

50376  
1992  
169

62 193

50376  
1992  
169  
n°ordre : 892

## THESE DE DOCTORAT

Présentée à  
l'Université des Sciences et Technologies de Lille

Spécialité  
GENIE CIVIL

TITRE  
ETUDE EN LABORATOIRE DU GONFLEMENT  
DE L'ARGILE DES FLANDRES

par

Saïd KHADDAJ



Soutenue le 13 Avril 1992 devant le jury composé de :

MM. I. SHAHROUR	Ecole centrale de Lille	Président
J.P. TISOT	ENSG Nancy	Rapporteur
J.P. HENRY	USTL	Rapporteur
H. DI-BENEDETTO	ENTPE	
B. FELIX	CEA	
L. LANCELOT	USTL	
C. FAURE	DDE-GAP	

## AVANT-PROPOS

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au Département Sols-Structures du Laboratoire de Mécanique de Lille. A ce titre, qu'il me soit permis de remercier son responsable Monsieur I. SHAHROUR, Professeur à l'Ecole Centrale de Lille, sans qui ce travail n'aurait pu voir le jour. Il a assuré, avec efficacité et grande patience, la direction de ce travail jusqu'à son terme, et il a pris le temps de me faire profiter de son expérience et de ses connaissances. Il m'a fait également l'honneur d'accepter la présidence du jury, je lui suis profondément reconnaissant.

Monsieur J.P. HENRY, Professeur à l'Ecole Universitaire d'Ingénieurs de Lille, a accepté de participer au jury et d'en être rapporteur. Qu'il trouve ici l'expression de ma grande gratitude.

Monsieur J.P. TISOT, Professeur à l'ENSG de Nancy, a accepté d'être rapporteur de ce travail et m'a fait profiter de sa grande expérience. Je lui en suis très reconnaissant.

Monsieur L. LANCELOT Maître de conférences à l'Université des Sciences et Techniques de Lille, a participé activement à la réalisation de ce travail. Je tiens à lui témoigner mes remerciements les plus sincères.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur C. FAURE, Ingénieur à la DDE de GAP, qui a été à l'origine de ce travail.

Je remercie également Monsieur B. FELIX, Ingénieur de recherche au CEA, pour sa participation au jury et pour ses précieuses remarques.

Je tiens également à remercier Monsieur DI-BENEDETTO, directeur du Laboratoire des Géomatériaux de l'ENTPE, d'avoir accepté de participer à ce jury.

Ces remerciements ne sauraient être complets si je n'y incluais pas tous ceux, collègues et amis, qui m'ont apporté leur soutien au cours de ces années de travail. Je citerai en particulier W. Chehde, H. Hocini, F. Eiselt, B. Bencheikh, E. Pruchnicki pour leur aide.

## Avant-propos

---

Je tiens également à remercier mon épouse Amal pour avoir assuré la frappe de ce mémoire.

Qu'il me soit permis enfin d'adresser une pensée particulière à ma famille, pour son affection et sa patience.

---

## SOMMAIRE

---

RESUME .....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCTION GENERALE .....	3

### CHAPITRE I :

#### *Analyse du phénomène du gonflement et méthodes d'étude en laboratoire*

I.1- Phénomène du gonflement .....	7
I.1.1- Origine du gonflement .....	7
I.1.2- Rôle des cations échangés dans le gonflement .....	8
I.1.3- Gonflement au niveau de la paillette .....	13
I.1.4- Relation entre le gonflement et la succion des sols .....	16
I.2- Etude en laboratoire du gonflement .....	18
I.2.1- Paramètres caractéristiques du gonflement .....	18
I.2.2- Méthodes de détermination de la pression de gonflement.....	21
I.3- Facteurs influençant le gonflement des sols argileux .....	28
I.3.1- Composition et nature minéralogiques .....	28
I.3.2- La composition physio-chimique .....	29
I.3.3- La nature de la structure interne de l'argile .....	29
I.3.4- La densité et la teneur en eau .....	30
I.3.5- Le mode et l' énergie de compactage .....	30
I.3.6- La pression extérieure appliquée .....	30
I.4- Classement des sols gonflants .....	32

## CHAPITRE II :

### *Caractérisation de l'argile des Flandres*

II.1- Introduction .....	36
II.2- Données géologiques .....	36
II.3- Composition chimique .....	37
II.4- Caractéristiques géotechniques .....	39
II.5- Composition minéralogique .....	41
II.6- Essais de gonflement libre .....	42
II.7- Essais de cisaillement .....	43

## CHAPITRE III :

### *Etude à l'œdomètre*

III.1- Matériels d'essais .....	47
III.2- Mode opératoire .....	49
III.2.1- Préparation de l'échantillon .....	49
III.2.2- Mesure .....	49
III.3- Essais de gonflement libre .....	50
III.3.1- Essais réalisés et résultats .....	50
III.4 - Essais aux pressions différentes .....	54
III.4.1- Mode opératoire .....	54
III.4.2- Essais réalisés et résultats .....	54
III.5 - Méthode du prégonflement .....	59
III.5.1- Mode opératoire .....	59
III.5.2- Essais réalisés et résultats .....	59
III.6 - Méthode directe .....	62
III.6.1- Mode opératoire .....	62
III.6.2- Essais réalisés et résultats .....	62

III.7 - Comparaison entre les différentes méthodes .....	66
III.8 - Simulation des essais de gonflement libre .....	68

## CHAPITRE IV :

### *Etude à l'appareil triaxial*

IV.1- Introduction .....	74
IV.2 - Matériels d'essai .....	74
IV.3 - Mode opératoire .....	76
IV.4 - Essais réalisés et résultats .....	77

## CHAPITRE V :

### *Etude paramétrique*

V.1- Introduction .....	83
V.2- Effet de l'épaisseur de l'échantillon .....	83
V.3- Effet de la teneur en eau initiale .....	85
V.4- Effet de la contrainte verticale appliquée à l'échantillon .....	87
V.5- Effet de l'histoire du chargement .....	88
V.5.1 - Effet d'un déchargement .....	88
V.5.2 - Effet d'un cycle de chargement .....	91

CONCLUSION .....	94
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	97

---

### RESUME

---

Ce travail de thèse porte sur l'étude en laboratoire du gonflement de l'argile des Flandres. Il est composé de cinq parties :

La première partie comporte une analyse du phénomène de gonflement (son origine, sa caractérisation,.. ) et des méthodes de son étude en laboratoire. Une classification des argiles d'après leur potentiel de gonflement est également donnée.

La seconde partie est consacrée à l'analyse des propriétés de l'argile des Flandres. Pour cette argile, on donne les compositions chimique et minéralogique, la perméabilité, les caractéristiques de résistance mécanique et l'indice de gonflement libre.

La troisième partie porte sur l'étude à l'œdomètre du potentiel de gonflement. Quatre méthodes sont utilisées et comparées (gonflement libre, gonflement aux pressions différentes, prégonflement et gonflement direct). Une simulation numérique des essais de gonflement libre est également présentée.

Dans la quatrième partie, on présente des essais de gonflement à la cellule triaxiale avec trois méthodes ( gonflement libre, prégonflement, et gonflement aux pressions différentes ).

La cinquième partie comporte une étude de l'effet sur le gonflement de certains paramètres comme l'épaisseur de l'échantillon, la teneur en eau initiale, la contrainte verticale appliquée et l'histoire de chargement.

ABSTRACT

---

The first chapter contains a survey about the swelling of soils, and about the experimental methods used to characterize this phenomenon. A classification of soils in function of their swelling potential is proposed.

The second chapter deals with the properties of Flandres clay. Chemical and mineralogical compositions, mechanical properties and free swell index are given.

The third chapter contains a presentation of the study of the swelling potential of Flandres clay using the oedometer. Four methods are described and used ( free-swell, different pressures, pre-swell and direct-swell ). A numerical simulation of free-swell tests is also given.

The fourth chapter includes a presentation of the study of the swelling behaviour of Flandres clay using a triaxial cell. Three methods are used : free-swell, pre-swell and different-pressures.

The last chapter contains a parametric study of the swelling behaviour of Flandres clay. The influence of some parameters such as sample thickness, initial water content, vertical load and load history is presented.



INTRODUCTION GENERALE

### Introduction générale

Les sols argileux sont constitués de particules de petites dimensions qui forment le squelette solide dont la partie poreuse est totalement ou en partie occupée par de l'eau. Les particules d'argile sont caractérisées par un déficit de charges qui dépend de leurs compositions chimique et minéralogique. Ce déficit confère aux argiles un potentiel d'adsorption des molécules d'eau qui est à l'origine du phénomène de gonflement. Ainsi, si l'argile peut se déformer librement, l'adsorption de l'eau se traduit par un gonflement ou une augmentation de volume, mais si on l'empêche de se déformer, une pression appelée "pression de gonflement" se génère. Le phénomène de gonflement peut être à l'origine de nombreux désordres notamment au niveau des bâtiments légers (ces dernières années et suite aux changements climatiques dans la région du Nord, plusieurs désordres ont été observés dans des maisons individuelles), des ouvrages de soutènements, des tunnels et des forages pétroliers.

Vu l'importance et la complexité du phénomène de gonflement, plusieurs méthodes expérimentales ont été proposées pour sa caractérisation (évaluation du potentiel et de la pression de gonflement). Ces méthodes peuvent donner des résultats très différents d'où la nécessité de faire une étude comparative entre elles.

L'objectif du présent travail est l'étude en laboratoire des propriétés de gonflement de l'argile intacte des Flandres qui est très

répandue dans la région du Nord. Les essais ont été réalisés sur des échantillons prélevés à Dunkerque à des profondeurs allant de 31 à 45 mètres. Plusieurs méthodes ont été testées et leurs résultats ont été confrontés.

Le présent rapport est composé de cinq chapitres :

Le premier chapitre comporte une analyse du phénomène de gonflement (son origine, sa caractérisation,... ) et des méthodes de son étude en laboratoire. Une classification des argiles d'après leur potentiel de gonflement est également donnée.

Le second chapitre est consacré à l'analyse des propriétés de l'argile des Flandres. Pour cette argile, on donne les compositions chimique et minéralogique, les caractéristiques de résistance mécanique et l'indice de gonflement libre.

Le troisième chapitre porte sur l'étude à l'œdomètre du potentiel de gonflement. Quatre méthodes sont utilisées et comparées (gonflement libre, gonflement aux pressions différentes, prégonflement et gonflement direct). Une simulation numérique des essais de gonflement libre est également présentée.

Dans le quatrième chapitre, on présente des essais de gonflement à la cellule triaxiale avec trois méthodes ( gonflement libre, prégonflement, et gonflement aux pressions différentes ). Vu les difficultés rencontrées dans l'analyse des essais de gonflement anisotrope, seuls les essais isotropes seront présentés.

Le cinquième chapitre comporte une étude de l'effet sur le gonflement de certains paramètres comme l'épaisseur de l'échantillon, la teneur en eau initiale, la contrainte verticale appliquée et l'histoire du chargement.

**CHAPITRE ( I ) :  
ANALYSE DU PHENOMENE DU GONFLEMENT ET  
METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE**

---

**CHAPITRE I :  
ANALYSE DU PHENOMENE DU GONFLEMENT ET  
METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE**

## I.1 - Phénomène du gonflement

### I.1.1 - Origine du gonflement

Les sols argileux sont constitués par l'assemblage des particules de petites dimensions. Ces particules forment le squelette solide dont la partie poreuse est occupée en partie ou en totalité par l'eau. Les particules d'argiles sont habituellement cristallines. Elles sont formées principalement de silicium, d'aluminium, d'oxygène et d'eau. Le silicium et le magnésium peuvent remplacer l'aluminium, et, dans certain cas, le potassium peut remplacer le silicium. Selon la structure chimique, les argiles peuvent être classées en trois principaux groupes : la kaolinite, la montmorillonite et l'illite. La figure (I.1) donne la structure chimique de ces groupes.

