécifiée.

- 2 - Essais de gonflement relatifs à l'étude de la propagation du gonflement à l'intérieur d'une couche argileuse (§ II.2.) :

p. 250 à 259

Chaque essai fait l'objet d'une page de points de mesures, où sont portés les gonflements absolus (en  $10^{-2}$  mm) de chaque sous-échantillon (Figure ci-dessous) en fonction du temps



- 3 - Essais de gonflement relatifs à l'étude de l'influence des contraintes initiales et finales (§ II.3.) :

p. 260 à 269

Pour chaque essai les contraintes  $\sigma_i$  et  $\sigma_f$  sont spécifiées. Les points de mesures portés sont les taux de gonflement (en %) en fonction du temps.

## ANNEXE II.1. - CINETIQUE DU GONFLEMENT

| ARGILE PLASTIQUE DE PROVINS - GONFLEMENT 1 - |                            |                   |                            |                   |                            |                     |                            |
|----------------------------------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|
| Ech : 1.1 ho :40,50                          |                            | Ech:1.2 ho :25,10 |                            | Ech:1.3 ho :19,08 |                            | Ech:1.4. ho : 20,71 |                            |
| Temps (mn)                                   | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)        | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)        | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)          | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) |
| 0                                            | 0                          | 0                 | 0                          | 0                 | 0                          | 0                   | 0                          |
| 1                                            | 0,07                       | 1                 | 0                          | 1                 | 0,30                       | 1                   | 0,53                       |
| 2                                            | 0,14                       | 2                 | 0,16                       | 2                 | 0,50                       | 2                   | 0,80                       |
| 5                                            | 0,31                       | 5                 | 0,48                       | 5                 | 0,97                       | 5                   | 1,30                       |
| 10                                           | 0,49                       | 10                | 0,84                       | 10                | 1,52                       | 10                  | 1,76                       |
| 20                                           | 0,75                       | 20                | 1,36                       | 20                | 2,50                       | 20                  | 2,61                       |
| 40                                           | 1,09                       | 40                | 1,91                       | 30                | 3,17                       | 40                  | 3,72                       |
| 60                                           | 1,41                       | 60                | 2,35                       | 60                | 4,53                       | 60                  | 4,49                       |
| 120                                          | 2,19                       | 120               | 3,53                       | 120               | 6,73                       | 120                 | 6,23                       |
| 240                                          | 3,28                       | 210               | 4,78                       | 195               | 8,52                       | 200                 | 7,97                       |
| 360                                          | 4,11                       | 300               | 5,82                       | 300               | 10,08                      | 300                 | 9,61                       |
| 480                                          | 4,85                       | 480               | 7,21                       | 420               | 11,30                      | 480                 | 11,64                      |
| 1430                                         | 8,03                       | 1430              | 10,72                      | 560               | 11,84                      | 1440                | 17,53                      |
| 1925                                         | 8,98                       | 1925              | 11,51                      | 4290              | 15,85                      | 1920                | 19,17                      |
| 5670                                         | 12,04                      | 5670              | 12,75                      | 7650              | 16,20                      | 3000                | 21,68                      |
| 10040                                        | 12,80                      | 10040             | 13,07                      | 15840             | 16,43                      | 4800                | 24,14                      |
| 16110                                        | 13,05                      | 16110             | 13,31                      | 34560             | 16,75                      | 8610                | 26,46                      |
|                                              |                            |                   |                            |                   |                            | 11820               | 27,23                      |



## ANNEXE II.1. - CINETIQUE DU GONFLEMENT

| ARGILE PLASTIQUE DE PROVINS - GONFLEMENT 1 |                            |                    |                            |                   |                            |                     |                            |
|--------------------------------------------|----------------------------|--------------------|----------------------------|-------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|
| Ech :2.1. ho : 18,10                       |                            | Ech:2.2. ho :24,70 |                            | Ech:2.3 ho :31,35 |                            | Ech:3.1.1 ho :41,40 |                            |
| Temps(mn)                                  | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps(mn)          | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps(mn)         | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps(mn)           | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) |
| 0                                          | 0                          | 0                  | 0                          | 0                 | 0                          | 0                   | 0                          |
| 1                                          | 0,06                       | 3                  | 0,04                       | 1                 | 0,07                       | 1                   | 0,01                       |
| 5                                          | 0,06                       | 6                  | 0,09                       | 2                 | 0,17                       | 2                   | 0,02                       |
| 10                                         | 0,11                       | 11                 | 0,17                       | 7                 | 0,26                       | 5                   | 0,05                       |
| 16                                         | 0,39                       | 20                 | 0,65                       | 13                | 0,36                       | 9                   | 0,07                       |
| 54                                         | 1,10                       | 45                 | 1,17                       | 22                | 0,73                       | 20                  | 0,13                       |
| 63                                         | 2,04                       | 60                 | 1,43                       | 49                | 1,39                       | 40                  | 0,19                       |
| 80                                         | 3,20                       | 130                | 3,51                       | 74                | 1,82                       | 65                  | 0,28                       |
| 101                                        | 4,64                       | 228                | 6,28                       | 133               | 3,04                       | 120                 | 0,39                       |
| 179                                        | 8,56                       | 303                | 7,88                       | 216               | 4,43                       | 175                 | 0,51                       |
| 228                                        | 10,83                      | 453                | 10,34                      | 298               | 5,55                       | 280                 | 0,69                       |
| 353                                        | 14,81                      | 598                | 12,33                      | 368               | 6,38                       | 1205                | 1,81                       |
| 598                                        | 16,08                      | 673                | 13,29                      | 558               | 8,13                       | 1715                | 2,20                       |
| 1088                                       | 16,41                      | 745                | 14,28                      | 743               | 9,35                       | 3015                | 2,85                       |
| 8298                                       | 16,52                      | 1014               | 16,32                      | 1258              | 11,53                      | 4095                | 3,09                       |
| 19788                                      | 16,74                      | 1873               | 17,36                      | 2128              | 13,42                      | 5645                | 3,25                       |
| 29527                                      | 16,91                      | 7488               | 18,00                      | 4278              | 14,38                      | 12735               | 3,29                       |
|                                            |                            | 15178              | 18,35                      | 10258             | 15,07                      | 15605               | 3,32                       |
|                                            |                            | 30169              | 18,65                      | 20238             | 15,53                      |                     |                            |
|                                            |                            |                    |                            | 28397             | 15,90                      |                     |                            |

## ANNEXE II.1. - CINETIQUE DU GONFLEMENT

| ARGILE PLASTIQUE DE PROVINS - GONFLEMENT 1 |                            |                      |                            |                      |                            |                      |                            |
|--------------------------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|
| Ech : 3.2.1ho : 30,05                      |                            | Ech: 3.3.1ho : 14,85 |                            | Ech3.4.1. ho : 40,05 |                            | Ech: 4.1.1ho : 33,35 |                            |
| Temps (mn)                                 | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)           | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)           | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)           | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) |
| 0                                          | 0                          | 0                    | 0                          | 0                    | 0                          | 0                    | 0                          |
| 1                                          | 0,02                       | 1                    | 0,24                       | 2                    | 0,01                       | 1                    | 0                          |
| 2                                          | 0,03                       | 2                    | 0,34                       | 5                    | 0,04                       | 5                    | 0                          |
| 5                                          | 0,08                       | 5                    | 0,61                       | 10                   | 0,10                       | 10                   | 0,06                       |
| 10                                         | 0,15                       | 10                   | 0,84                       | 20                   | 0,16                       | 21                   | 0,12                       |
| 20                                         | 0,20                       | 20                   | 1,21                       | 30                   | 0,22                       | 32                   | 0,19                       |
| 30                                         | 0,27                       | 30                   | 1,48                       | 60                   | 0,34                       | 49                   | 0,31                       |
| 60                                         | 0,40                       | 60                   | 2,12                       | 127                  | 0,55                       | 69                   | 0,47                       |
| 110                                        | 0,55                       | 101                  | 2,69                       | 182                  | 0,70                       | 92                   | 0,65                       |
| 165                                        | 0,72                       | 157                  | 3,40                       | 280                  | 0,91                       | 130                  | 0,93                       |
| 270                                        | 1,00                       | 200                  | 3,84                       | 410                  | 1,15                       | 191                  | 1,27                       |
| 1195                                       | 2,63                       | 420                  | 5,49                       | 1340                 | 2,20                       | 250                  | 1,55                       |
| 1705                                       | 3,09                       | 1350                 | 8,79                       | 2790                 | 3,00                       | 369                  | 2,14                       |
| 2635                                       | 3,59                       | 1865                 | 9,43                       | 4340                 | 3,41                       | 1112                 | 4,13                       |
| 4085                                       | 3,86                       | 2800                 | 9,90                       | 11430                | 3,80                       | 2023                 | 5,37                       |
| 5635                                       | 3,99                       | 4350                 | 10,13                      | 14300                | 3,85                       | 3194                 | 6,28                       |
| 12725                                      | 4,26                       | 11440                | 10,44                      |                      |                            | 6167                 | 7,08                       |
| 15595                                      | 4,38                       | 14310                | 10,61                      |                      |                            | 10517                | 7,39                       |
|                                            |                            |                      |                            |                      |                            | 19663                | 7,80                       |

## ANNEXE II.1. - CINETIQUE DU GONFLEMENT

| ARGILE PLASTIQUE DE PROVINS - GONFLEMENT 1 |                            |                          |                            |                          |                            |                        |                            |
|--------------------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| Ech : 4.2.1 $h_o$ : 33,30                  |                            | Ech: 4.3.1 $h_o$ : 34,25 |                            | Ech: 5.1.1 $h_o$ : 63,16 |                            | Ech: 5.4 $h_o$ : 65,10 |                            |
| Temps (mn)                                 | $\frac{\Delta h}{h_o}$ (%) | Temps (mn)               | $\frac{\Delta h}{h_o}$ (%) | Temps (mn)               | $\frac{\Delta h}{h_o}$ (%) | Temps (mn)             | $\frac{\Delta h}{h_o}$ (%) |
| 0                                          | 0                          | 0                        | 0                          | 0                        | 0                          | 0                      | 0                          |
| 1                                          | 0                          | 1                        | 0,22                       | 1                        | 0,02                       | 1                      | 0,03                       |
| 2                                          | 0                          | 2                        | 0,25                       | 2                        | 0,03                       | 2                      | 0,05                       |
| 5                                          | 0                          | 5                        | 0,44                       | 5                        | 0,08                       | 5                      | 0,10                       |
| 11                                         | 0                          | 10                       | 0,53                       | 11                       | 0,15                       | 11                     | 0,17                       |
| 20                                         | 0                          | 22                       | 1,47                       | 19                       | 0,23                       | 27                     | 0,28                       |
| 31                                         | 0,03                       | 36                       | 2,03                       | 37                       | 0,36                       | 51                     | 0,41                       |
| 50                                         | 0,15                       | 72                       | 2,65                       | 76                       | 0,58                       | 83                     | 0,54                       |
| 87                                         | 0,42                       | 105                      | 3,03                       | 108                      | 0,74                       | 109                    | 0,63                       |
| 144                                        | 0,99                       | 148                      | 3,47                       | 161                      | 0,94                       | 159                    | 0,78                       |
| 201                                        | 1,32                       | 224                      | 4,09                       | 243                      | 1,21                       | 233                    | 0,97                       |
| 263                                        | 1,65                       | 359                      | 5,00                       | 336                      | 1,46                       | 371                    | 1,25                       |
| 337                                        | 2,01                       | 1102                     | 7,71                       | 1241                     | 3,06                       | 408                    | 1,32                       |
| 1098                                       | 4,17                       | 1491                     | 8,84                       | 1766                     | 3,82                       | 1313                   | 2,37                       |
| 1560                                       | 4,98                       | 2013                     | 9,90                       | 2706                     | 4,51                       | 1838                   | 2,70                       |
| 2009                                       | 5,62                       | 3184                     | 10,65                      | 3131                     | 4,85                       | 2983                   | 3,29                       |
| 3180                                       | 6,61                       | 4271                     | 10,80                      | 4131                     | 5,49                       | 4203                   | 3,73                       |
| 4267                                       | 7,09                       | 6157                     | 10,99                      | 5571                     | 6,22                       | 5643                   | 4,10                       |
| 8394                                       | 7,57                       | 10199                    | 11,15                      | 11336                    | 7,93                       | 6023                   | 4,18                       |
| 20065                                      | 7,78                       | 20069                    | 11,27                      | 20471                    | 8,79                       | 11408                  | 4,81                       |
|                                            |                            |                          |                            | 30071                    | 8,96                       | 20043                  | 5,12                       |
|                                            |                            |                          |                            | 40121                    | 9,00                       | 30143                  | 5,21                       |
|                                            |                            |                          |                            |                          |                            | 40193                  | 5,22                       |

## ANNEXE II.1. - CINETIQUE DU GONFLEMENT

| ARGILE PLASTIQUE DE PROVINS -<br>GONFLEMENT 1 |                           |                      |                           | ARGILE PLASTIQUE DE PROVINS<br>GONFLEMENT 2 |                           |                    |                           |
|-----------------------------------------------|---------------------------|----------------------|---------------------------|---------------------------------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|
| Ech : 1    ho : 78,10                         |                           | Ech: 2    ho : 80,00 |                           | Ech:3.1.2 ho :41,03                         |                           | Ech:3.2.2ho :29,12 |                           |
| Temps(mn)                                     | $\frac{\Delta h}{ho}$ (%) | Temps(mn)            | $\frac{\Delta h}{ho}$ (%) | Temps(mn)                                   | $\frac{\Delta h}{ho}$ (%) | Temps(mn)          | $\frac{\Delta h}{ho}$ (%) |
| 0                                             | 0                         | 0                    | 0                         | 0                                           | 0                         | 0                  | 0                         |
| 1                                             | 0,06                      | 1                    | 0,03                      | 1                                           | 0,41                      | 1                  | 0,74                      |
| 2                                             | 0,08                      | 3                    | 0,07                      | 2                                           | 0,44                      | 2                  | 0,79                      |
| 3                                             | 0,10                      | 5                    | 0,10                      | 5                                           | 0,49                      | 5                  | 0,93                      |
| 4                                             | 0,12                      | 10                   | 0,16                      | 11                                          | 0,57                      | 14                 | 1,10                      |
| 5                                             | 0,13                      | 20                   | 0,24                      | 25                                          | 0,67                      | 18                 | 1,17                      |
| 10                                            | 0,15                      | 35                   | 0,34                      | 39                                          | 0,76                      | 34                 | 1,32                      |
| 20                                            | 0,23                      | 86                   | 0,77                      | 69                                          | 0,87                      | 48                 | 1,48                      |
| 86                                            | 0,67                      | 146                  | 1,16                      | 169                                         | 1,15                      | 148                | 2,08                      |
| 146                                           | 0,91                      | 221                  | 1,59                      | 224                                         | 1,27                      | 203                | 2,30                      |
| 301                                           | 1,38                      | 301                  | 1,96                      | 309                                         | 1,44                      | 288                | 2,61                      |
| 1246                                          | 2,69                      | 1246                 | 3,66                      | 504                                         | 1,73                      | 483                | 3,09                      |
| 2668                                          | 3,98                      | 2668                 | 5,57                      | 1399                                        | 2,44                      | 1378               | 4,22                      |
| 3191                                          | 4,34                      | 3191                 | 6,03                      | 1929                                        | 2,68                      | 1908               | 4,60                      |
| 4491                                          | 5,09                      | 4491                 | 6,98                      | 3069                                        | 2,95                      | 3048               | 5,03                      |
| 9876                                          | 6,74                      | 9876                 | 8,99                      | 4329                                        | 3,07                      | 4308               | 5,24                      |
| 12921                                         | 7,29                      | 11301                | 9,31                      | 5799                                        | 3,14                      | 5778               | 5,39                      |
| 20241                                         | 7,93                      | 12916                | 9,59                      | 10029                                       | 3,19                      | 10008              | 5,49                      |
| 30321                                         | 8,30                      | 20226                | 10,21                     | 14394                                       | 3,19                      | 14373              | 5,63                      |
| 40101                                         | 8,42                      | 31491                | 10,73                     |                                             |                           |                    |                           |
| 61701                                         | 8,53                      | 43446                | 10,86                     |                                             |                           |                    |                           |
| 70341                                         | 8,55                      | 60261                | 10,91                     |                                             |                           |                    |                           |
| 80421                                         | 8,59                      | 70431                | 10,92                     |                                             |                           |                    |                           |
| 90500                                         | 8,64                      | 80441                | 10,93                     |                                             |                           |                    |                           |
| 110000                                        | 8,68                      | 130000               | 10,93                     |                                             |                           |                    |                           |
| 133000                                        | 8,69                      | 155000               | 10,97                     |                                             |                           |                    |                           |

## ANNEXE II.1. - CINETIQUE DU GONFLEMENT

| ARGILE PLASTIQUE DE PROVINS - GONFLEMENT 2 |                            |                                  |                            |                                  |                            |                                  |                            |
|--------------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Ech : 3.3.2 <sub>ho</sub> : 15,07          |                            | Ech: 3.4.2 <sub>ho</sub> : 40,30 |                            | Ech: 4.1.2 <sub>ho</sub> : 33,28 |                            | Ech: 4.2.2 <sub>ho</sub> : 32,38 |                            |
| Temps (mn)                                 | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)                       | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)                       | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)                       | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) |
| 0                                          | 0                          | 0                                | 0                          | 0                                | 0                          | 0                                | 0                          |
| 1                                          | 0,36                       | 1                                | 0,14                       | 1                                | 0,78                       | 1                                | 0,96                       |
| 2                                          | 0,36                       | 2                                | 0,16                       | 2                                | 0,81                       | 2                                | 1,10                       |
| 5                                          | 0,46                       | 5                                | 0,17                       | 5                                | 0,93                       | 5                                | 1,25                       |
| 11                                         | 0,70                       | 11                               | 0,22                       | 10                               | 1,05                       | 10                               | 1,45                       |
| 22                                         | 0,96                       | 22                               | 0,26                       | 24                               | 1,26                       | 20                               | 1,65                       |
| 42                                         | 1,26                       | 36                               | 0,35                       | 35                               | 1,38                       | 31                               | 1,85                       |
| 56                                         | 1,46                       | 136                              | 0,62                       | 64                               | 1,61                       | 54                               | 2,13                       |
| 156                                        | 2,39                       | 191                              | 0,73                       | 80                               | 1,71                       | 87                               | 2,39                       |
| 211                                        | 2,72                       | 276                              | 0,86                       | 168                              | 2,18                       | 124                              | 2,67                       |
| 296                                        | 3,19                       | 471                              | 1,05                       | 280                              | 2,55                       | 229                              | 3,26                       |
| 491                                        | 3,78                       | 1366                             | 1,53                       | 1195                             | 3,91                       | 1202                             | 5,23                       |
| 1386                                       | 4,98                       | 1896                             | 1,65                       | 1516                             | 4,18                       | 1523                             | 5,54                       |
| 1916                                       | 5,21                       | 3036                             | 1,85                       | 1720                             | 4,31                       | 1727                             | 5,70                       |
| 4316                                       | 5,47                       | 4716                             | 1,90                       | 2640                             | 4,70                       | 2647                             | 6,16                       |
| 5786                                       | 5,51                       | 9996                             | 1,95                       | 3085                             | 4,85                       | 3092                             | 6,28                       |
| 10016                                      | 5,57                       | 10446                            | 1,97                       | 5510                             | 5,27                       | 5517                             | 6,90                       |
| 14381                                      | 5,71                       | 14361                            | 1,97                       | 10320                            | 5,54                       | 10327                            | 7,24                       |
|                                            |                            |                                  |                            | 15590                            | 5,66                       | 15597                            | 7,37                       |
|                                            |                            |                                  |                            | 21360                            | 5,71                       | 21367                            | 7,43                       |
|                                            |                            |                                  |                            | 31715                            | 5,82                       | 31722                            | 7,55                       |
|                                            |                            |                                  |                            | 40090                            | 5,86                       | 40097                            | 7,61                       |