Les argiles sont caractérisées principalement par un déficit de charge électrique dont l'intensité dépend essentiellement de la composition chimique. Ce déficit se traduit par la fixation des cations et l'orientation des molécules polaires ( par exemple, l'eau) autour des solides. Ainsi, au voisinage de chaque particule se forme une double couche, appelée "couche de GOUY-CHAPMAN" constituée d'une couche fortement liée au solide et d'une couche diffuse en affinité avec la particule d'argile ( figure I. 2 ) .

L'épaisseur de la première couche est faible ( de l'ordre de 20 Å ); mais celle de la seconde est plus importante, elle peut atteindre 400 Å. La fixation des molécules d'eau implique l'augmentation de la distance entre particules et par conséquent un gonflement de l'argile appelé "gonflement interparticulaire".

Certaines argiles, comme la montmorillonite, peuvent fixer des molécules d'eau entre des feuillets voisins. Quand la quantité d'eau est importante, on a une augmentation de la distance entre feuillets et par conséquent un gonflement appelé gonflement interfoliaire ou "intraparticulaire".

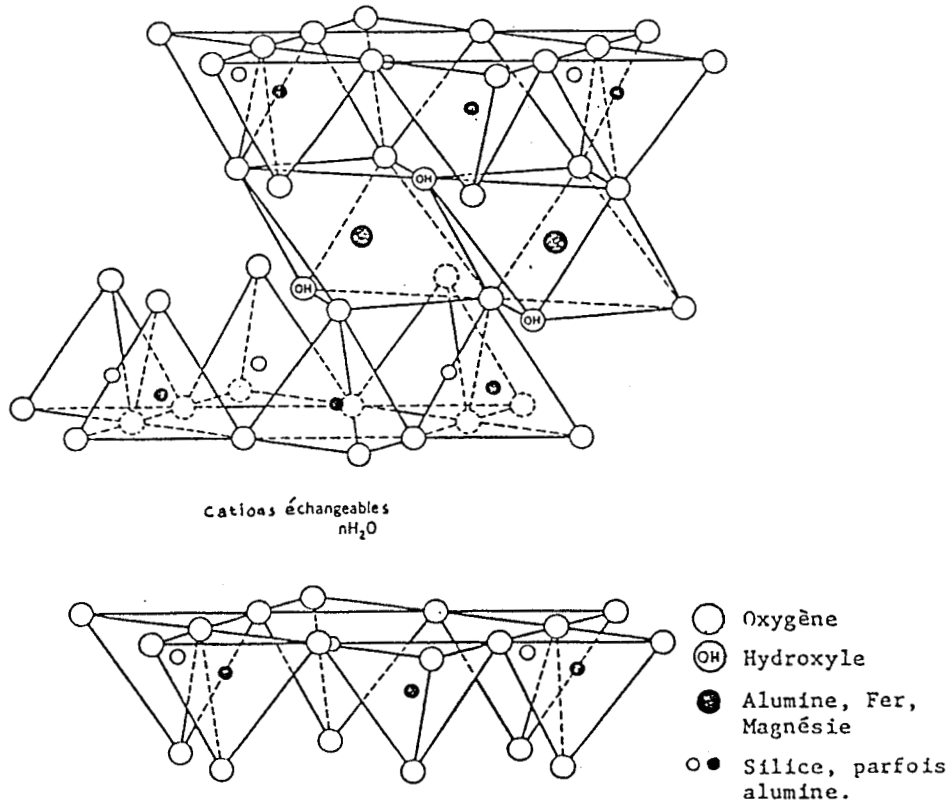
### **I.1.2-Rôle des cations échangés dans le gonflement**

Suite au gonflement, la distance entre feuillets d'argile peut atteindre plusieurs dizaines voir même plusieurs centaines d'Angströms ( Norrish et al. 1963, Andrews et al. 1967, Van Olphen 1977). Il apparaît alors que l'aptitude d'un matériau à donner un gonflement important dépend fortement de la nature des cations échangeables. Généralement, les cations  $\text{Na}^+$  et  $\text{Li}^+$  provoquent un gonflement important entre feuillets (Ben Rhaiem , 1983).

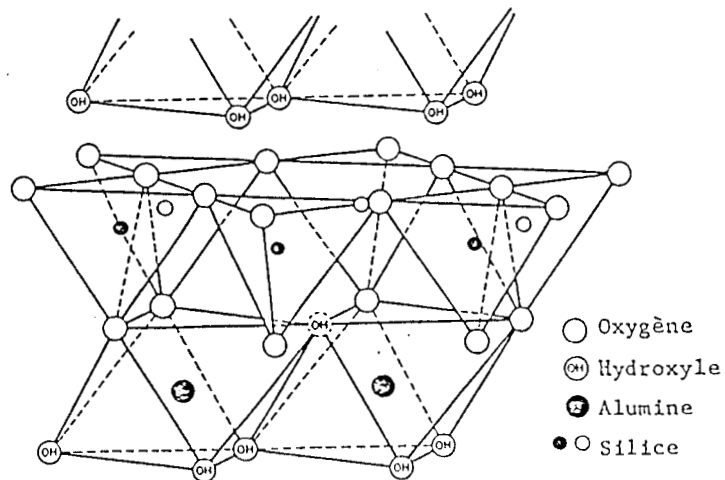
Au cours du gonflement, il existe une compétitivité entre l'énergie de cohésion entre feuillets et l'énergie d'interaction de l'eau à la fois avec les cations compensateurs et les feuillets (Mamy ,1968). Il est alors possible de donner une expression schématique de l'énergie d'absorption (W) (Pons, 1980).

**CHAPITRE ( I ) :**  
**ANALYSE DU PHENOMENE DU GONFLEMENT ET**  
**METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE**

---



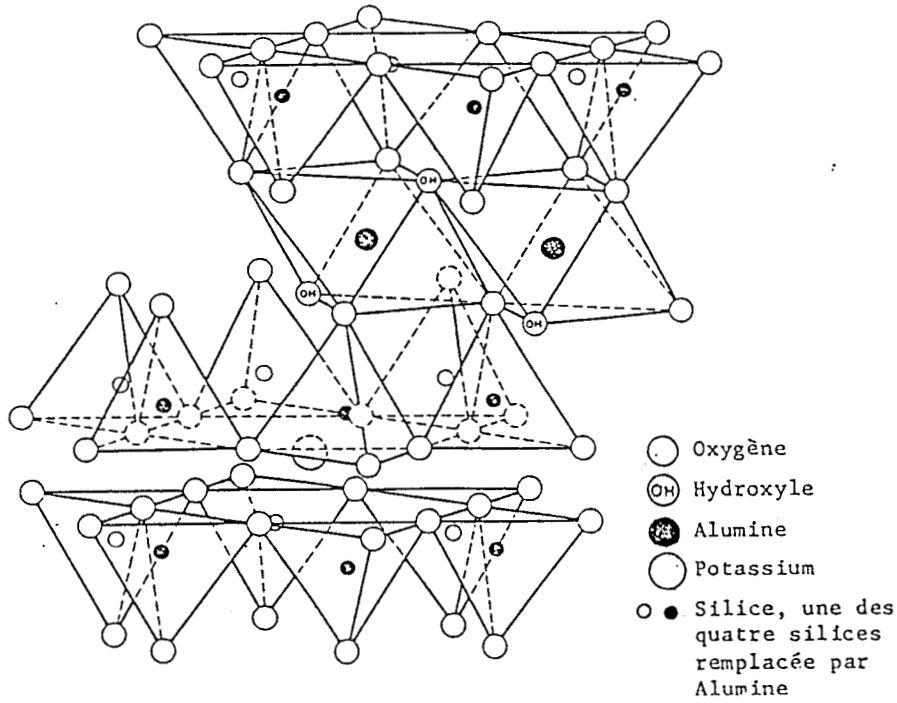
**Figure I.1-a :** - Représentation schématique de la structure de la montmorillonite ( Grim 1968 )



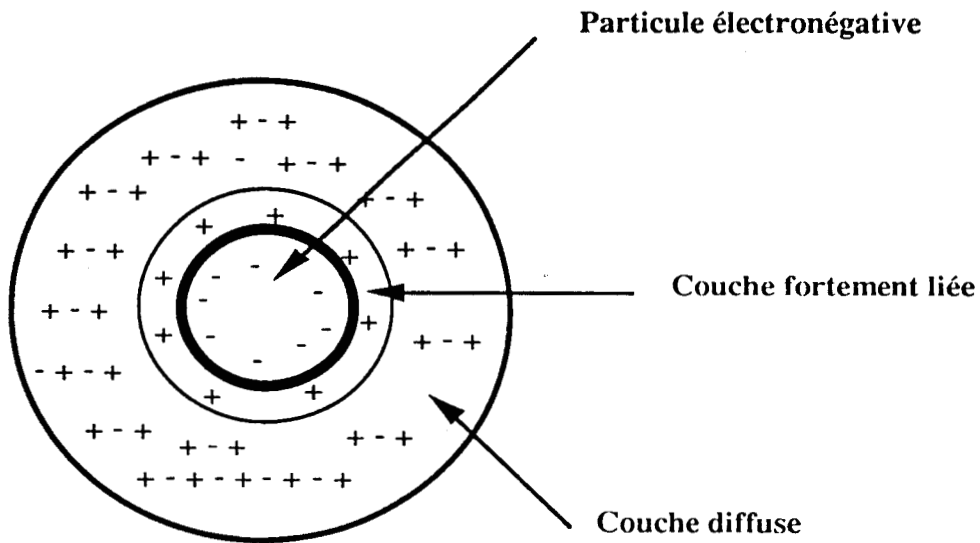
**Figure I.1-b :** - Représentation schématique de la structure de la kaolinite ( d' après Guinier 1964 )

**CHAPITRE (I) :**  
**ANALYSE DU PHENOMENE DU GONFLEMENT ET**  
**METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE**

---



**Figure I.1-c : - Représentation schématique de la structure de l'illite ( d' après Grim , 1968 )**



**Figure I.2 : - Schéma de la double couche d'eau entourant une particule argileuse**



$$W=W_R+W_A$$

WA: est l'énergie de répulsion engendrée par l'interaction eau-cation et eau-feuillet.

WR: est l'énergie de cohésion induite par les forces Van der Waals appliquées entre des feuillets adjacents.

L'énergie d'attraction dépend de la distance entre particules. Quant à l'énergie de répulsion, elle dépend à la fois de la distance interparticulaire et de la concentration en charges électriques. Les figures (I.3-a) et (I.3-b) donnent l'évolution de ces énergies en fonction de la distance interparticulaire et de la concentration en électrolyte. On constate que les deux énergies décroissent rapidement avec la distance interparticulaire et que l'énergie de répulsion diminue avec l'augmentation de la concentration en électrolytes (Wignyardarsono, 1985). L'énergie de répulsion correspondant à la désorption des ces couches d'eau ne se manifeste qu'à partir d'une distance de 10 Å ( Van Olphen , 1963).

On remarque que suivant la concentration en électrolytes du milieu et la distance interparticulaire, les particules peuvent être soumises à une énergie répulsive ou attractive.