## ANNEXE II.1. - CINETIQUE DU GONFLEMENT

| ARGILE PLASTIQUE DE PROVINS - GONFLEMENT 2 |                           |                       |                           |                       |                           |                  |                           |
|--------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------------|------------------|---------------------------|
| Ech : 4.3.2 ho : 34,33                     |                           | Ech: 5.1.2 ho : 66,19 |                           | Ech: 5.2.2 ho : 54,74 |                           | Ech:        ho : |                           |
| Temps (mn)                                 | $\frac{\Delta h}{ho}$ (%) | Temps (mn)            | $\frac{\Delta h}{ho}$ (%) | Temps (mn)            | $\frac{\Delta h}{ho}$ (%) | Temps (mn)       | $\frac{\Delta h}{ho}$ (%) |
| 0                                          | 0                         | 0                     | 0                         | 0                     | 0                         |                  |                           |
| 1                                          | 0,99                      | 1                     | 0,45                      | 1                     | 0,26                      |                  |                           |
| 2                                          | 1,15                      | 2                     | 0,48                      | 2                     | 0,31                      |                  |                           |
| 5                                          | 1,30                      | 5                     | 0,52                      | 5                     | 0,37                      |                  |                           |
| 10                                         | 1,49                      | 10                    | 0,58                      | 11                    | 0,47                      |                  |                           |
| 19                                         | 1,65                      | 23                    | 0,66                      | 22                    | 0,57                      |                  |                           |
| 30                                         | 1,82                      | 44                    | 0,75                      | 42                    | 0,69                      |                  |                           |
| 59                                         | 2,11                      | 60                    | 0,79                      | 79                    | 0,84                      |                  |                           |
| 75                                         | 2,32                      | 90                    | 0,86                      | 109                   | 0,95                      |                  |                           |
| 112                                        | 2,58                      | 125                   | 0,93                      | 169                   | 1,12                      |                  |                           |
| 275                                        | 3,32                      | 240                   | 1,11                      | 259                   | 1,34                      |                  |                           |
| 1190                                       | 4,97                      | 510                   | 1,40                      | 409                   | 1,59                      |                  |                           |
| 1511                                       | 5,30                      | 1425                  | 1,98                      | 529                   | 1,76                      |                  |                           |
| 1715                                       | 5,46                      | 1935                  | 2,20                      | 1444                  | 2,58                      |                  |                           |
| 2635                                       | 5,94                      | 5750                  | 3,12                      | 1954                  | 2,87                      |                  |                           |
| 3080                                       | 6,10                      | 10065                 | 3,42                      | 5769                  | 3,51                      |                  |                           |
| 5505                                       | 6,63                      | 15855                 | 3,57                      | 7214                  | 3,53                      |                  |                           |
| 10315                                      | 6,95                      | 20145                 | 3,68                      | 10084                 | 3,59                      |                  |                           |
| 15585                                      | 7,24                      | 25905                 | 3,78                      | 15874                 | 3,60                      |                  |                           |
| 21355                                      | 7,30                      | 30240                 | 3,83                      | 20164                 | 3,65                      |                  |                           |
| 31710                                      | 7,56                      | 40365                 | 3,94                      | 25924                 | 3,65                      |                  |                           |
| 40085                                      | 7,62                      | 46185                 | 4,00                      | 40324                 | 3,65                      |                  |                           |
|                                            |                           |                       |                           | 46204                 | 3,67                      |                  |                           |

## ANNEXE II.1. - CINETIQUE DU GONFLEMENT

| ARGILE VERTE DE MONTREUIL |                            |                        |                            |                        |                            |                        |                            |
|---------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|------------------------|----------------------------|
| Ech : 5      ho : 46.80   |                            | Ech: 6      ho : 81.70 |                            | Ech: 7      ho : 69.58 |                            | Ech: 8      ho : 92.03 |                            |
| Temps (mn)                | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)             | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)             | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)             | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) |
| 0                         | 0                          | 0                      | 0                          | 0                      | 0                          | 0                      | 0                          |
| 25                        | 0,36                       | 80                     | 0,67                       | 12                     | 0,46                       | 14                     | 0,24                       |
| 80                        | 0,75                       | 160                    | 0,97                       | 65                     | 0,79                       | 49                     | 0,49                       |
| 220                       | 1,86                       | 1075                   | 2,45                       | 150                    | 1,22                       | 128                    | 0,75                       |
| 360                       | 2,22                       | 1585                   | 2,88                       | 245                    | 1,44                       | 240                    | 0,99                       |
| 1300                      | 4,91                       | 2515                   | 3,51                       | 355                    | 2,03                       | 369                    | 1,14                       |
| 1825                      | 6,07                       | 3010                   | 3,78                       | 1280                   | 3,02                       | 1320                   | 2,06                       |
| 5650                      | 10,85                      | 6850                   | 5,59                       | 1745                   | 3,31                       | 1613                   | 2,26                       |
| 8515                      | 11,54                      | 9775                   | 6,27                       | 5645                   | 4,17                       | 1860                   | 2,39                       |
| 11395                     | 12,54                      | 16975                  | 7,45                       | 8480                   | 4,53                       | 2760                   | 2,79                       |
| 15715                     | 13,08                      | 27055                  | 8,15                       | 11660                  | 4,92                       | 3300                   | 3,08                       |
| 20035                     | 13,29                      | 31405                  | 8,57                       | 17120                  | 6,35                       | 4200                   | 3,46                       |
| 26050                     | 13,55                      | 37150                  | 8,80                       | 21860                  | 6,68                       | 5640                   | 4,04                       |
| 28600                     | 13,55                      | 42925                  | 8,98                       | 31820                  | 7,14                       | 9960                   | 4,93                       |
| 35800                     | 13,55                      | 50125                  | 9,11                       | 58880                  | 7,47                       | 13380                  | 5,39                       |
|                           |                            |                        |                            |                        |                            | 20040                  | 6,00                       |
|                           |                            |                        |                            |                        |                            | 25800                  | 6,38                       |
|                           |                            |                        |                            |                        |                            | 33480                  | 6,70                       |
|                           |                            |                        |                            |                        |                            | 51720                  | 7,14                       |

## ANNEXE II.1. - CINETIQUE DU GONFLEMENT

| FAUSSES GLAISES       |                            |                     |                            |                       |                            |              |                            |
|-----------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|-----------------------|----------------------------|--------------|----------------------------|
| Ech : 2    ho : 90,47 |                            | Ech:3    ho : 64,92 |                            | Ech: 4    ho : 125,16 |                            | Ech:    ho : |                            |
| Temps (mn)            | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)          | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)            | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)   | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) |
| 0                     | 0                          | 0                   | 0                          | 0                     | 0                          |              |                            |
| 21                    | 0,90                       | 20                  | 0,90                       | 16                    | 0,37                       |              |                            |
| 76                    | 2,93                       | 36                  | 1,60                       | 26                    | 0,59                       |              |                            |
| 166                   | 4,39                       | 57                  | 2,14                       | 36                    | 0,80                       |              |                            |
| 286                   | 5,16                       | 80                  | 2,85                       | 46                    | 0,93                       |              |                            |
| 511                   | 5,98                       | 107                 | 3,51                       | 56                    | 1,09                       |              |                            |
| 1440                  | 7,47                       | 156                 | 4,25                       | 75                    | 1,37                       |              |                            |
| 1940                  | 8,00                       | 206                 | 4,84                       | 100                   | 1,63                       |              |                            |
| 5670                  | 10,10                      | 263                 | 5,67                       | 120                   | 1,93                       |              |                            |
| 7200                  | 10,49                      | 324                 | 6,38                       | 176                   | 2,33                       |              |                            |
| 8655                  | 10,82                      | 384                 | 6,93                       | 221                   | 2,52                       |              |                            |
| 11805                 | 11,30                      | 506                 | 7,93                       | 280                   | 2,76                       |              |                            |
| 15960                 | 11,61                      | 1410                | 10,63                      | 335                   | 2,94                       |              |                            |
| 20550                 | 11,94                      | 1950                | 11,49                      | 395                   | 3,08                       |              |                            |
| 38760                 | 12,16                      | 2850                | 12,26                      | 505                   | 3,32                       |              |                            |
| 66120                 | 12,21                      | 3390                | 12,45                      | 1410                  | 4,51                       |              |                            |
|                       |                            | 7170                | 13,02                      | 1680                  | 4,71                       |              |                            |
|                       |                            | 27330               | 13,02                      | 1930                  | 4,91                       |              |                            |
|                       |                            |                     |                            | 2855                  | 5,43                       |              |                            |
|                       |                            |                     |                            | 4285                  | 5,91                       |              |                            |
|                       |                            |                     |                            | 5735                  | 6,23                       |              |                            |
|                       |                            |                     |                            | 10055                 | 6,95                       |              |                            |
|                       |                            |                     |                            | 12965                 | 7,23                       |              |                            |
|                       |                            |                     |                            | 20120                 | 7,67                       |              |                            |
|                       |                            |                     |                            | 36380                 | 8,21                       |              |                            |
|                       |                            |                     |                            | 50480                 | 8,28                       |              |                            |
|                       |                            |                     |                            | 74540                 | 8,41                       |              |                            |



## ANNEXE II.1. - CINETIQUE DU GONFLEMENT

| ARGILE D'AIX-LES-BAINS |                            |                     |                            |                     |                            |                     |                            |
|------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|
| Ech : 6.1 ho : 55,34   |                            | Ech: 6.2 ho : 31,34 |                            | Ech: 6.3 ho : 28,89 |                            | Ech: 6.4 ho : 23,78 |                            |
| Temps (mn)             | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)          | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)          | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)          | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) |
| 0                      | 0                          | 0                   | 0                          | 0                   | 0                          | 0                   | 0                          |
| 1                      | 0,33                       | 1                   | 0,32                       | 1                   | 0,59                       | 1                   | 0,61                       |
| 2                      | 0,46                       | 2                   | 0,61                       | 2                   | 0,95                       | 2                   | 0,95                       |
| 5                      | 0,93                       | 5                   | 1,08                       | 5                   | 1,56                       | 5                   | 1,47                       |
| 10                     | 1,32                       | 10                  | 1,69                       | 10                  | 2,16                       | 10                  | 1,93                       |
| 20                     | 1,93                       | 20                  | 2,31                       | 20                  | 2,77                       | 20                  | 2,69                       |
| 32                     | 2,36                       | 34                  | 2,78                       | 30                  | 3,15                       | 30                  | 3,17                       |
| 47                     | 2,73                       | 44                  | 3,00                       | 40                  | 3,39                       | 54                  | 3,91                       |
| 67                     | 3,07                       | 69                  | 3,35                       | 65                  | 3,77                       | 79                  | 4,25                       |
| 97                     | 3,42                       | 94                  | 3,54                       | 95                  | 4,05                       | 99                  | 4,46                       |
| 112                    | 3,54                       | 124                 | 3,70                       | 162                 | 4,38                       | 119                 | 4,63                       |
| 179                    | 3,96                       | 191                 | 3,89                       | 250                 | 4,55                       | 199                 | 4,96                       |
| 267                    | 4,28                       | 279                 | 3,99                       | 470                 | 4,71                       | 329                 | 5,24                       |
| 442                    | 4,63                       | 499                 | 4,05                       | 1390                | 4,81                       | 509                 | 5,38                       |
| 1407                   | 5,07                       | 1419                | 4,12                       | 1910                | 4,83                       | 1409                | 5,57                       |
| 1927                   | 5,10                       | 1939                | 4,13                       | 5705                | 4,92                       | 1949                | 5,63                       |
| 5722                   | 5,30                       | 5734                | 4,24                       | 7685                | 4,93                       | 2859                | 5,70                       |
| 7447                   | 5,39                       | 7714                | 4,26                       | 10565               | 4,93                       | 7169                | 5,85                       |
| 10582                  | 5,44                       | 10054               | 4,26                       | 15785               | 5,11                       | 10049               | 5,91                       |
| 15982                  | 5,55                       | 15874               | 4,34                       |                     |                            | 20129               | 6,08                       |
|                        |                            |                     |                            |                     |                            | 30209               | 6,17                       |
|                        |                            |                     |                            |                     |                            | 37409               | 6,20                       |

## ANNEXE II.1. - CINETIQUE DU GONFLEMENT

| ARGILE D'AIX-<br>LES-BAINS |                            | ARGILE PLASTIQUE BARIOLEE |                            |                     |                            |                     |                            |
|----------------------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------|
| Ech : 6.5 ho : 46,13       |                            | Ech: 8.2 ho : 62,09       |                            | Ech: 8.3 ho : 50,18 |                            | Ech: 8.4 ho : 66,97 |                            |
| Temps (mn)                 | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)                | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)          | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) | Temps (mn)          | $\frac{\Delta h}{h_0}$ (%) |
| 0                          | 0                          | 0                         | 0                          | 0                   | 0                          | 0                   | 0                          |
| 1                          | 0,33                       | 1                         | 0,03                       | 1                   | 0,03                       | 13                  | 0,15                       |
| 2                          | 0,63                       | 2                         | 0,06                       | 2                   | 0,04                       | 20                  | 0,25                       |
| 5                          | 1,11                       | 5                         | 0,09                       | 5                   | 0,10                       | 35                  | 0,37                       |
| 10                         | 1,56                       | 12                        | 0,17                       | 15                  | 0,20                       | 61                  | 0,54                       |
| 20                         | 2,15                       | 17                        | 0,23                       | 24                  | 0,32                       | 96                  | 0,73                       |
| 30                         | 2,49                       | 28                        | 0,32                       | 34                  | 0,46                       | 156                 | 1,02                       |
| 40                         | 2,74                       | 47                        | 0,48                       | 49                  | 0,60                       | 236                 | 1,33                       |
| 64                         | 3,23                       | 75                        | 0,66                       | 86                  | 1,02                       | 351                 | 1,69                       |
| 86                         | 3,56                       | 117                       | 0,85                       | 104                 | 1,16                       | 506                 | 2,08                       |
| 124                        | 3,98                       | 161                       | 1,01                       | 148                 | 1,45                       | 1441                | 3,64                       |
| 184                        | 4,40                       | 246                       | 1,26                       | 233                 | 1,80                       | 1951                | 4,20                       |
| 289                        | 4,90                       | 322                       | 1,43                       | 309                 | 2,01                       | 5736                | 5,26                       |
| 394                        | 5,21                       | 472                       | 1,64                       | 459                 | 2,39                       | 7191                | 5,27                       |
| 529                        | 5,47                       | 1432                      | 2,52                       | 1419                | 3,41                       | 10056               | 5,29                       |
| 1439                       | 6,03                       | 1972                      | 2,70                       | 1959                | 3,73                       | 15846               | 5,44                       |
| 2014                       | 6,12                       | 3022                      | 2,84                       | 2874                | 3,94                       | 20151               | 5,45                       |
| 5754                       | 6,42                       | 4327                      | 2,92                       | 4314                | 4,09                       |                     |                            |
| 7729                       | 6,55                       | 10087                     | 2,99                       | 10059               | 4,17                       |                     |                            |
| 10069                      | 6,57                       | 14872                     | 3,09                       | 14379               | 4,23                       |                     |                            |
| 15829                      | 6,69                       |                           |                            |                     |                            |                     |                            |
| 20149                      | 6,69                       |                           |                            |                     |                            |                     |                            |
| 31669                      | 6,76                       |                           |                            |                     |                            |                     |                            |

ANNEXE II.1. - CINETIQUE DU GONFLEMENT

| ARGILE PLASTIQUE BARIOLEE |                           |                    |                           |            |                           |            |                           |
|---------------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|------------|---------------------------|------------|---------------------------|
| Ech : 8.5 ho : 41,35      |                           | Ech:8.6 ho.: 33,17 |                           | Ech: ho :  |                           | Ech: ho :  |                           |
| Temps (mn)                | $\frac{\Delta h}{ho}$ (%) | Temps (mn)         | $\frac{\Delta h}{ho}$ (%) | Temps (mn) | $\frac{\Delta h}{ho}$ (%) | Temps (mn) | $\frac{\Delta h}{ho}$ (%) |
| 0                         | 0                         | 0                  | 0                         |            |                           |            |                           |
| 7                         | 0,07                      | 1                  | 0,05                      |            |                           |            |                           |
| 120                       | 0,12                      | 2                  | 0,08                      |            |                           |            |                           |
| 255                       | 0,36                      | 5                  | 0,24                      |            |                           |            |                           |
| 335                       | 0,48                      | 10                 | 0,30                      |            |                           |            |                           |
| 475                       | 0,67                      | 21                 | 0,50                      |            |                           |            |                           |
| 1390                      | 1,37                      | 35                 | 0,75                      |            |                           |            |                           |
| 1915                      | 1,57                      | 49                 | 0,96                      |            |                           |            |                           |
| 2850                      | 1,75                      | 94                 | 1,49                      |            |                           |            |                           |
| 3112                      | 1,78                      | 130                | 1,87                      |            |                           |            |                           |
| 7145                      | 1,98                      | 178                | 2,32                      |            |                           |            |                           |
| 8600                      | 2,00                      | 275                | 3,01                      |            |                           |            |                           |
| 10040                     | 2,02                      | 373                | 3,51                      |            |                           |            |                           |
| 13445                     | 2,06                      | 420                | 3,74                      |            |                           |            |                           |
| 20105                     | 2,12                      | 1335               | 4,96                      |            |                           |            |                           |
|                           |                           | 1860               | 5,04                      |            |                           |            |                           |
|                           |                           | 2775               | 5,13                      |            |                           |            |                           |
|                           |                           | 3315               | 5,16                      |            |                           |            |                           |
|                           |                           | 4725               | 5,23                      |            |                           |            |                           |
|                           |                           | 6180               | 5,28                      |            |                           |            |                           |
|                           |                           | 10095              | 5,40                      |            |                           |            |                           |
|                           |                           | 13380              | 5,45                      |            |                           |            |                           |
|                           |                           | 33030              | 5,64                      |            |                           |            |                           |

## ANNEXE II.2. - PROPAGATION DU GONFLEMENT

| ESSAI N° 1  |                            |                            |                            |                            |                            | MATERIAU : ARGILE PLASTIQUE<br>(PROVINS) |                            |                            |                            |                     |
|-------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|
| échantillon | 1                          | 2                          | 3                          | 4                          | 5                          | 6                                        | 7                          | 8                          | 9                          | 10                  |
| (mm)        | 7,81                       | 26,87                      | 47,33                      | 68,14                      | 87,36                      | 107,48                                   | 126,92                     | 136,77                     | 147,07                     |                     |
| s (mm)      | $\Delta h$<br>( $10^2$ mm) | $\Delta h$<br>( $10^2$ mm) | $\Delta h$<br>( $10^2$ mm) | $\Delta h$<br>( $10^2$ mm) | $\Delta h$<br>( $10^2$ mm) | $\Delta h$<br>( $10^2$ mm)               | $\Delta h$<br>( $10^2$ mm) | $\Delta h$<br>( $10^2$ mm) | $\Delta h$<br>( $10^2$ mm) | $\Delta h$<br>( mm) |
| 0           | 0                          | 0                          | 0                          | 0                          | 0                          | 0                                        | 0                          | 0                          | 0                          |                     |
| 135         | 122                        | 142                        | 142                        | 142                        | 142                        | 142                                      | 142                        | 142                        | 142                        |                     |
| 255         | 134                        | 160                        | 160                        | 160                        | 160                        | 160                                      | 160                        | 160                        | 160                        |                     |
| 1180        | 117                        | 227                        | 227                        | 227                        | 227                        | 227                                      | 227                        | 227                        | 227                        |                     |
| 1680        | 134                        | 168                        | 168                        | 168                        | 168                        | 168                                      | 168                        | 168                        | 168                        |                     |
| 2325        | 130                        | 290                        | 307                        | 307                        | 307                        | 307                                      | 307                        | 307                        | 307                        |                     |
| 3775        | 130                        | 321                        | 353                        | 353                        | 353                        | 353                                      | 353                        | 353                        | 353                        |                     |
| 5185        | 130                        | 353                        | 393                        | 393                        | 393                        | 393                                      | 393                        | 393                        | 393                        |                     |
| 9505        | 130                        | 394                        | 451                        | 462                        | 462                        | 462                                      | 462                        | 462                        | 462                        |                     |
| 12385       | 130                        | 420                        | 483                        | 499                        | 499                        | 499                                      | 499                        | 499                        | 499                        |                     |
| 15265       | 149                        | 543                        | 704                        | 724                        | 744                        | 744                                      | 744                        | 744                        | 744                        |                     |
| 19585       | 174                        | 588                        | 779                        | 834                        | 869                        | 869                                      | 869                        | 869                        | 869                        |                     |
| 22465       | 174                        | 588                        | 804                        | 877                        | 929                        | 929                                      | 929                        | 929                        | 929                        |                     |
| 29915       | 179                        | 603                        | 834                        | 924                        | 1009                       | 1009                                     | 1009                       | 1009                       | 1009                       |                     |
| 32465       | 179                        | 608                        | 843                        | 933                        | 1024                       | 1024                                     | 1024                       | 1024                       | 1024                       |                     |
| 39665       | 179                        | 608                        | 843                        | 954                        | 1054                       | 1069                                     | 1069                       | 1069                       | 1069                       |                     |
| 49745       | 179                        | 608                        | 863                        | 980                        | 1106                       | 1117                                     | 1125                       | 1125                       | 1125                       |                     |
| 59825       | 179                        | 615                        | 863                        | 1000                       | 1146                       | 1159                                     | 1167                       | 1167                       | 1167                       |                     |
| 72785       | 179                        | 625                        | 892                        | 1030                       | 1196                       | 1211                                     | 1222                       | 1222                       | 1222                       |                     |