CHAPITRE ( I ) :  
ANALYSE DU PHENOMENE DU GONFLEMENT ET  
METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE

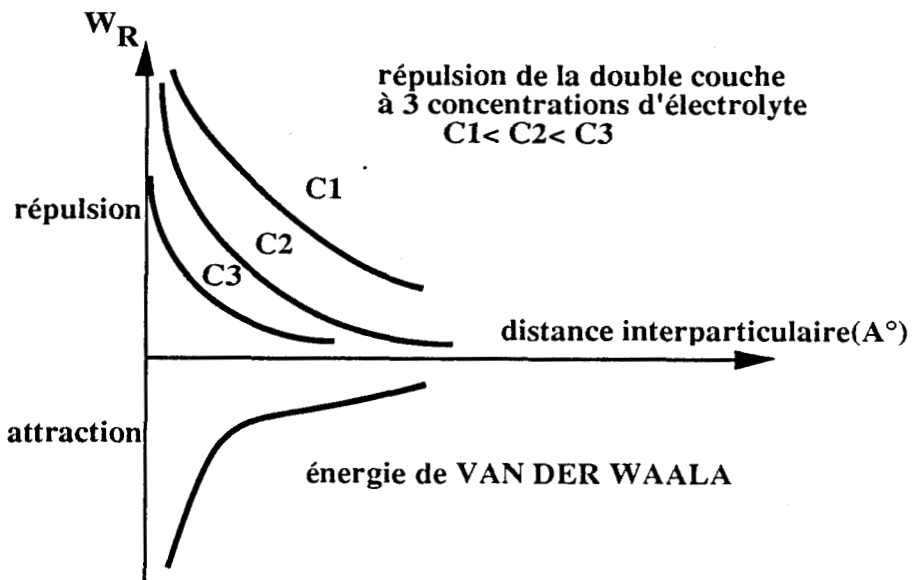


Figure I.3-a

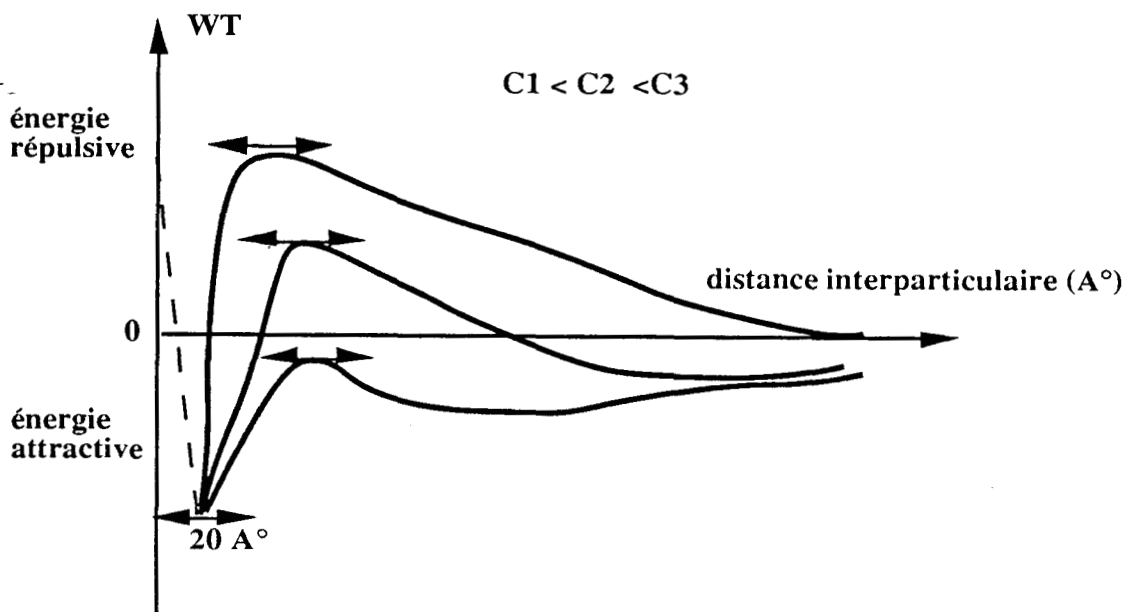


Figure I.3-b

- a: Energie de répulsion de la double couche
- b: Energie totale d'interaction de deux particules d' argile  
( d' après Van Olphen , 1963 )

### I.1.3- Gonflement au niveau de la paillette

Le gonflement représente l'extension des doubles couches pour des teneurs en eau croissantes.

Les sols argileux constitués de particules de grande surface spécifique et très chargées électriquement ont la propriété d'adsorber des molécules d'eau.

Généralement, les paillettes d'argile sont représentées avec des charges négatives sur les grandes faces et des charges positives sur les bords ( figure I.4) .

Certains ions sont attirés et retenus à proximité immédiate de la paillette constituant ainsi une couche de contre-ions. Par le jeu des mêmes charges électriques, d'autres ions hydratés sont maintenus à une certaine distance de la paillette, constituant la couche diffuse.

C'est ainsi qu'on explique la présence à proximité de la paillette d'une couche adsorbée constituée par une auréole d'ions et de molécules dipôlares d'eau. Plus la distance des ions ou dipôles est petite, par rapport à la paillette, plus les forces qui conduisent à leur rétention sont grandes et empêchent leur mouvement . Par conséquent, la liberté de mouvement des constituants de la couche d'eau adsorbée est plus ou moins restreinte par comparaison à celle de l'eau libre.

L'épaisseur de la couche d'eau adsorbée dépend dans une large mesure de la nature et de la charge électrique des ions. Plus ces charges sont importantes, plus la charge électrique totale de la paillette est compensée par un nombre moins important d'ions ; par conséquent, l'épaisseur de la couche d'eau absorbée est plus réduite.

CHAPITRE ( I ) :  
ANALYSE DU PHENOMENE DU GONFLEMENT ET  
METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE

---

Si on met en contact l'eau libre avec une couche d'eau adsorbée, il y aura migration d'eau vers la paillette pour compléter la couche adsorbée.

Si la paillette dispose d'une couche incomplète, elle va exercer une succion sur l'eau libre, la succion dépend de l'épaisseur de la couche d'eau, elle diminue lorsque l'épaisseur augmente.

L'existence du complexe d'adsorption enveloppant la paillette argileuse facilite l'établissement des ponts de liaison constitués par les ions et les dipôles d'eau qui impriment aux sols fins une certaine cohésion (figure I.5) .

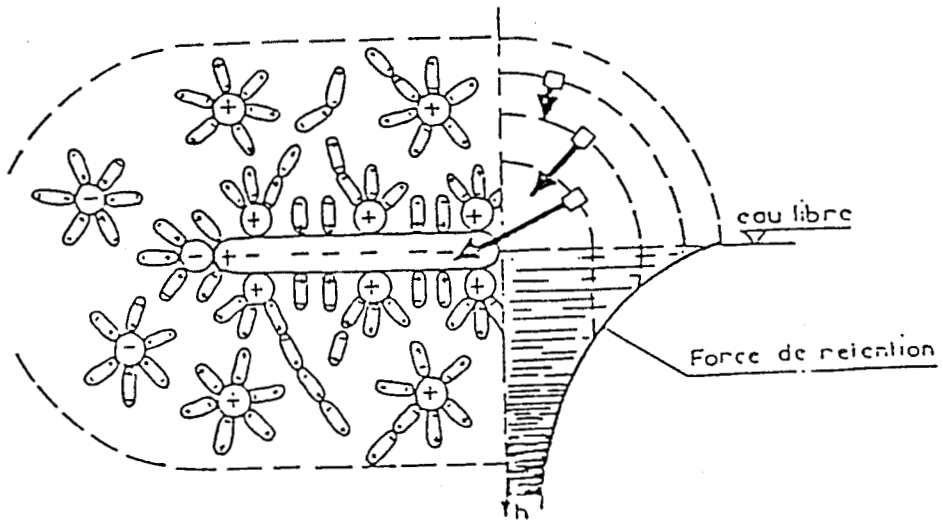
Etant donné que les succions varient dans une large mesure ( de zéro pour le sol saturé, jusqu'à  $10^4$  bar pour le sol sec), on utilise le symbole  $pF$  qui représente le logarithme décimal de la succion exprimée en centimètre de colonne d'eau:

$$pF = \text{Log } h$$

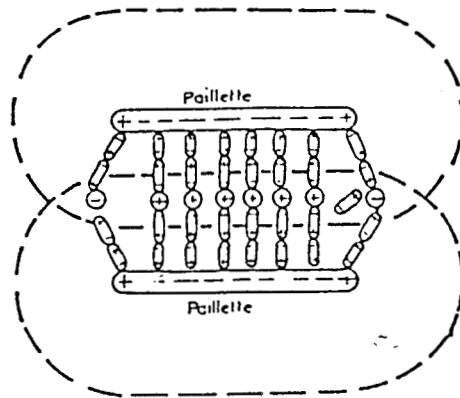
La courbe succion-teneur en eau donne la possibilité d'établir la quantité d'eau retenue pour différentes valeurs de la succion.

les essais menés par le Road Research Laboratory ont montré que la capacité de rétention de la montmorillonite est presque deux fois plus grande que celle de la kaolinite (figure I.6) ( cite dans Andrei 1977 ).

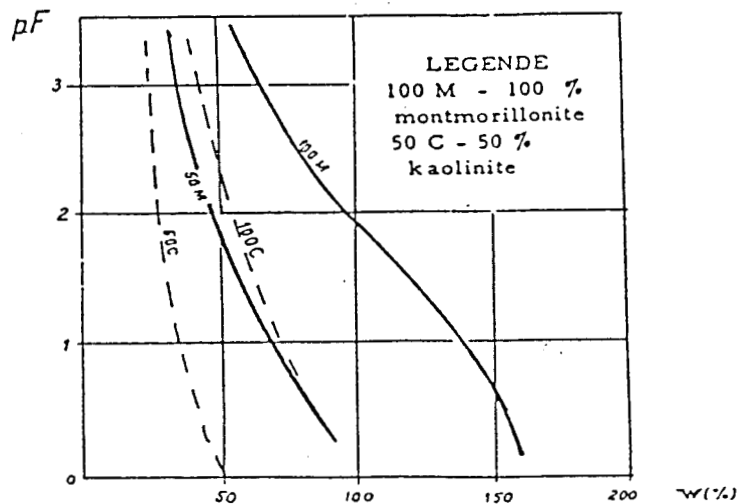
**CHAPITRE (I) :**  
**ANALYSE DU PHENOMENE DU GONFLEMENT ET**  
**METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE**



**Figure I.4 : - Paille d'argile ( d'après Andrei 1977 )**



**Figure I.5 : - Représentation schématique du développement de couches d'eau adsorbée ( d'après Andrei 1977 )**



**Figure I.6 : - Courbe de succion ( d'après Andrei 1977 )**

### I.1.4 - Relation entre le gonflement et la succion des sols

Des travaux de recherche menés par Kassif et al (1971) ont montré que la pression de gonflement ( $P_g$ ) développée par un sol est fonction de la succion ( $S$ ) selon la relation:

$$S = \alpha \cdot P_g$$

avec:  $\alpha > 1$  pour un sol non saturé,

$\alpha = 1$  pour un sol proche de la saturation.

La pression de gonflement d'un sol saturé est approximativement égale à sa succion, 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 de petites valeurs de la succion: entre 0 et  $4 \cdot 10^5$  Pa ( figure I.7 ).

Des essais effectués par Escario et Saez (1973) ( cité dans Iltis 1979 ) avec une cellule de type œdométrique permettant l'application d'une pression pneumatique pour contrôler la succion et d'une pression mécanique pour la surcharge ont montré que le gonflement est fonction de la succion et de la charge appliquée ( figure I.8 ).

**CHAPITRE ( I ) :**  
**ANALYSE DU PHENOMENE DU GONFLEMENT ET**  
**METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE**

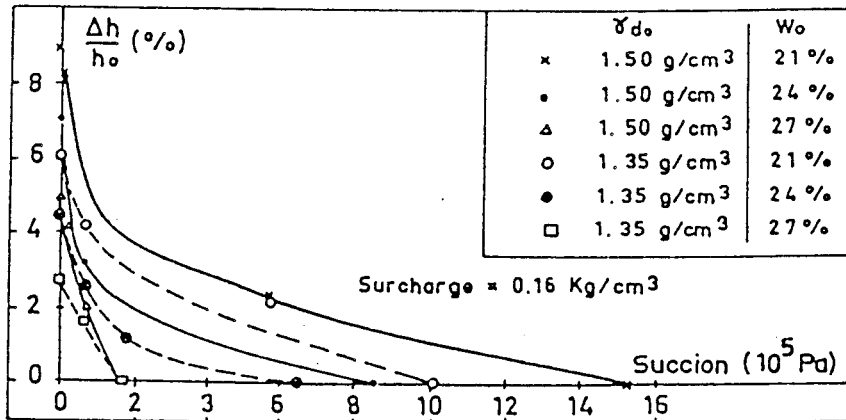


Figure I.7 : - Relation entre le taux de gonflement et la succion  
 ( d'après Kassif et al , 1971 )

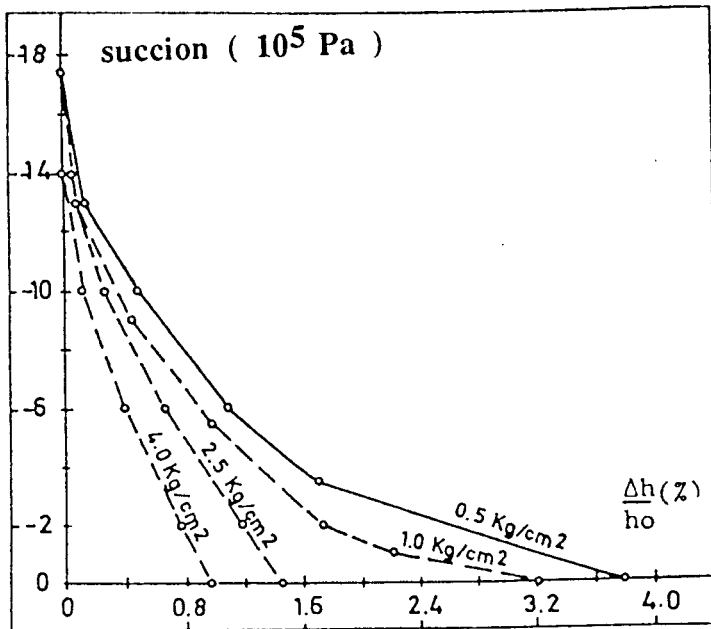


Figure I.8 : - Influence de la succion et de la pression mécanique de  
 surcharge sur le gonflement d'après Escario et Saez  
 ( cité dans Iltis 1979 )

## I.2 - Etude en laboratoire du gonflement

### 1.2.1-Paramètres caractéristiques

Le gonflement des sols fins peut être caractérisé par différentes grandeurs à savoir:

- l'indice de gonflement (  $C_g$  ),
- l'indice de gonflement libre (  $I_g$  ),
- le potentiel de gonflement (  $\Delta h/h_0$  % ),
- la pression de gonflement (  $P_g$  ).

#### *-L'indice de gonflement*

L'indice de gonflement (  $C_g$  ) est défini par la pente, dans le plan (  $e$ ,  $\log \sigma$  ), de la courbe de déchargement lors d'un essai œdométrique.

#### *- L'indice de gonflement libre*

L'indice de gonflement libre permet de caractériser qualitativement le gonflement du sol. Il est déterminé d'après un essai standard simple comportant:

-la mise en place de 20g d'argile sèche tamisée au tamis n°40 dans une éprouvette graduée;

-l'ajout de 100 cm<sup>3</sup> d'eau et l'agitation d'une façon régulière pendant une minute pour mettre l'argile en suspension;



-la mesure de la hauteur du dépôt après 24 heures.

L'indice de gonflement est calculé par :

$$I_g = 100 * ( V_f - V_i ) / V_i$$

$V_f$  et  $V_i$  représentent respectivement les volumes final et initial de l'argile.

### *- Potentiel de gonflement*

Le potentiel de gonflement désigne la variation du volume ( $\Delta V/V$  %) au cours de l'adsorption de l'eau. Il est généralement mesuré à l'œdomètre. La figure (I.9 ) donne une évolution type du potentiel de gonflement au cours d'un essai à l'œdomètre. On constate deux phases: un gonflement primaire suivi par un gonflement secondaire qui diminue jusqu'à la stabilisation.

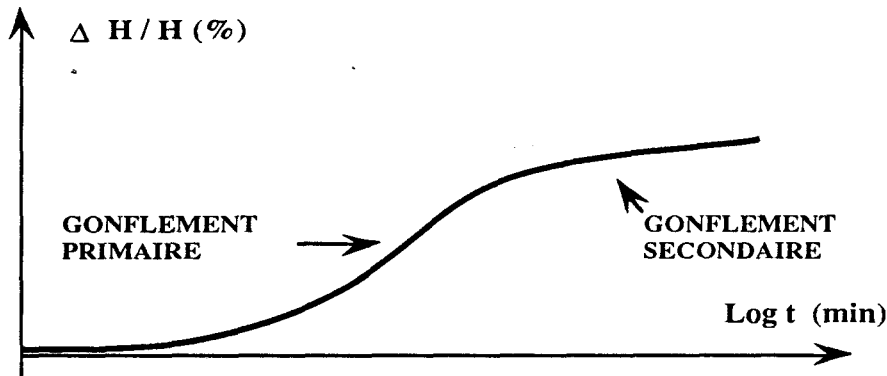


Figure I.9 : - Evolution du potentiel de gonflement  
en fonction du temps

### *- Pression de gonflement*

La pression de gonflement représente la pression qu'il faut appliquer à un échantillon de sol pour empêcher sa déformation au cours de l'adsorption d'eau (essai à volume constant). Elle peut être également définie par la pression qu'il faut appliquer pour ramener un échantillon de sol à son volume avant saturation (essai à volume libre).

Dans un essai à volume constant, le volume de l'échantillon est maintenu constant pendant la saturation. Ce mécanisme modifie la structure interne de l'argile, mais n'affecte pas la forme externe de l'échantillon. Dans ce cas, l'éprouvette conserve son énergie potentielle et l'eau trouve accès au micro-vides internes ( Aboushook , 1984).

Dans l'essai de gonflement libre, l'argile gonfle librement sans grande résistance, l'eau arrive facilement dans les micro-vides. Dans ce cas, l'échantillon perd progressivement son énergie interne.

## I.2.2 - Méthodes de détermination de la pression de gonflement

Les méthodes de détermination de la pression de gonflement peuvent être classées en trois catégories à savoir :

- la méthode de prégonflement,
- la méthode aux pressions différentes,
- la méthode directe.

D'autres méthodes s'inspirant de celles-ci ont été développées. Elles visent la prise en compte des conditions en place ( méthode de Chen, 1970) ou de la déformation introduite par la pression de gonflement ( méthode d'Huder - Amberg , 1972).

### *- Méthode du prégonflement*

**A l'œdomètre :**

On laisse une éprouvette gonfler sous une faible contrainte normale (5 kPa, poids du piston) jusqu'à la stabilisation de la déformation verticale. Ensuite, on applique par paliers une contrainte croissante. La contrainte normale ( $\sigma_n$ ) qui permet de revenir à l'état initial de déformation de l'éprouvette est définie comme la pression de gonflement. La figure (I.10-a) illustre cette méthode.

**CHAPITRE ( I ) :**  
**ANALYSE DU PHENOMENE DU GONFLEMENT ET**  
**METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE**

---

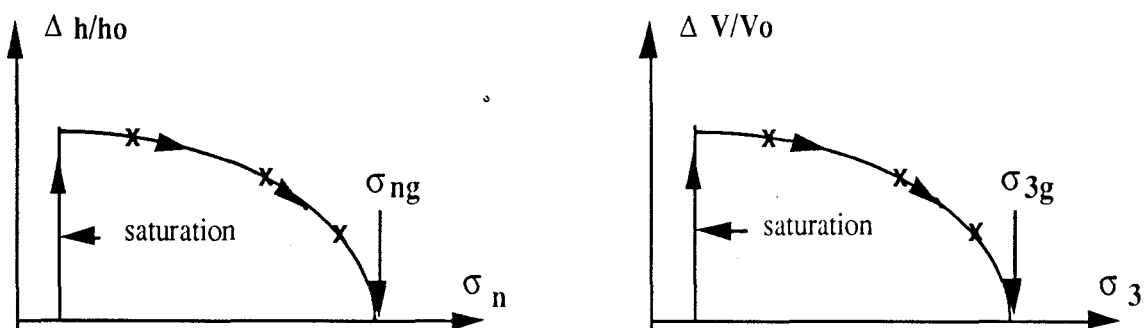
Le défaut de cette méthode consiste dans les difficultés à maîtriser le frottement entre l'échantillon et la cellule œdométrique.

**A l'appareil triaxial :**

On applique, une pression de confinement isotrope ( $\sigma_3$ ) et une contre-pression (CP).

On choisit une faible valeur de confinement ( $\sigma'_3 = \sigma_3 - CP$ ). Les pressions appliquées restent constantes au cours de la saturation jusqu'à la stabilisation de la déformation. On mesure, le gonflement ( $\Delta V/V_0$ ) et la quantité d'eau échangée avec l'échantillon ( $\Delta W$ ).

Ensuite, on augmente, par paliers la pression isotrope. La pression qui permet de ramener l'échantillon à son état initial de déformation est définie comme la pression de gonflement ( figure I.10-b ).



(a)

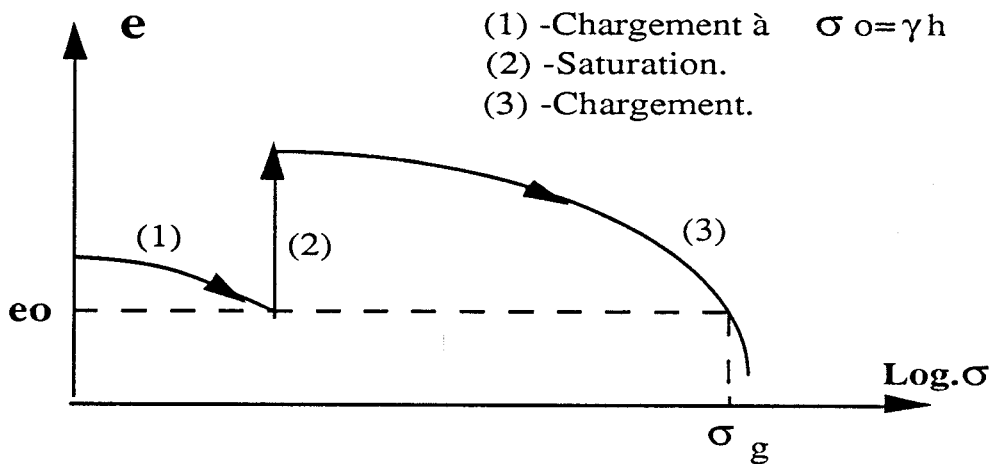
(b)

Figure I.10 : - Méthode du prégonflement

a : œdomètre

b : triaxial

Chen (1970) a proposé une amélioration de cette méthode pour tenir compte des contraintes appliquées sur l'échantillon avant le prélèvement. Elle consiste à appliquer à l'échantillon, avant saturation, une contrainte normale équivalente à la contrainte en place ( $\sigma_0 = \gamma.H$ ). La figure I.11 illustre le principe de cette méthode.



**Figure I.11 : - Mesure de la pression de gonflement**  
**( méthode de Chen , 1970 )**

Huder et Amberg (1972) ont proposé également une amélioration de la méthode de prégonflement. Cette amélioration consistait en la prise en compte, dans la détermination du potentiel de gonflement, de la déformation introduite par cette pression. Cette méthode est effectuée à l'œdomètre selon la procédure suivante:

- Afin d'éliminer l'effet du carottage, l'échantillon est soumis à un cycle de chargement - déchargement - rechargement ( courbes 1, 2 et 3 de la figure I.12 ). L'état de l'échantillon est alors représenté par le point B.