## ANNEXE II.2. - PROPAGATION DU GONFLEMENT

| ESSAI N° 2  |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      | MATERIAU : FAUSSES GLAISES           |                                      |                                      |                                      |                                      |
|-------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Échantillon | 1                                    | 2                                    | 3                                    | 4                                    | 5                                    | 6                                    | 7                                    | 8                                    | 9                                    | 10                                   |
| h (mm)      | 20,04                                | 39,43                                | 58,92                                | 78,61                                | 90,47                                |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| Δh (mm)     | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ |
| 0           | 0                                    | 0                                    | 0                                    | 0                                    | 0                                    |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 21          | 85                                   | 85                                   | 85                                   | 85                                   | 85                                   |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 76          | 265                                  | 265                                  | 265                                  | 265                                  | 265                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 166         | 377                                  | 397                                  | 397                                  | 397                                  | 397                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 286         | 407                                  | 462                                  | 467                                  | 467                                  | 467                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 511         | 418                                  | 522                                  | 541                                  | 541                                  | 541                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 1440        | 422                                  | 587                                  | 651                                  | 676                                  | 676                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 1940        | 429                                  | 602                                  | 690                                  | 724                                  | 724                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 5870        | 434                                  | 624                                  | 795                                  | 884                                  | 914                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 7200        | 438                                  | 631                                  | 806                                  | 905                                  | 949                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 8655        | 438                                  | 631                                  | 811                                  | 929                                  | 979                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 11805       | 444                                  | 640                                  | 820                                  | 957                                  | 1022                                 |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 15960       | 444                                  | 643                                  | 828                                  | 976                                  | 1050                                 |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 20550       | 444                                  | 643                                  | 837                                  | 994                                  | 1080                                 |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 38760       | 444                                  | 645                                  | 842                                  | 1000                                 | 1100                                 |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 66120       | 444                                  | 645                                  | 842                                  | 1005                                 | 1105                                 |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      |

## ANNEXE II.2. - PROPAGATION DU GONFLEMENT

| ESSAI N° 3      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    | MATERIAU : FAUSSES GLAISE          |                                    |                                    |                                    |
|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| -échan-<br>llon | 1                                  | 2                                  | 3                                  | 4                                  | 5                                  | 6                                  | 7                                  | 8                                  | 9                                  | 10                                 |
| (mm)            | 10,16                              | 19,26                              | 30,64                              | 42,77                              | 54,42                              | 64,92                              |                                    |                                    |                                    |                                    |
| s (mm)          | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) |
| 0               | 0                                  | 0                                  | 0                                  | 0                                  | 0                                  | 0                                  |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 20              | 63                                 | 63                                 | 63                                 | 63                                 | 63                                 | 63                                 |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 36              | 104                                | 104                                | 104                                | 104                                | 104                                | 104                                |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 57              | 139                                | 139                                | 139                                | 139                                | 139                                | 139                                |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 80              | 182                                | 185                                | 185                                | 185                                | 185                                | 185                                |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 107             | 224                                | 228                                | 228                                | 228                                | 228                                | 228                                |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 156             | 257                                | 266                                | 276                                | 276                                | 276                                | 276                                |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 206             | 289                                | 304                                | 314                                | 314                                | 314                                | 314                                |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 263             | 290                                | 348                                | 368                                | 368                                | 368                                | 368                                |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 324             | 298                                | 382                                | 410                                | 414                                | 414                                | 414                                |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 384             | 298                                | 385                                | 440                                | 450                                | 450                                | 450                                |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 506             | 300                                | 390                                | 485                                | 515                                | 515                                | 515                                |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 1410            | 300                                | 390                                | 508                                | 616                                | 666                                | 690                                |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 1950            | 310                                | 402                                | 522                                | 642                                | 709                                | 746                                |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 2850            | 310                                | 402                                | 522                                | 648                                | 730                                | 796                                |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 3390            | 310                                | 402                                | 522                                | 648                                | 735                                | 808                                |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 7170            | 310                                | 402                                | 522                                | 648                                | 748                                | 845                                |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 27330           | 310                                | 402                                | 522                                | 648                                | 748                                | 845                                |                                    |                                    |                                    |                                    |

## ANNEXE II.2. - PROPAGATION DU GONFLEMENT

[illegible]

## ANNEXE II.2. - PROPAGATION DU GONFLEMENT

| ESSAI N° 5  |                                    |                                    |                                    |                                    | MATERIAU : ARGILE VERTE DE MONTREUIL |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
|-------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| échantillon | 1                                  | 2                                  | 3                                  | 4                                  | 5                                    | 6                                  | 7                                  | 8                                  | 9                                  | 10                                 |
| (mm)        | 10,00                              | 24,35                              | 38,10                              | 46,80                              |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| s (mn)      | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm)   | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) |
| 0           | 0                                  | 0                                  | 0                                  | 0                                  |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 25          | 17                                 | 17                                 | 17                                 | 17                                 |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 80          | 35                                 | 35                                 | 35                                 | 35                                 |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 220         | 68                                 | 87                                 | 87                                 | 87                                 |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 360         | 81                                 | 104                                | 104                                | 104                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 1300        | 122                                | 210                                | 230                                | 230                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 1825        | 144                                | 247                                | 284                                | 284                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 5650        | 206                                | 426                                | 488                                | 508                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 8515        | 206                                | 438                                | 514                                | 540                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 11395       | 209                                | 465                                | 556                                | 587                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 15715       | 222                                | 488                                | 581                                | 612                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 20035       | 222                                | 491                                | 586                                | 622                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 26050       | 222                                | 491                                | 594                                | 634                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 28600       | 222                                | 491                                | 594                                | 634                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 35800       | 222                                | 491                                | 594                                | 634                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 45880       | 222                                | 491                                | 595                                | 640                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |



## ANNEXE II.2. - PROPAGATION DU GONFLEMENT

| ESSAI N° 6          |                                      |                                      |                                      |                                      |                                      | MATERIAU : ARGILE VERTE DE MONTREUIL |                                      |                                      |                                      |                                      |
|---------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| échantillon         | 1                                    | 2                                    | 3                                    | 4                                    | 5                                    | 6                                    | 7                                    | 8                                    | 9                                    | 10                                   |
| h <sub>0</sub> (mm) | 15,05                                | 29,55                                | 44,60                                | 59,05                                | 73,60                                | 81,70                                |                                      |                                      |                                      |                                      |
| temps (mn)          | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ |
| 0                   | 0                                    | 0                                    | 0                                    | 0                                    | 0                                    | 0                                    |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 80                  | 55                                   | 55                                   | 55                                   | 55                                   | 55                                   | 55                                   |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 160                 | 69                                   | 79                                   | 79                                   | 79                                   | 79                                   | 79                                   |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 1075                | 147                                  | 170                                  | 200                                  | 200                                  | 200                                  | 200                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 1585                | 160                                  | 195                                  | 235                                  | 235                                  | 235                                  | 235                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 2515                | 179                                  | 234                                  | 281                                  | 287                                  | 287                                  | 287                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 3010                | 184                                  | 246                                  | 298                                  | 309                                  | 309                                  | 309                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 6850                | 242                                  | 353                                  | 411                                  | 439                                  | 457                                  | 457                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 9775                | 252                                  | 360                                  | 466                                  | 489                                  | 504                                  | 512                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 16975               | 282                                  | 402                                  | 498                                  | 561                                  | 601                                  | 609                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 27055               | 289                                  | 419                                  | 525                                  | 598                                  | 658                                  | 666                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 31405               | 303                                  | 438                                  | 544                                  | 624                                  | 682                                  | 700                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 37150               | 302                                  | 438                                  | 546                                  | 629                                  | 689                                  | 719                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 42925               | 302                                  | 444                                  | 551                                  | 644                                  | 704                                  | 734                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |
| 50125               | 302                                  | 444                                  | 556                                  | 654                                  | 714                                  | 744                                  |                                      |                                      |                                      |                                      |

## ANNEXE II.2. - PROPAGATION DU GONFLEMENT

| ESSAI N° 7  |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    | MATERIAU : ARGILE VERTE DE MONTREUIL |                                    |                                    |                                    |                                    |
|-------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| échantillon | 1                                  | 2                                  | 3                                  | 4                                  | 5                                  | 6                                    | 7                                  | 8                                  | 9                                  | 10                                 |
| (mm)        | 13,96                              | 28,63                              | 43,86                              | 59,06                              | 69,58                              |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |
| h (mm)      | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm)   | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) |
| 0           | 0                                  | 0                                  | 0                                  | 0                                  | 0                                  |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 12          | 32                                 | 32                                 | 32                                 | 32                                 | 32                                 |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 65          | 55                                 | 55                                 | 55                                 | 55                                 | 55                                 |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 150         | 85                                 | 85                                 | 85                                 | 85                                 | 85                                 |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 245         | 100                                | 100                                | 100                                | 100                                | 100                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 355         | 132                                | 141                                | 141                                | 141                                | 141                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 1280        | 180                                | 210                                | 210                                | 210                                | 210                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 1745        | 187                                | 220                                | 230                                | 230                                | 230                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 5645        | 202                                | 250                                | 280                                | 290                                | 290                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 8480        | 202                                | 265                                | 305                                | 315                                | 315                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 11660       | 218                                | 281                                | 324                                | 342                                | 342                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 17120       | 273                                | 364                                | 419                                | 442                                | 442                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 21860       | 291                                | 373                                | 440                                | 465                                | 465                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 31820       | 300                                | 387                                | 462                                | 497                                | 497                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 58880       | 307                                | 396                                | 480                                | 520                                | 520                                |                                      |                                    |                                    |                                    |                                    |