- Sous l'état de contrainte ( $\sigma_B$ ), l'échantillon est mis en contact avec

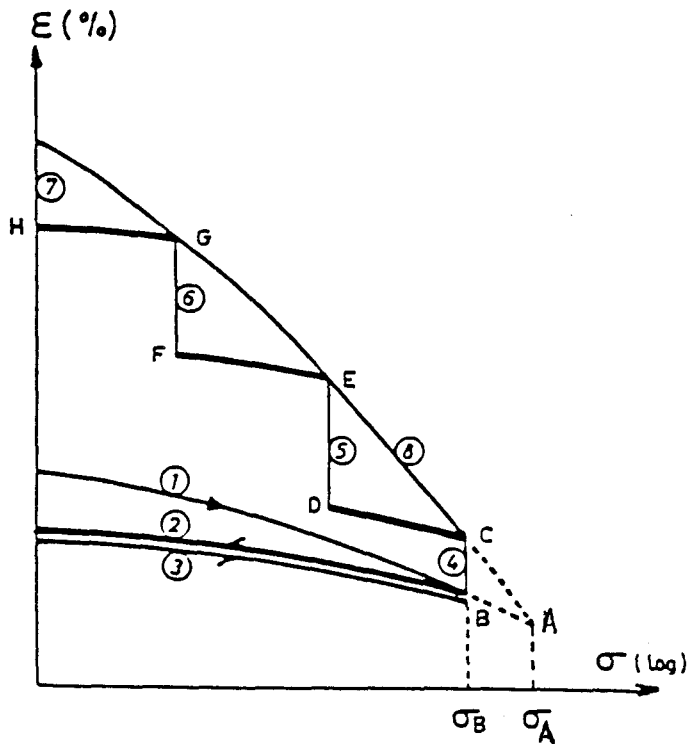
**CHAPITRE (I) :**  
**ANALYSE DU PHENOMENE DU GONFLEMENT ET**  
**METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE**

---

l'eau. Il se produit alors un gonflement.

- L'échantillon est ensuite déchargé par paliers (voir les courbes CD, EF, et GH), on obtient la courbe (8) (déformation totale).

- La pression de gonflement est donnée par l'abscisse du point d'intersection des courbes (2) et (8).



1- Premier chargement.

2 et 3 -Déchargement - chargement complets.

4-Gonflement par introduction d'eau sous charge  $\sigma_B$ .

CD Déchargement.

5 et 6 - Gonflement.

EF et GH Déchargement.

8- Gonflement total en fonction du déchargement.

**Figure I. 12 : - Mesure de la pression de gonflement**  
**( méthode d'Huder - Amberg , 1972 )**

*- Méthode aux pressions différentes*

Cette méthode nécessite quatre ou cinq essais de gonflement libre sur des échantillons identiques mais réalisés avec différentes pressions normales (à l'œdomètre) ou contraintes isotropes (à l'appareil triaxial ). On trace ensuite l'évolution de la déformation volumique en fonction de la contrainte appliquée. La pression de gonflement est celle qui correspond à une déformation nulle ( figure I.13 )

Cette méthode nécessite au préalable un encadrement de la pression de gonflement et des précautions particulières pour assurer l'homogénéité des échantillons.

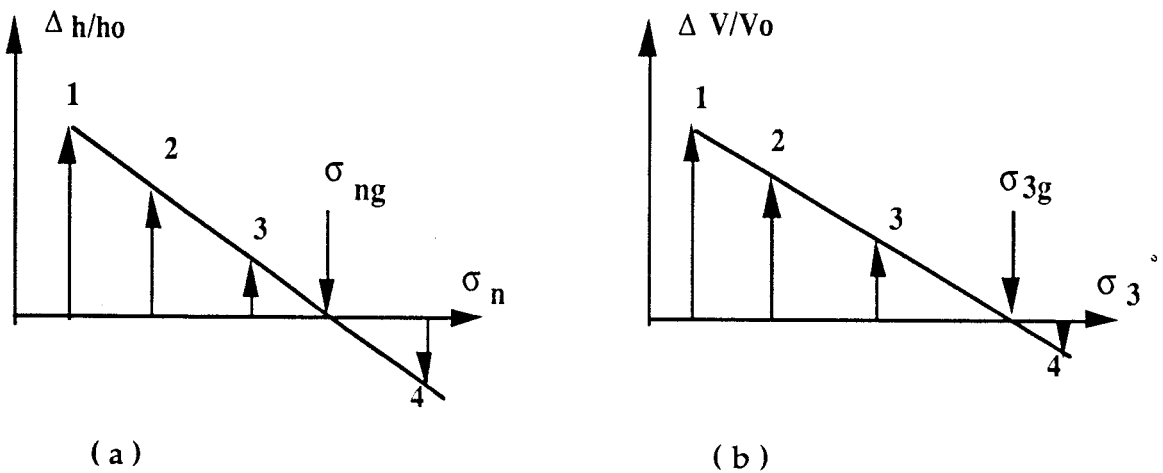


Figure I.13 : - Méthode aux pressions différentes

a : œdomètre      b : triaxial

*- Méthode directe*

**- A l'œdomètre :**

L'échantillon est placé dans une cellule œdométrique. Il est ensuite saturé en maintenant bloquée la déformation normale à l'aide d'un dispositif spécial. La pression de gonflement est mesurée directement à l'aide d'un capteur de force ( figure I.14-a).

**- A l'appareil triaxial :**

L'échantillon est placé dans une cellule triaxiale. Il est ensuite saturé avec des conditions de blocage des déformations axiale et latérale ( figure 1.14-b).

Au cours de cet essai, on mesure l'évolution de:

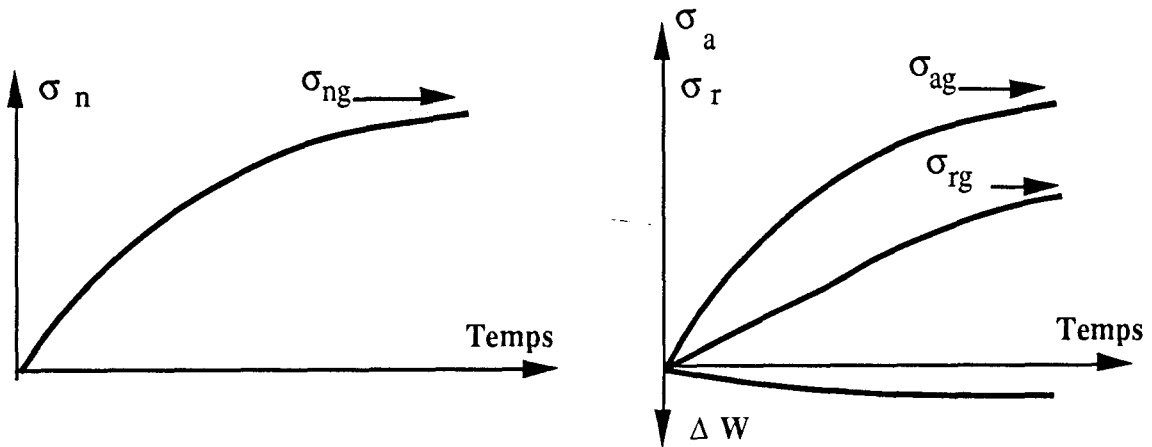
- la contrainte verticale à l'aide d'un capteur de force (  $\sigma_{ag}$  ),
- la contrainte de gonflement (contrainte latérale) à l'aide d'un capteur de pression (  $\sigma_{rg}$  ),
- le volume d'eau échangée entre le circuit de saturation et l'échantillon (  $\Delta W$  ).

Cet essai permet donc d'étudier l'évolution de la pression de gonflement en fonction de la variation de la teneur en eau.



CHAPITRE (I) :  
ANALYSE DU PHENOMENE DU GONFLEMENT ET  
METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE

---



(a)

(b)

Figure I.14 : - Mesure de la pression de gonflement  
( méthode directe )

a : œdomètre

b : triaxial

### I.3 - Facteurs influençants le gonflement des sols argileux

Le gonflement des sols argileux dépend de plusieurs facteurs définis à l'échelle microscopique et macroscopique, notamment :

- la composition et nature minéralogiques,
- la composition physico-chimique,
- la nature de la structure interne de l'argile,
- la densité et la teneur en eau,
- le mode et l'énergie de compactage,
- la pression extérieure appliquée.

#### I.3.1- Composition et nature minéralogiques

Le gonflement de l'argile dépend sensiblement du pourcentage des éléments argileux actifs. Les montmorillonites sont très gonflantes, puis viennent les illites et les kaolinites. Le tableau ( I. 1 ) représente l'indice de gonflement (  $C_g$  ) pour les principaux minéraux (Lambe, 1953).

**CHAPITRE ( I ) :**  
**ANALYSE DU PHENOMENE DU GONFLEMENT ET**  
**METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE**

---

<b>Minéraux argileux</b>	<b>Indice de gonflement(Cg)</b>
<b>-Montmorillonite</b>	<b>0,510</b>
<b>- Illite</b>	<b>0,210</b>
<b>- Kaolinite</b>	<b>0,060</b>

**Tableau I . 1 : - Indice de gonflement pour différentes argiles**  
**( d'après Lambe ,1953 )**

### **1.3.2- La composition physico-chimique**

Le gonflement des sols argileux est fonction des propriétés électriques des particules argileuses. En effet, les cations fixés sur les paillettes et la concentration ionique de l'eau interstitielle affectent le gonflement. Pour un même type d'argile, le gonflement décroît suivant les ions  $Li^+$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $Ca^+$ ,  $Mg^{++}$ ,  $H^+$ ,  $Fe^{+++}$  ( Lambe,1960 ).

### **1.3.3 - La nature de la structure interne d'argile**

La structure de l'argile a une influence importante sur son gonflement. Des études antérieures ont montré qu'un sol à l'état dispersé est moins gonflant qu'un sol à l'état floculé ( figure I.15 ).

#### **1.3.4 - La teneur en eau**

Bouche (1974) a constaté que, pour une densité sèche donnée, le gonflement décroît avec la teneur en eau de compactage. En effet, l'augmentation de la teneur en eau provoque une diminution de la succion du sol et par conséquent du gonflement.

#### **1.3.5 - Le mode et l' énergie de compactage**

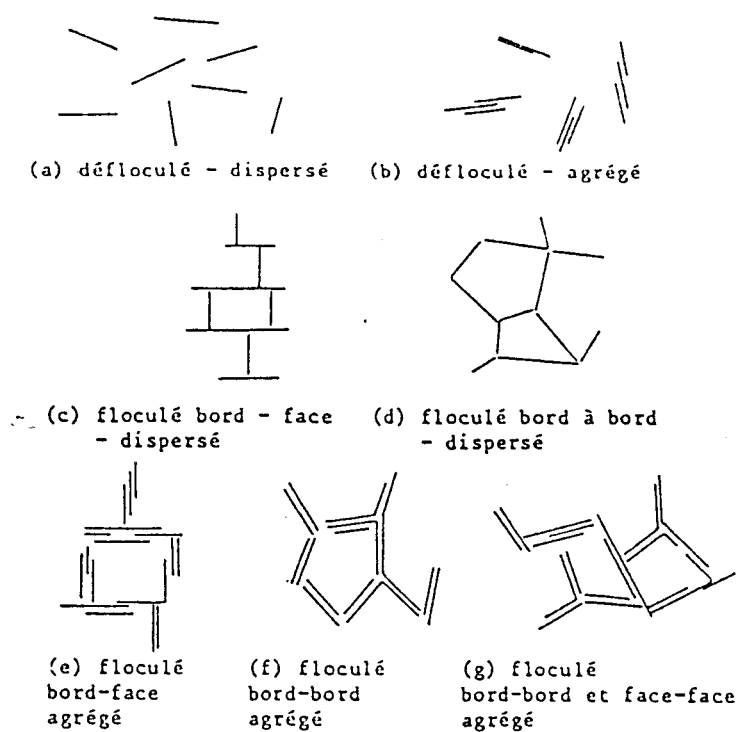
Seed et al (1962) ont montré que le compactage par pétrissage donne des pressions de gonflement plus faibles que le compactage statique. Cela a été constaté aussi par Kassif et Baker (1971), Chen (1975 ) et Kabbaj (1981).

#### **1.3.6 - La pression extérieure appliquée**

Le gonflement par saturation décroît lorsque la pression appliquée augmente. Pour une pression supérieure à la pression de gonflement, le sol a une tendance au tassement (Mouroux, 1969).

**CHAPITRE ( I ) :**  
**ANALYSE DU PHENOMENE DU GONFLEMENT ET**  
**METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE**

---



**Figure I.15 : - Structures des particules d'argile**  
**( d'après Lambe 1953 , et Van Olphen 1963 )**

## I.4-Classement des sols gonflants

Plusieurs classifications ont été proposées pour situer qualitativement les sols gonflants. Elles sont basées sur différents paramètres comme les limites d'Atterberg, la teneur en éléments minéraux, l'indice ou le potentiel de gonflement. Nous allons donner, ci-dessous, les principales classifications:

- Williams ( 1961 ) ( cité dans Mouroux , 1969 ) a classé les sols gonflants (faible, moyen, fort, très fort) en fonction de l'indice de plasticité ( $I_p$ ) et de la fraction argileuse ( $C\% < 2\mu$ ) ( figure I.16 ).

- Holtz et Gibbs (1956) proposent d'utiliser la fraction argileuse ( $C\% < 2\mu$ ), l'indice de plasticité ( $I_p$ ) et la limite de retrait ( $W_R$ ) pour la classification des sols gonflants.

- Skempton (1953) a utilisé dans sa classification l'indice de plasticité ( $I_p$ ) et le pourcentage d'argile ( $C\% < 2\mu$ ) pour plusieurs minéraux argileux .

-Ranganatham et Satyanarayana (1965) ont proposé d'utiliser l'indice de retrait ( $I_R$ ) et le pourcentage d'argile ( $C\% < 2\mu$ ) (figure I.17).

- Gromko (1974) a utilisé le pourcentage d'éléments colloïdaux ( $< 0,01$  mm), l'indice de plasticité ( $I_p$ ) et la limite de retrait ( $W_R$ ) pour la classification des sols gonflants ( tableau I . 2)

CHAPITRE ( I ) :  
ANALYSE DU PHENOMENE DU GONFLEMENT ET  
METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE

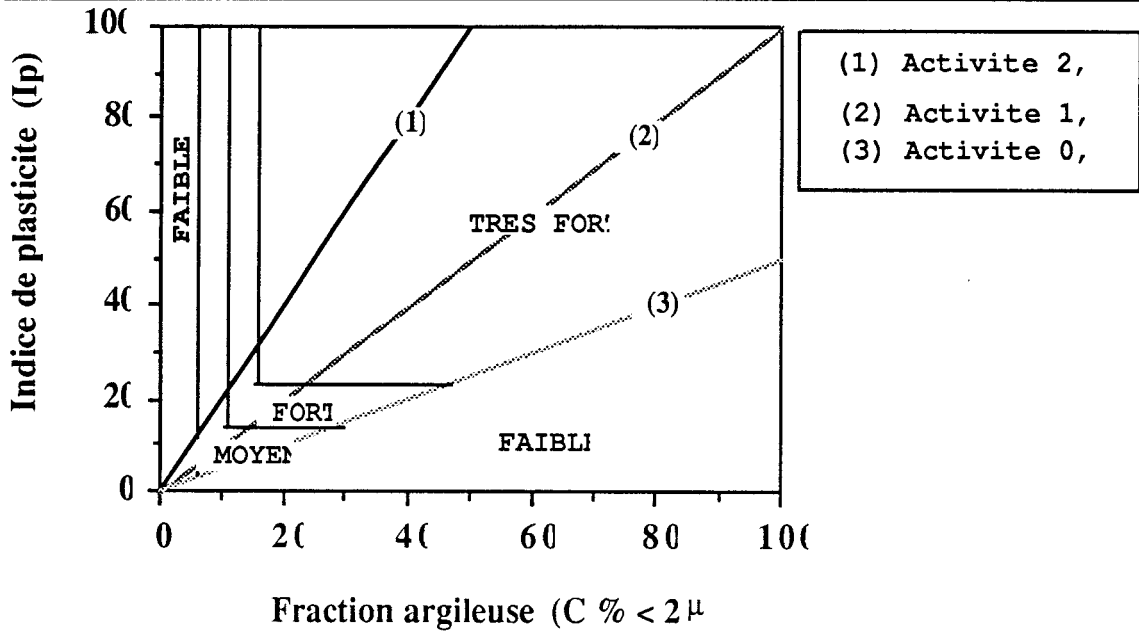


Figure I.16: - Classification des sols gonflants  
( d' après Williams, cité dans Mouroux 1969)

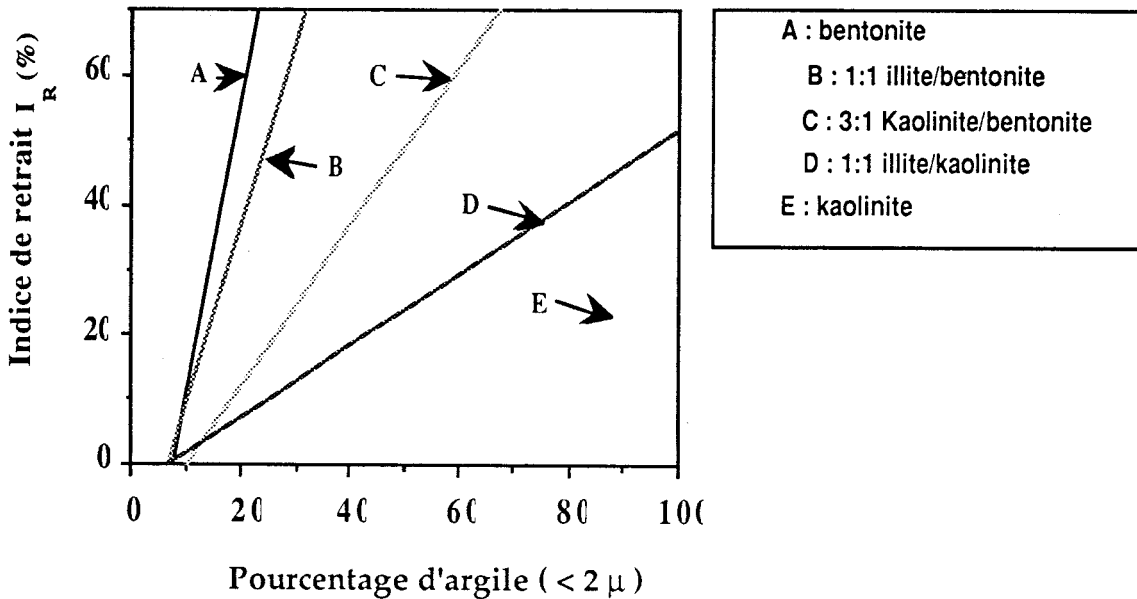


Figure I.17: - Classification des sols gonflants  
( d' après Rangantham et Satyanarayana , 1965 )

**CHAPITRE ( I ) :**  
**ANALYSE DU PHENOMENE DU GONFLEMENT ET**  
**METHODES D'ETUDE EN LABORATOIRE**

---

<b>% de Colloïde ( &lt; 0.01mm)</b>	<b>Ip %</b>	<b>WR %</b>	<b>Degré de gonflement</b>
<b>&gt; 28</b>	<b>&gt; 35</b>	<b>&lt; 11</b>	<b>très élevé</b>
<b>20 - 31</b>	<b>24 - 41</b>	<b>7 - 12</b>	<b>éleve</b>
<b>13 - 23</b>	<b>15 - 28</b>	<b>10 - 16</b>	<b>moyen</b>
<b>&lt; 15</b>	<b>&lt; 18</b>	<b>&gt; 15</b>	<b>faible</b>

**Tableau I. 2 : - Classification des argiles gonflantes**  
**(d' après Gromko, 1974 )**



**CHAPITRE II :**

**CARACTERISATION DE L'ARGILE DES FLANDRES**

### II.1 - INTRODUCTION

Les principaux types d'argile qu'on peut trouver dans la région du Nord sont (d'après l'*Inventaire des Ressources en Matériaux Naturels* du C.E.T.E. de Lille) :

- l'argile des Flandres,
- l'argile du Gault,
- l'argile callovo oxfordienne,
- l'argile de St. Aubin,
- l'argile de Cassel,
- l'argile Wealdienne du Boulonnais,
- l'argile de Louvil.

Du fait que l'argile des Flandres est très répandue dans la région du Nord et qu'elle intervient dans des grands projets d'aménagement (T.G.V. du Nord , ligne de Métro , . . . ), nous l'avons retenue pour cette étude.

### II.2 - Données géologiques

L'argile des Flandres et l'argile de Londres sont deux appellations d'une même formation géologique qui s'est déposée à l'Yprésien (début de l'Eocène).

Ces dépôts s'étendent dans un large golfe marin anglo-franco-belge ouvert au nord et vers la pleine mer.

L'argile des Flandres, d'origine marine, est subdivisée en argile d'Orchies pure à la partie inférieure et en argile de Roubaix plus sableuse à la partie supérieure.

La présente étude a été effectuée sur des échantillons intacts prélevés à Dunkerque. La figure II.1 montre une coupe géologique du site de prélèvement. L'argile étudiée se situe à une profondeur variant entre 31 et 45 m.