## ANNEXE II.2. - PROPAGATION DU GONFLEMENT

| ESSAI N° 8           |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    | MATERIAU : ARGILE VERTE DE MONTREUIL |                                    |                                    |                                    |
|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| ous-échan-<br>tillon | 1                                  | 2                                  | 3                                  | 4                                  | 5                                  | 6                                  | 7                                    | 8                                  | 9                                  | 10                                 |
| o (mm)               | 13,54                              | 28,68                              | 43,31                              | 57,85                              | 72,88                              | 92,03                              |                                      |                                    |                                    |                                    |
| emps (mn)            | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm)   | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) |
| 0                    | 0                                  | 0                                  | 0                                  | 0                                  | 0                                  | 0                                  |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 14                   | 22                                 | 22                                 | 22                                 | 22                                 | 22                                 | 22                                 |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 49                   | 45                                 | 45                                 | 45                                 | 45                                 | 45                                 | 45                                 |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 128                  | 69                                 | 69                                 | 69                                 | 69                                 | 69                                 | 69                                 |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 240                  | 81                                 | 91                                 | 91                                 | 91                                 | 91                                 | 91                                 |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 369                  | 90                                 | 105                                | 105                                | 105                                | 105                                | 105                                |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 1320                 | 130                                | 175                                | 185                                | 190                                | 190                                | 190                                |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 1613                 | 138                                | 188                                | 201                                | 208                                | 208                                | 208                                |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 1860                 | 144                                | 198                                | 211                                | 220                                | 220                                | 220                                |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 2760                 | 162                                | 222                                | 241                                | 257                                | 257                                | 257                                |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 3300                 | 171                                | 235                                | 260                                | 283                                | 283                                | 283                                |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 4200                 | 185                                | 259                                | 293                                | 318                                | 318                                | 318                                |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 5640                 | 214                                | 301                                | 342                                | 369                                | 372                                | 372                                |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 9960                 | 229                                | 339                                | 397                                | 446                                | 454                                | 454                                |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 13380                | 234                                | 356                                | 422                                | 477                                | 496                                | 496                                |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 20040                | 245                                | 377                                | 458                                | 520                                | 545                                | 552                                |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 25800                | 245                                | 387                                | 473                                | 545                                | 570                                | 587                                |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 33480                | 245                                | 397                                | 487                                | 564                                | 589                                | 617                                |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 51720                | 255                                | 413                                | 512                                | 597                                | 624                                | 657                                |                                      |                                    |                                    |                                    |
| 66620                | 255                                | 413                                | 512                                | 602                                | 634                                | 672                                |                                      |                                    |                                    |                                    |

## ANNEXE II.2. - PROPAGATION DU GONFLEMENT

ESSAI N° 9

MATERIAU : MARNE BLEUE DE NOGENT

| s-échan-<br>illon | 1                                  | 2                                  | 3                                  | 4                                  | 5                                  | 6                                  | 7                                  | 8                                  | 9                                  | 10                                 |
|-------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| (mm)              | 15,22                              | 29,35                              | 44,20                              | 59,05                              | 70,48                              |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| ps (mm)           | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) | $\Delta h$<br>(10 <sup>2</sup> mm) |
| 0                 | 0                                  | 0                                  | 0                                  | 0                                  | 0                                  |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 20                | 40                                 | 40                                 | 40                                 | 40                                 | 40                                 |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 132               | 96                                 | 96                                 | 96                                 | 96                                 | 96                                 |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 262               | 156                                | 156                                | 156                                | 156                                | 156                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 477               | 210                                | 220                                | 220                                | 220                                | 220                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 1400              | 320                                | 370                                | 370                                | 370                                | 370                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 1645              | 333                                | 396                                | 396                                | 396                                | 396                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 1920              | 338                                | 419                                | 426                                | 426                                | 426                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 2845              | 363                                | 479                                | 496                                | 503                                | 503                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 3355              | 378                                | 514                                | 533                                | 545                                | 545                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 7165              | 390                                | 565                                | 610                                | 650                                | 660                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 8830              | 396                                | 585                                | 640                                | 689                                | 703                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 13180             | 408                                | 614                                | 684                                | 748                                | 775                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 17260             | 408                                | 623                                | 693                                | 779                                | 813                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 23410             | 419                                | 652                                | 731                                | 822                                | 862                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 30280             | 419                                | 652                                | 741                                | 835                                | 882                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 47500             | 419                                | 659                                | 756                                | 855                                | 902                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 57530             | 419                                | 659                                | 756                                | 860                                | 912                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |
| 62000             |                                    | 659                                | 756                                | 860                                | 912                                |                                    |                                    |                                    |                                    |                                    |

## ANNEXE II.2. - PROPAGATION DU GONFLEMENT

| ESSAI N° 10           |                                      |                                      |                                      |                                      | MATERIAU : MARNE BLEUE DE NOGEN  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
|-----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| sous-échan-<br>tillon | 1                                    | 2                                    | 3                                    | 4                                    | 5                                | 6                                | 7                                | 8                                | 9                                | 10                               |
| h <sub>0</sub> (mm)   | 9,58                                 | 24,01                                | 38,86                                | 49,61                                |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| Temps (mn)            | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10^2 \text{ mm})}$ | $\frac{\Delta h}{(10 \text{ })}$ | $\frac{\Delta h}{(10 \text{ })}$ | $\frac{\Delta h}{(10 \text{ })}$ | $\frac{\Delta h}{(10 \text{ })}$ | $\frac{\Delta h}{(10 \text{ })}$ | $\frac{\Delta h}{(10 \text{ })}$ |
| 0                     | 0                                    | 0                                    | 0                                    | 0                                    |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 5                     | 42                                   | 42                                   | 42                                   | 42                                   |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 22                    | 62                                   | 62                                   | 62                                   | 62                                   |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 46                    | 79                                   | 79                                   | 79                                   | 79                                   |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 66                    | 95                                   | 95                                   | 95                                   | 95                                   |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 106                   | 118                                  | 118                                  | 118                                  | 118                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 171                   | 136                                  | 145                                  | 145                                  | 145                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 238                   | 153                                  | 165                                  | 165                                  | 165                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 291                   | 156                                  | 173                                  | 173                                  | 173                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 511                   | 178                                  | 210                                  | 210                                  | 210                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 1431                  | 231                                  | 297                                  | 312                                  | 320                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 1716                  | 248                                  | 327                                  | 342                                  | 350                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 2856                  | 258                                  | 369                                  | 402                                  | 420                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 3381                  | 263                                  | 392                                  | 430                                  | 450                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 7186                  | 285                                  | 463                                  | 530                                  | 570                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 10365                 | 286                                  | 473                                  | 548                                  | 588                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 19140                 | 286                                  | 473                                  | 548                                  | 593                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |
| 27750                 | 286                                  | 473                                  | 553                                  | 603                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |                                  |

## ANNEXE II.3. - INFLUENCE DES CONTRAINTES

| ARGILE VERTE DE VILLEJUIF |                             |                   |                             |                   |                             |                   |                             |
|---------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| Ech: 1 ho:22,30           |                             | Ech: 2 ho:22,45   |                             | Ech: 3 ho: 22,32  |                             | Ech: 4 ho: 22,27  |                             |
| $\sigma_i = 10,4$         | $\sigma'_f = 9,1$           | $\sigma_i = 10,4$ | $\sigma'_f = 7,8$           | $\sigma_i = 10,4$ | $\sigma'_f = 5,2$           | $\sigma_i = 10,4$ | $\sigma'_f = 2,6$           |
| Temps(mn)                 | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)         | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)         | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)         | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ |
| 0                         | 0                           | 0                 | 0                           | 0                 | 0                           | 0                 | 0                           |
| 1000                      | 0                           | 2                 | 0,07                        | 1                 | 0,17                        | 2                 | 0,46                        |
|                           |                             | 10                | 0,11                        | 2                 | 0,24                        | 5                 | 0,68                        |
|                           |                             | 20                | 0,14                        | 4                 | 0,28                        | 11                | 0,94                        |
|                           |                             | 50                | 0,18                        | 10                | 0,39                        | 23                | 1,22                        |
|                           |                             | 96                | 0,20                        | 20                | 0,57                        | 31                | 1,33                        |
|                           |                             | 207               | 0,23                        | 30                | 0,63                        | 51                | 1,57                        |
|                           |                             | 932               | 0,23                        | 50                | 0,72                        | 66                | 1,66                        |
|                           |                             | 2785              | 0,23                        | 78                | 0,78                        | 94                | 1,85                        |
|                           |                             |                   |                             | 154               | 0,87                        | 129               | 1,98                        |
|                           |                             |                   |                             | 275               | 0,94                        | 236               | 2,18                        |
|                           |                             |                   |                             | 403               | 0,98                        | 386               | 2,29                        |
|                           |                             |                   |                             | 535               | 1,02                        | 599               | 2,35                        |
|                           |                             |                   |                             | 932               | 1,07                        | 906               | 2,42                        |
|                           |                             |                   |                             | 1406              | 1,09                        | 1417              | 2,48                        |
|                           |                             |                   |                             | 2305              | 1,13                        | 2159              | 2,57                        |
|                           |                             |                   |                             | 3251              | 1,15                        | 2980              | 2,64                        |
|                           |                             |                   |                             |                   |                             | 4191              | 2,70                        |
|                           |                             |                   |                             |                   |                             | 6959              | 2,77                        |

## ANNEXE II.3. - INFLUENCE DES CONTRAINTES

| ARGILE VERTE DE VILLEJUIF |                             |                   |                             |                   |                             |                  |                             |
|---------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| Ech: 5 ho: 23,04          |                             | Ech: 6 ho: 22,80  |                             | Ech: 7 ho: 22,95  |                             | Ech: 8 ho: 23,11 |                             |
| $\sigma_i = 10,4$         | $\sigma'_f = 2,60$          | $\sigma_i = 10,4$ | $\sigma'_f = 0,65$          | $\sigma_i = 10,4$ | $\sigma'_f = 0,03$          | $\sigma_i = 5,2$ | $\sigma'_f = 0,03$          |
| Temps(mn)                 | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)         | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)         | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)        | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ |
| 0                         | 0                           | 0                 | 0                           | 0                 | 0                           | 0                | 0                           |
| 2                         | 0,49                        | 2                 | 0,74                        | 1                 | 0,85                        | 1                | 0,57                        |
| 5                         | 0,75                        | 5                 | 1,15                        | 3                 | 1,14                        | 2                | 0,71                        |
| 10                        | 1,02                        | 12                | 1,68                        | 5                 | 1,44                        | 5                | 1,05                        |
| 21                        | 1,35                        | 22                | 2,15                        | 9                 | 1,82                        | 11               | 1,47                        |
| 33                        | 1,62                        | 36                | 2,59                        | 21                | 2,50                        | 19               | 1,76                        |
| 41                        | 1,75                        | 48                | 2,86                        | 31                | 2,90                        | 28               | 2,10                        |
| 51                        | 1,90                        | 55                | 3,00                        | 46                | 3,34                        | 45               | 2,44                        |
| 97                        | 2,37                        | 78                | 3,39                        | 66                | 3,81                        | 60               | 2,81                        |
| 126                       | 2,55                        | 109               | 3,77                        | 96                | 4,29                        | 100              | 3,40                        |
| 219                       | 2,92                        | 165               | 4,27                        | 120               | 4,59                        | 148              | 3,93                        |
| 411                       | 3,26                        | 267               | 4,80                        | 178               | 5,20                        | 189              | 4,22                        |
| 825                       | 3,41                        | 412               | 5,21                        | 269               | 5,86                        | 309              | 4,94                        |
| 1425                      | 3,52                        | 699               | 5,53                        | 380               | 6,41                        | 525              | 5,67                        |
| 1905                      | 3,54                        | 1000              | 5,65                        | 571               | 7,02                        | 993              | 6,60                        |
| 3375                      | 3,61                        | 2203              | 5,83                        | 775               | 7,53                        | 1423             | 7,04                        |
| 7065                      | 3,63                        | 3107              | 5,89                        | 1082              | 8,00                        | 2348             | 7,54                        |
|                           |                             | 4772              | 5,98                        | 1971              | 8,69                        | 3579             | 7,79                        |
|                           |                             |                   |                             | 3766              | 9,22                        | 4441             | 7,90                        |
|                           |                             |                   |                             | 10566             | 9,48                        | 5847             | 8,02                        |
|                           |                             |                   |                             |                   |                             | 10079            | 8,13                        |

## ANNEXE II.3. - INFLUENCE DES CONTRAINTES

| ARGILE VERTE DE VILLEJUIF |                             |                    |                             |                     |                             |                     |                             |
|---------------------------|-----------------------------|--------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|---------------------|-----------------------------|
| Ech: 9.1 ho: 23,34        |                             | Ech: 9.2 ho: 23,15 |                             | Ech: 10.1 ho: 23,46 |                             | Ech: 10.2 ho: 23,99 |                             |
| $\sigma_i = 2,6$          | $\sigma'_f = 0,03$          | $\sigma_i = 2,6$   | $\sigma'_f = 0,03$          | $\sigma_i = 1,30$   | $\sigma'_f = 0,03$          | $\sigma_i = 1,3$    | $\sigma'_f = 0,03$          |
| Temps(mn)                 | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)          | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)           | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)           | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ |
| 0                         | 0                           | 0                  | 0                           | 0                   | 0                           | 0                   | 0                           |
| 2                         | 0,70                        | 2                  | 0,38                        | 2                   | 0,34                        | 2                   | 0,19                        |
| 5                         | 0,90                        | 6                  | 0,75                        | 4                   | 0,46                        | 4                   | 0,30                        |
| 11                        | 0,96                        | 11                 | 0,96                        | 9                   | 0,63                        | 10                  | 0,45                        |
| 20                        | 1,33                        | 19                 | 1,22                        | 21                  | 0,83                        | 20                  | 0,64                        |
| 30                        | 1,42                        | 31                 | 1,49                        | 37                  | 1,06                        | 30                  | 0,77                        |
| 40                        | 1,49                        | 40                 | 1,66                        | 52                  | 1,20                        | 40                  | 0,85                        |
| 52                        | 1,68                        | 59                 | 1,99                        | 77                  | 1,43                        | 51                  | 0,96                        |
| 85                        | 1,97                        | 70                 | 2,14                        | 103                 | 1,63                        | 85                  | 1,23                        |
| 109                       | 2,12                        | 100                | 2,50                        | 156                 | 1,97                        | 124                 | 1,49                        |
| 158                       | 2,49                        | 163                | 3,08                        | 182                 | 2,09                        | 173                 | 1,74                        |
| 206                       | 2,78                        | 214                | 3,44                        | 222                 | 2,29                        | 282                 | 2,17                        |
| 317                       | 3,30                        | 313                | 4,01                        | 338                 | 2,75                        | 401                 | 2,55                        |
| 577                       | 4,09                        | 578                | 5,01                        | 496                 | 3,29                        | 508                 | 2,87                        |
| 761                       | 4,39                        | 732                | 5,39                        | 641                 | 3,52                        | 706                 | 3,30                        |
| 1067                      | 4,77                        | 988                | 5,89                        | 1006                | 4,01                        | 906                 | 3,68                        |
| 2110                      | 5,31                        | 1347               | 6,42                        | 2393                | 4,81                        | 1106                | 3,96                        |
| 3395                      | 5,55                        | 2264               | 7,15                        | 3245                | 5,03                        | 2247                | 5,00                        |
| 5843                      | 5,68                        | 3704               | 7,63                        | 4161                | 5,09                        | 3320                | 5,44                        |
|                           |                             | 5009               | 7,93                        |                     |                             | 8600                | 5,68                        |
|                           |                             | 7369               | 8,09                        |                     |                             | 10280               | 5,85                        |
|                           |                             | 11864              | 8,22                        |                     |                             |                     |                             |



## ANNEXE II.3. - INFLUENCE DES CONTRAINTES

| ARGILE VERTE DE VILLEJUIF |                             |                   |                             |                   |                             |                   |                             |
|---------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| Ech: 11 ho: 24,32         |                             | Ech: 12 ho: 22,22 |                             | Ech: 13 ho: 22,30 |                             | Ech: 14 ho: 22,44 |                             |
| $\sigma_i = 0,65$         | $\sigma'_f = 0,03$          | $\sigma_i = 9,1$  | $\sigma'_f = 7,8$           | $\sigma_i = 7,8$  | $\sigma'_f = 6,5$           | $\sigma_i = 6,5$  | $\sigma'_f = 5,2$           |
| Temps(mn)                 | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)         | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)         | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)         | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ |
| 0                         | 0                           | 0                 | 0                           | 0                 | 0                           | 0                 | 0                           |
| 2                         | 0,11                        | 4                 | 0,06                        | 1                 | 0,12                        | 1                 | 0,06                        |
| 5                         | 0,19                        | 5                 | 0,09                        | 5                 | 0,15                        | 2                 | 0,09                        |
| 11                        | 0,30                        | 11                | 0,09                        | 14                | 0,18                        | 8                 | 0,12                        |
| 25                        | 0,47                        | 18                | 0,12                        | 48                | 0,21                        | 10                | 0,15                        |
| 44                        | 0,63                        | 45                | 0,12                        | 151               | 0,24                        | 25                | 0,18                        |
| 60                        | 0,75                        |                   |                             | 574               | 0,27                        | 63                | 0,21                        |
| 106                       | 1,02                        |                   |                             | 814               | 0,30                        | 88                | 0,24                        |
| 144                       | 1,19                        |                   |                             |                   |                             | 139               | 0,27                        |
| 241                       | 1,57                        |                   |                             |                   |                             | 241               | 0,30                        |
| 357                       | 1,93                        |                   |                             |                   |                             | 432               | 0,33                        |
| 464                       | 2,18                        |                   |                             |                   |                             | 1476              | 0,36                        |
| 594                       | 2,46                        |                   |                             |                   |                             |                   |                             |
| 745                       | 2,73                        |                   |                             |                   |                             |                   |                             |
| 946                       | 3,01                        |                   |                             |                   |                             |                   |                             |
| 1482                      | 3,53                        |                   |                             |                   |                             |                   |                             |
| 2147                      | 3,89                        |                   |                             |                   |                             |                   |                             |
| 2848                      | 4,14                        |                   |                             |                   |                             |                   |                             |
| 3942                      | 4,39                        |                   |                             |                   |                             |                   |                             |
| 5747                      | 4,55                        |                   |                             |                   |                             |                   |                             |
| 10071                     | 4,88                        |                   |                             |                   |                             |                   |                             |

## ANNEXE II.3. - INFLUENCE DES CONTRAINTES

| ARGILE VERTE DE VILLEJUIF |                             |                   |                             |                   |                             |                   |                             |
|---------------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| Ech: 15 ho: 22,60         |                             | Ech: 16 ho: 22,80 |                             | Ech: 17 ho: 23,07 |                             | Ech: 18 ho: 22,62 |                             |
| $\sigma_i = 5,2$          | $\sigma'_f = 3,9$           | $\sigma_i = 3,9$  | $\sigma'_f = 2,6$           | $\sigma_i = 2,6$  | $\sigma'_f = 1,3$           | $\sigma_i = 7,8$  | $\sigma'_f = 5,2$           |
| Temps(mn)                 | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)         | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)         | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)         | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ |
| 0                         | 0                           | 0                 | 0                           | 0                 | 0                           | 0                 | 0                           |
| 2                         | 0,03                        | 2                 | 0,06                        | 2                 | 0,17                        | 2                 | 0,09                        |
| 5                         | 0,09                        | 5                 | 0,12                        | 5                 | 0,23                        | 5                 | 0,14                        |
| 8                         | 0,12                        | 11                | 0,18                        | 11                | 0,32                        | 9                 | 0,16                        |
| 14                        | 0,15                        | 21                | 0,24                        | 18                | 0,38                        | 15                | 0,20                        |
| 21                        | 0,18                        | 31                | 0,26                        | 28                | 0,44                        | 28                | 0,25                        |
| 33                        | 0,21                        | 46                | 0,32                        | 33                | 0,47                        | 55                | 0,29                        |
| 44                        | 0,24                        | 60                | 0,35                        | 88                | 0,64                        | 80                | 0,34                        |
| 64                        | 0,27                        | 103               | 0,41                        | 101               | 0,70                        | 106               | 0,36                        |
| 144                       | 0,30                        | 153               | 0,47                        | 141               | 0,79                        | 157               | 0,38                        |
| 203                       | 0,33                        | 213               | 0,50                        | 221               | 0,90                        | 257               | 0,41                        |
| 371                       | 0,36                        | 306               | 0,53                        | 342               | 0,99                        | 485               | 0,43                        |
| 575                       | 0,39                        | 473               | 0,59                        | 502               | 1,05                        | 855               | 0,45                        |
| 830                       | 0,42                        | 1073              | 0,65                        | 862               | 1,11                        | 1615              | 0,47                        |
| 1390                      | 0,45                        | 1557              | 0,68                        | 1381              | 1,19                        |                   |                             |
| 3679                      | 0,48                        | 1913              | 0,71                        | 1981              | 1,22                        |                   |                             |
| 4187                      | 0,48                        | 2753              | 0,74                        |                   |                             |                   |                             |
|                           |                             | 3293              | 0,77                        |                   |                             |                   |                             |

## ANNEXE II.3. - INFLUENCE DES CONTRAINTES

| ARGILE VERTE DE VILLEJUIF |                             |              |                             |              |                             |              |                             |
|---------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|
| Ech: 19 ho: 22,86         |                             | Ech: ho:     |                             | Ech: ho:     |                             | Ech: ho:     |                             |
| $\sigma_i = 5,2$          | $\sigma'f = 2,6$            | $\sigma_i =$ | $\sigma'f =$                | $\sigma_i =$ | $\sigma'f =$                | $\sigma_i =$ | $\sigma'f =$                |
| Temps(mn)                 | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)    | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)    | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)    | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ |
| 0                         | 0                           |              |                             |              |                             |              |                             |
| 2                         | 0,16                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 4                         | 0,20                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 9                         | 0,29                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 18                        | 0,38                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 26                        | 0,42                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 33                        | 0,47                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 41                        | 0,51                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 53                        | 0,56                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 69                        | 0,62                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 89                        | 0,67                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 120                       | 0,71                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 147                       | 0,76                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 214                       | 0,80                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 336                       | 0,87                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 594                       | 0,92                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 1034                      | 0,96                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 2332                      | 1,00                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 3172                      | 1,03                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 3532                      | 1,05                        |              |                             |              |                             |              |                             |