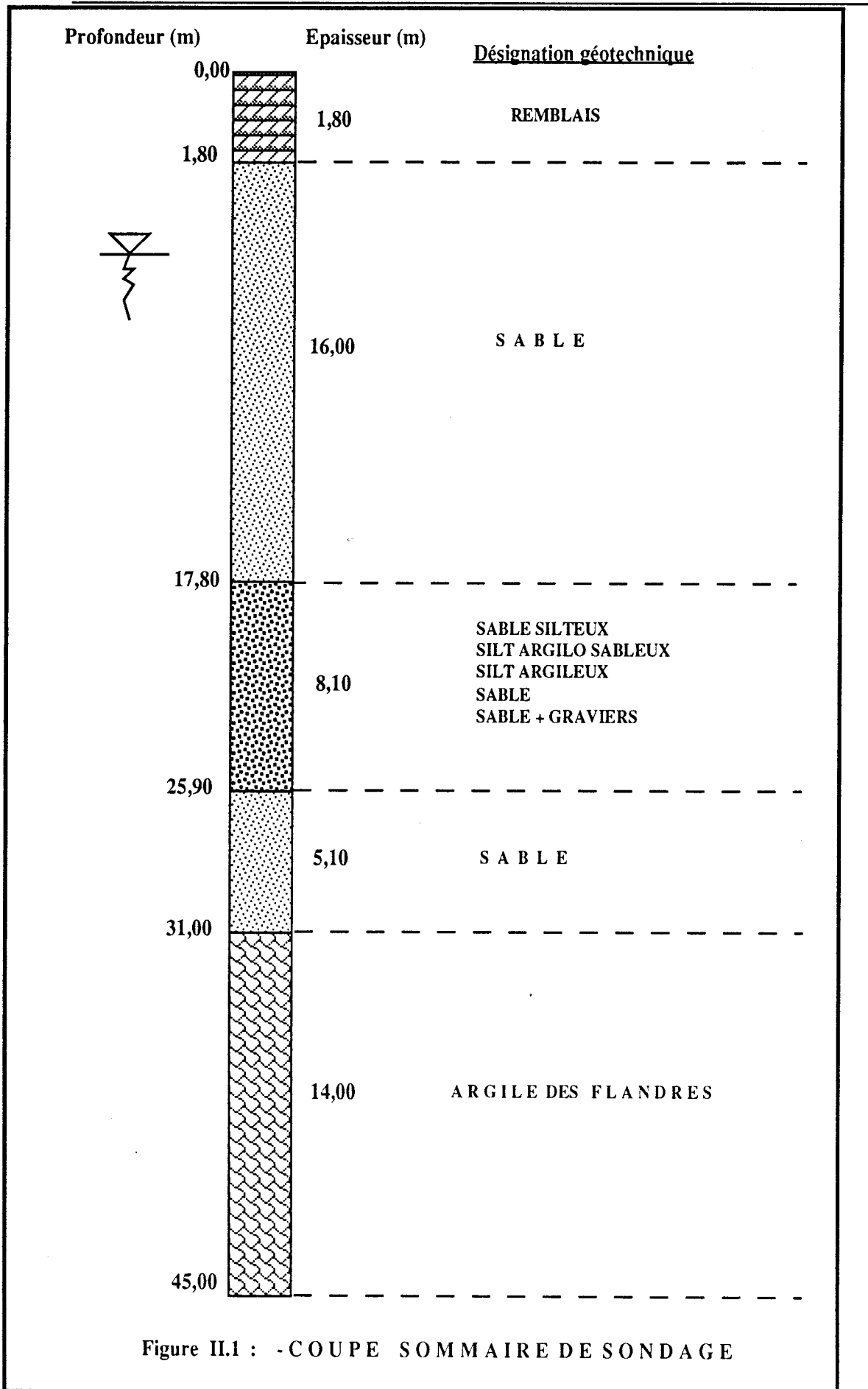
### II.3 - Composition chimique

La composition chimique de cette argile a été déterminée au Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées du Nord - Pas de Calais par fluorescence X. Les résultats de l'analyse sont donnés dans le tableau II.1.

Comp- osition	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Ti O <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Ca O	Mg O	H <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Mn O	S O <sub>3</sub>	Pert au feu
(%)	62,4	18,65	0,92	6,01	1,04	1,43	3,26	0,48	0,08	1,46	4,92

Tableau II.1 : - Composition chimique de l'argile des Flandres

## Chapitre II : Caractérisation de l'argile des Flandres



## II.4 - Caractéristiques géotechniques

Une série d'essais a été réalisée pour déterminer les caractéristiques géotechniques de l'argile prélevée. Les résultats obtenus sont regroupés dans le tableau II.2. On constate que cette argile est très plastique et consistante ( indice de consistance de 1,14 ).

L'analyse granulométrique de cette argile a été réalisée d'après la méthode proposée par le LCPC. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure II.2.

	Profondeur ( m )	W <sub>0</sub> %	$\gamma_h$ kN/m <sup>3</sup>	$\gamma_d$ kN/m <sup>3</sup>	W <sub>L</sub> %	W <sub>P</sub> %	I <sub>p</sub> %	I <sub>c</sub> %	e <sub>0</sub>
Valeurs	32	26,5	18,6	15,27	70	35	35	1,11	0,715
		à	à	à	à	à	à	à	à
		35	20,3	16,87	85	37	50	1,17	0,926
Nombre d'essais	à	32	25	25	5	5	5	5	7
Moyennes	45	31	19,45	16,07	79	36	42,5	1,14	0,821

Tableau II.2 : - Caractéristiques géotechniques de l'argile étudiée

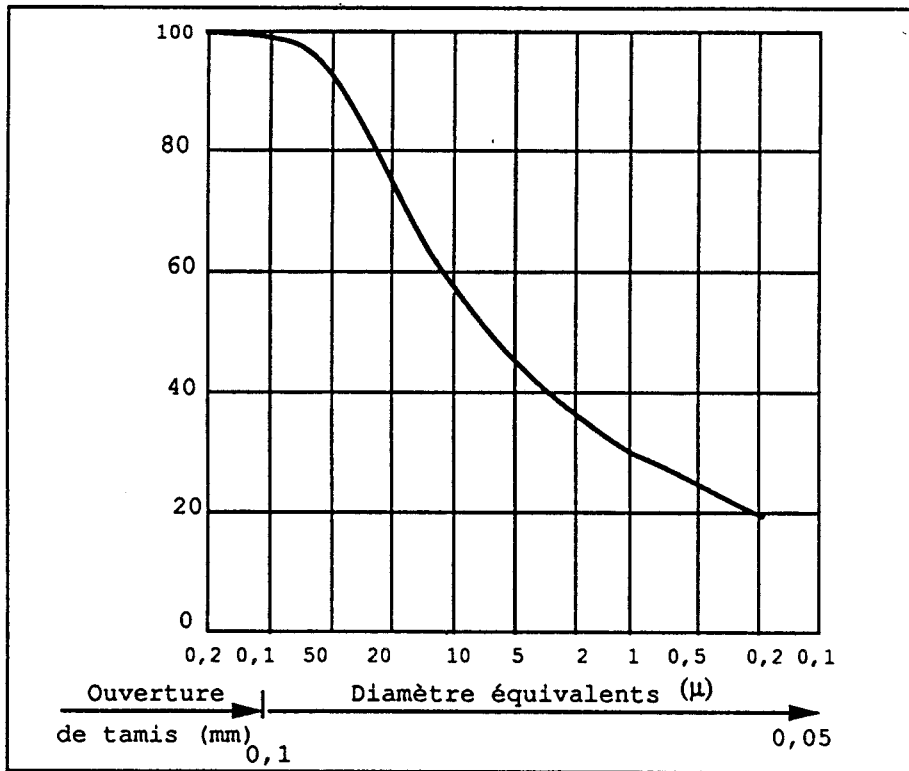


Figure II.2 : - Courbe d'analyse granulométrique

### II.5- Composition minéralogique

L'analyse minéralogique a été effectuée au Laboratoire de Dynamique Sédimentaire et Structurale (Université des Sciences et Technologies de Lille). Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau II.3. On constate que la smectite (forme de la montmorillonite) et l'illite composent la majeure partie de cette argile. Ils en présentent respectivement 60 et 24 %.

Du fait que la smectite est très gonflante on s'attend à ce que l'argile étudiée soit également gonflante.

minéraux	proportion %	état
Smectite	60	bien cristallisé
Illite	24	bien cristallisé
Kaolinite	10	bien cristallisé
Chlorite	5	cristallisé
Quartz	rare	trace

Tableau II.3 : - Composition minéralogique de l'argile des Flandres

## II.6- Essais de gonflement libre

Nous avons réalisé une série d'essais de gonflement libre sur cinq échantillons prélevés à différentes profondeurs selon le mode opératoire décrit précédemment (I.2.1). Le tableau II.4 donne les résultats obtenus. On constate que l'indice de gonflement libre varie entre 50 et 65%.

D'après la classification proposée par Holtz et al (1956), cette argile peut être considérée comme moyennement gonflante.

N°. d'essai	Profondeur H (m)	Ig %	Dégré de gonflement d'après Holtz et al; 1956
1	33	54	Moyenne
2	35	62	
3	37	58	
4	40	50	
5	42	65	

Tableau II.4 : - Indice de gonflement libre ( Ig ) pour l'argile des Flandres



II.8 - Essais de cisaillement

Les caractéristiques de cisaillement de l'argile des Flandres ont été mesurées à la boîte de Casagrande selon le mode opératoire donné par le L.C.P.C.

Deux séries d'essais de type ( CD ) ont été réalisées (tableau II.5).

N°. essai	Ponfo- deur ( m )	Wi %	$\sigma$ Verticale ( kPa )				Vitesse de déformation (mm/min)
			200	300	400	500	
1	37	31,4	200	300	400	500	0,0018
2	40	28,9	200	300	400	500	

Tableau II.5 : - Les caractéristiques des essais de cisaillement.

Les figures II.3 et II.4 représentent l'évolution de la contrainte de cisaillement en fonction du déplacement tangentiel. A partir de ces courbes nous avons déterminé les caractéristiques de résistance de cette argile (C,  $\phi$ ).

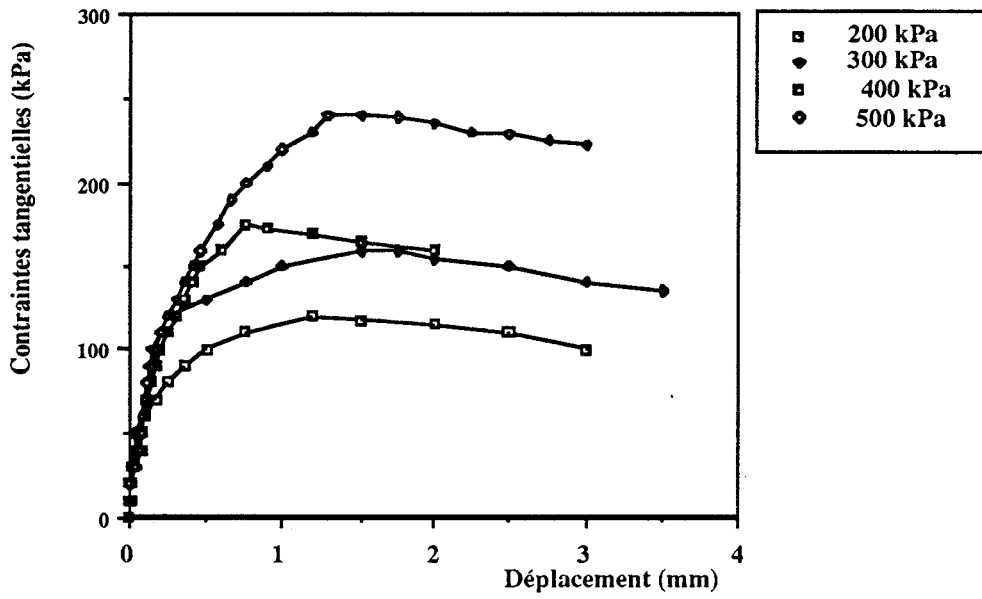


Figure II.3 : - Essai de cisaillement direct  
( H = 37 m )

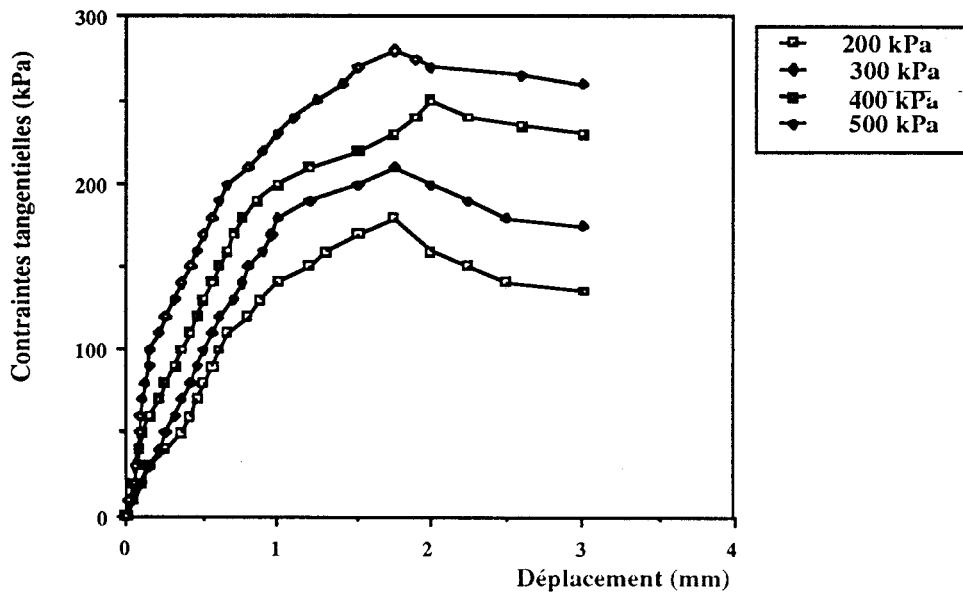


Figure II.4 : - Essai de cisaillement direct  
( H = 40 m )

Les figures II.5 illustre la détermination graphique de  $C$  et  $\Phi$ . On peut constater que l'angle de frottement est de l'ordre de  $19^\circ$  et que la cohésion est de l'ordre de  $78 \text{ kPa}$  ce qui confirme le caractère surconsolidé de cette argile.