## ANNEXE II.3. - INFLUENCE DES CONTRAINTES

| ARGILE PLASTIQUE BARIOLEE |                             |                  |                             |                  |                             |                  |                             |
|---------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| Ech: 1 ho: 31,25          |                             | Ech:2 ho: 31,80  |                             | Ech: 3 ho: 32,35 |                             | Ech: 4 ho: 32,83 |                             |
| $\sigma_i = 10,4$         | $\sigma'_f = 5,2$           | $\sigma_i = 5,2$ | $\sigma'_f = 2,6$           | $\sigma_i = 2,6$ | $\sigma'_f = 1,3$           | $\sigma_i = 1,3$ | $\sigma'_f = 0,65$          |
| Temps(mn)                 | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)        | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)        | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)        | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ |
| 0                         | 0                           | 0                | 0                           | 0                | 0                           | 0                | 0                           |
| 1                         | 0,2                         | 1                | 0,13                        | 1                | 0,06                        | 1                | 0,03                        |
| 2                         | 0,22                        | 2                | 0,16                        | 2                | 0,08                        | 2                | 0,05                        |
| 5                         | 0,30                        | 5                | 0,20                        | 5                | 0,10                        | 5                | 0,06                        |
| 10                        | 0,35                        | 13               | 0,25                        | 22               | 0,17                        | 10               | 0,08                        |
| 15                        | 0,38                        | 20               | 0,30                        | 58               | 0,26                        | 22               | 0,10                        |
| 51                        | 0,54                        | 32               | 0,35                        | 145              | 0,37                        | 33               | 0,12                        |
| 84                        | 0,62                        | 43               | 0,38                        | 378              | 0,56                        | 146              | 0,24                        |
| 107                       | 0,67                        | 59               | 0,42                        | 1385             | 0,94                        | 216              | 0,29                        |
| 181                       | 0,78                        | 103              | 0,50                        | 1865             | 1,04                        | 396              | 0,39                        |
| 236                       | 0,83                        | 198              | 0,64                        | 2825             | 1,13                        | 456              | 0,41                        |
| 1149                      | 1,15                        | 273              | 0,72                        | 3365             | 1,17                        | 1386             | 0,67                        |
| 1514                      | 1,18                        | 408              | 0,85                        | 4775             | 1,21                        | 1876             | 0,78                        |
| 5454                      | 1,23                        | 518              | 0,93                        | 6005             | 1,24                        | 2786             | 0,87                        |
| 6894                      | 1,23                        | 1438             | 1,21                        | 11480            | 1,30                        | 3311             | 0,91                        |
|                           |                             | 1963             | 1,29                        |                  |                             | 4226             | 0,94                        |
|                           |                             | 2863             | 1,32                        |                  |                             | 8666             | 1,04                        |
|                           |                             | 3403             | 1,35                        |                  |                             |                  |                             |
|                           |                             | 4333             | 1,38                        |                  |                             |                  |                             |
|                           |                             | 8683             | 1,41                        |                  |                             |                  |                             |

## ANNEXE II.3. - INFLUENCE DES CONTRAINTES

| FAUSSES GLAISES  |                             |                  |                             |                  |                             |                   |                             |
|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|-------------------|-----------------------------|
| Ech: 1 ho: 22,56 |                             | Ech: 2 ho: 22,90 |                             | Ech: 3 ho: 23,39 |                             | Ech: 4 ho: 23,76  |                             |
| $\sigma_i = 6,5$ | $\sigma'_f = 3,9$           | $\sigma_i = 3,9$ | $\sigma'_f = 1,3$           | $\sigma_i = 1,3$ | $\sigma'_f = 0,65$          | $\sigma_i = 0,65$ | $\sigma'_f = 0,03$          |
| Temps(mn)        | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)        | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)        | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)         | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ |
| 0                | 0                           | 0                | 0                           | 0                | 0                           | 0                 | 0                           |
| 1                | 0,11                        | 1                | 0,10                        | 1                | 0,06                        | 1                 | 0,13                        |
| 2                | 0,15                        | 2                | 0,15                        | 2                | 0,06                        | 2                 | 0,17                        |
| 5                | 0,20                        | 5                | 0,24                        | 5                | 0,10                        | 5                 | 0,25                        |
| 10               | 0,24                        | 10               | 0,33                        | 10               | 0,13                        | 11                | 0,36                        |
| 21               | 0,31                        | 18               | 0,42                        | 15               | 0,15                        | 24                | 0,51                        |
| 41               | 0,40                        | 34               | 0,56                        | 40               | 0,23                        | 34                | 0,61                        |
| 61               | 0,44                        | 59               | 0,71                        | 75               | 0,30                        | 52                | 0,74                        |
| 102              | 0,52                        | 75               | 0,79                        | 152              | 0,41                        | 72                | 0,86                        |
| 159              | 0,57                        | 117              | 0,94                        | 236              | 0,49                        | 91                | 0,95                        |
| 249              | 0,61                        | 172              | 1,09                        | 382              | 0,60                        | 137               | 1,22                        |
| 339              | 0,63                        | 219              | 1,22                        | 512              | 0,66                        | 189               | 1,45                        |
| 504              | 0,66                        | 312              | 1,37                        | 1412             | 0,86                        | 294               | 1,85                        |
| 1474             | 0,69                        | 467              | 1,51                        | 1862             | 0,94                        | 387               | 2,27                        |
| 1599             | 0,70                        | 1342             | 1,73                        | 3393             | 1,00                        | 494               | 2,65                        |
| 1839             | 0,71                        | 1912             | 1,78                        | 4577             | 1,07                        | 1434              | 3,56                        |
| 2874             | 0,72                        | 3322             | 1,83                        | 9182             | 1,12                        | 1974              | 3,65                        |
| 4464             | 0,73                        | 4742             | 1,89                        |                  |                             | 2874              | 3,75                        |
|                  |                             | 9082             | 1,95                        |                  |                             | 7194              | 3,96                        |

## ANNEXE II.3. - INFLUENCE DES CONTRAINTES

| ARGILE D'AIX-LES-BAINS |                             |                  |                             |                  |                             |                  |                             |
|------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|------------------|-----------------------------|
| Ech: 1 ho: 51,24       |                             | Ech: 2 ho: 51,64 |                             | Ech: 3 ho: 52,07 |                             | Ech: 4 ho: 52,56 |                             |
| $\sigma_i = 10,4$      | $\sigma'_f = 5,2$           | $\sigma_i = 5,2$ | $\sigma'_f = 2,6$           | $\sigma_i = 2,6$ | $\sigma'_f = 1,3$           | $\sigma_i = 1,3$ | $\sigma'_f = 0,65$          |
| Temps(mn)              | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)        | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)        | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)        | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ |
| 0                      | 0                           | 0                | 0                           | 0                | 0                           | 0                | 0                           |
| 1                      | 0,14                        | 2                | 0,19                        | 1                | 0,12                        | 1                | 0,10                        |
| 2                      | 0,19                        | 5                | 0,31                        | 2                | 0,19                        | 2                | 0,15                        |
| 5                      | 0,25                        | 10               | 0,35                        | 5                | 0,31                        | 5                | 0,25                        |
| 10                     | 0,28                        | 36               | 0,42                        | 10               | 0,42                        | 10               | 0,35                        |
| 20                     | 0,31                        | 56               | 0,43                        | 18               | 0,47                        | 18               | 0,46                        |
| 30                     | 0,33                        | 86               | 0,45                        | 30               | 0,55                        | 34               | 0,58                        |
| 80                     | 0,35                        | 114              | 0,45                        | 41               | 0,58                        | 66               | 0,67                        |
| 130                    | 0,37                        | 206              | 0,47                        | 68               | 0,61                        | 100              | 0,70                        |
| 180                    | 0,40                        | 306              | 0,48                        | 88               | 0,62                        | 173              | 0,74                        |
| 265                    | 0,41                        | 471              | 0,49                        | 168              | 0,65                        | 398              | 0,78                        |
| 360                    | 0,42                        | 1421             | 0,53                        | 208              | 0,65                        | 508              | 0,79                        |
| 485                    | 0,43                        | 2871             | 0,56                        | 263              | 0,66                        | 1453             | 0,84                        |
| 1415                   | 0,45                        | 4301             | 0,58                        | 353              | 0,67                        | 2888             | 0,89                        |
| 2010                   | 0,48                        | 5741             | 0,58                        | 488              | 0,69                        | 4318             | 0,91                        |
| 3375                   | 0,48                        | 12041            | 0,58                        | 1403             | 0,72                        | 8628             | 0,93                        |
| 7170                   | 0,48                        |                  |                             | 2838             | 0,74                        |                  |                             |
| 8610                   | 0,48                        |                  |                             | 7238             | 0,78                        |                  |                             |
|                        |                             |                  |                             | 8598             | 0,79                        |                  |                             |

## ANNEXE II.3. - INFLUENCE DES CONTRAINTES

| MORAINE D'AIX-LES-BAINS |                             |              |                             |              |                             |              |                             |
|-------------------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|--------------|-----------------------------|
| Ech: 5    ho: 54,83     |                             | Ech:    ho:  |                             | Ech:    ho:  |                             | Ech:    ho:  |                             |
| $\sigma_i =$            | $\sigma'f =$                | $\sigma_i =$ | $\sigma'f =$                | $\sigma_i =$ | $\sigma'f =$                | $\sigma_i =$ | $\sigma'f =$                |
| Temps(mn)               | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)    | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)    | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ | Temps(mn)    | $\frac{\Delta h}{h_0} (\%)$ |
| 0                       | 0                           |              |                             |              |                             |              |                             |
| 1                       | 0,22                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 2                       | 0,38                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 5                       | 0,64                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 10                      | 0,93                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 22                      | 1,41                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 55                      | 2,17                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 72                      | 2,43                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 107                     | 2,84                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 147                     | 3,18                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 247                     | 3,59                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 357                     | 3,94                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 472                     | 4,52                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 1412                    | 4,85                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 1917                    | 4,94                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 2862                    | 5,03                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 4347                    | 5,06                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 10572                   | 5,12                        |              |                             |              |                             |              |                             |
| 13467                   | 5,13                        |              |                             |              |                             |              |                             |