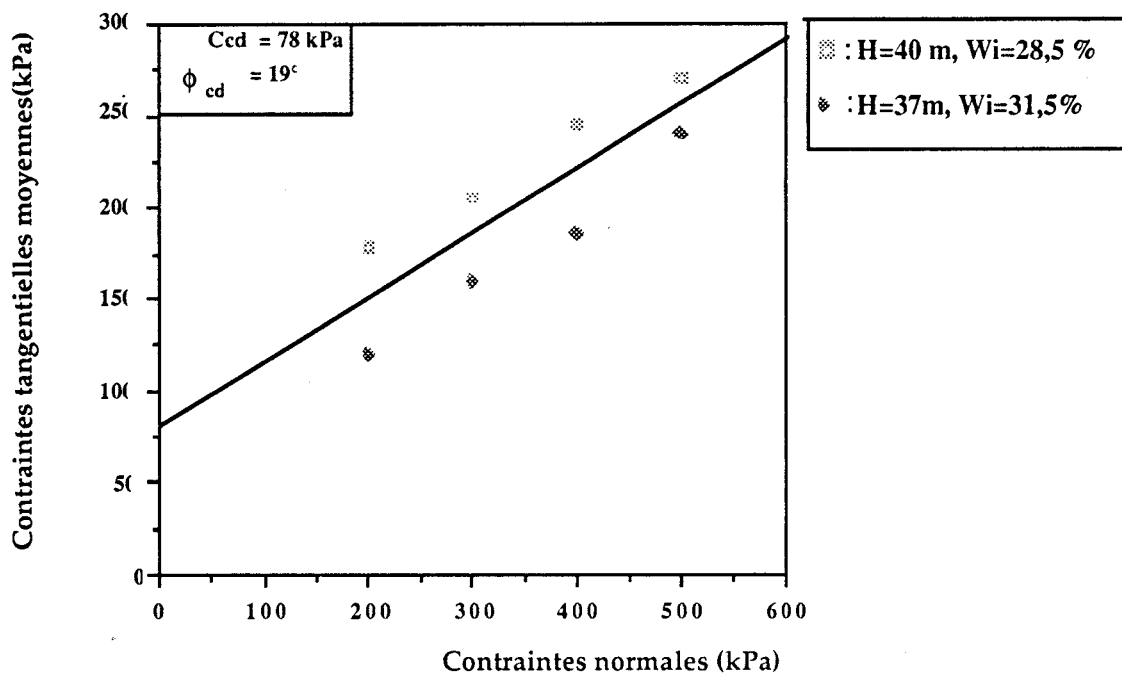


Figure II.5: -Détermination de  $C$  et  $\phi$

**CHAPITRE III :**

**ETUDE A L'ŒDOMETRE**

### III.1- Matériels d'essais

Les essais de gonflement libre ont été réalisés au Laboratoire Regional des Ponts et Chaussées (LRPC-Lille). Quant aux autres essais, ils ont été réalisés au Département Sols-Structure du Laboratoire de Mécanique de Lille.

Le L.R.P.C. dispose de cellules œdométriques type (M&O) Monroge, équipées de deux comparateurs au 1/100<sup>e</sup> de millimètre et d'un capteur de déplacement type L50 fabriqué par L.N.C.

Le Laboratoire de Mécanique de Lille dispose de cellules œdométriques type WYKEHAM FRANCE classique (diamètre :  $\phi = 50$  mm) qui ont été modifiées en vue de la réalisation des essais avec différentes hauteurs d'échantillon (12, 24, 36, 44 et 54 mm). Le bâti a été également modifié pour la réalisation des essais à volume constant ( figureIII.1).

L'instrumentation de cet œdomètre comporte :

- Un capteur de déplacement rectiligne à transformateur différentiel LVDT . Il est du type L50 fabriqué par LNC. Ses caractéristiques sont:

\*linéarité : 0,2 % de la pleine échelle,

\*course : 50 mm,

- Un capteur de force type N 1370 fabriqué par B.e.t.a., mode traction-compression, dont les caractéristiques sont:

- étendue de mesure : 500 daN

-surcharge admissible : 750 daN

-écart de linéarité : <+ 0.05%de l'e.m.

- plage d'utilisation en température : 0°C à +80°C

- précision : < + 0.05 % de l'e.m.

Le système d'acquisition et de commande est composé :

- d'une centrale d'acquisition HP 3497A,
- d'un micro-ordinateur,
- d'un logiciel d'acquisition et de traitement des données.

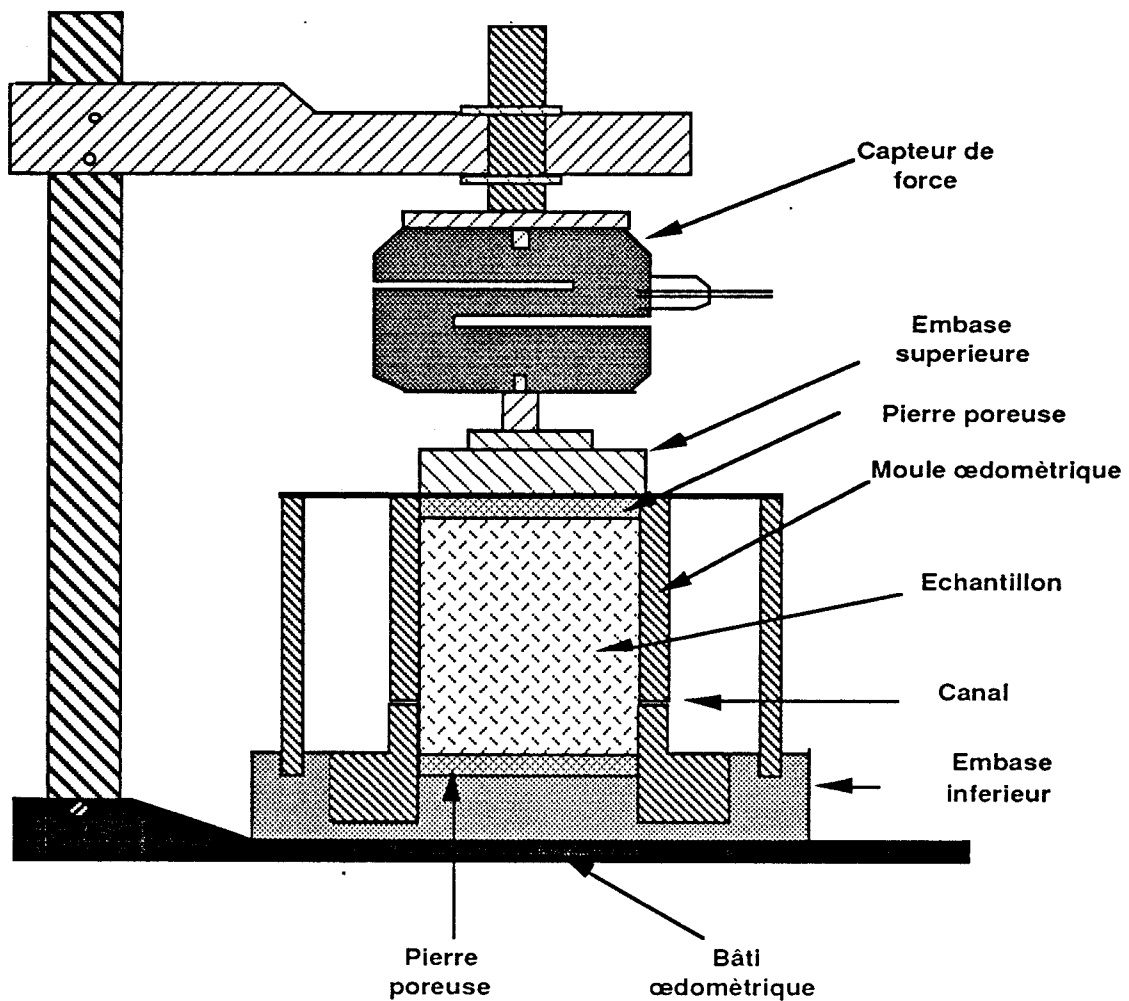


Figure III.1 : - Oedomètre utilisé au Laboratoire de Mécanique de Lille

## III.2- Mode opératoire

### III.2.1-Préparation de l'échantillon

L'échantillon est taillé de façon à avoir le diamètre intérieur du moule œdométrique. Les parois du moule sont graissées, le circuit d'eau est vérifié et saturé. L'échantillon est placé entre deux pierres poreuses. Pour éliminer, en partie, les effets du prélèvement, l'échantillon est soumis à un cycle de chargement-déchargement dont l'amplitude est égale à la contrainte verticale en place ( $\sigma_0 = \gamma.H$ ).

### III.2.2-Mesures

Pendant le gonflement, on mesure, selon le type d'essais, la variation de l'hauteur ( $\Delta h$ ) à l'aide d'un capteur de déplacement ou la variation de la force normale à l'aide d'un capteur de force.

L'essai est arrêté quand on observe une stabilisation : pour les essais à gonflement libre, la stabilisation est jugée atteinte quand la variation pendant 24 heures de  $\Delta h/h$  est inférieure à 0,01% (Didier 1972). Pour l'essai à déformation imposée, on considère que la stabilisation est atteinte quand la variation pendant 24 heures de la contrainte axiale est inférieure à 1 kPa.

Les essais ont été réalisés dans une chambre climatisée pour éviter les variations de température.

### III.3- Essais de gonflement libre

#### III.3.1-Essais réalisés et résultats

Nous avons réalisé deux séries d'essais sur des échantillons de 12 mm d'épaisseur. Le tableau III.1 donne les caractéristiques des échantillons étudiés.

- La première série d'essais comporte quatre échantillons prélevés à 43 m de profondeur avec une teneur en eau de 27,5%. La figure III.2 représente l'évolution de la déformation  $\Delta h/h_0$  en fonction du temps. On constate que la majeure partie du gonflement a lieu pendant les 30 premières heures, et que la stabilisation de la déformation est atteinte au bout d'une semaine. Le potentiel de gonflement à la stabilisation est de 9,1 %. Les résultats obtenus montrent des écarts sensibles entre les différents essais au niveau de l'évolution du potentiel de gonflement. Mais à la stabilisation, on observe un bon accord entre ces essais. La figure III.3 donne l'évolution de la valeur moyenne du potentiel de gonflement.

- La deuxième série comporte six échantillons prélevés à 40 m. La figure III.4 donne l'évolution du gonflement ( $\Delta h/h_0$ ) en fonction du temps. La figure III.5 présente l'évolution de la valeur moyenne de ces essais. On constate que la valeur moyenne du potentiel de gonflement est de l'ordre 6.6 % .



N°. série	Nombre d'essais	Profondeur H ( m )	Teneur en eau initiale $W_i$ %	Epaisseur $h_0$ ( mm )	Potentiel de gonfleme %
1	4	43	27,5	12	9,1
2	6	40	29,4	12	6,6

Tableau III.1: - Caractéristiques des échantillons étudiés  
( Méthode du gonflement libre )

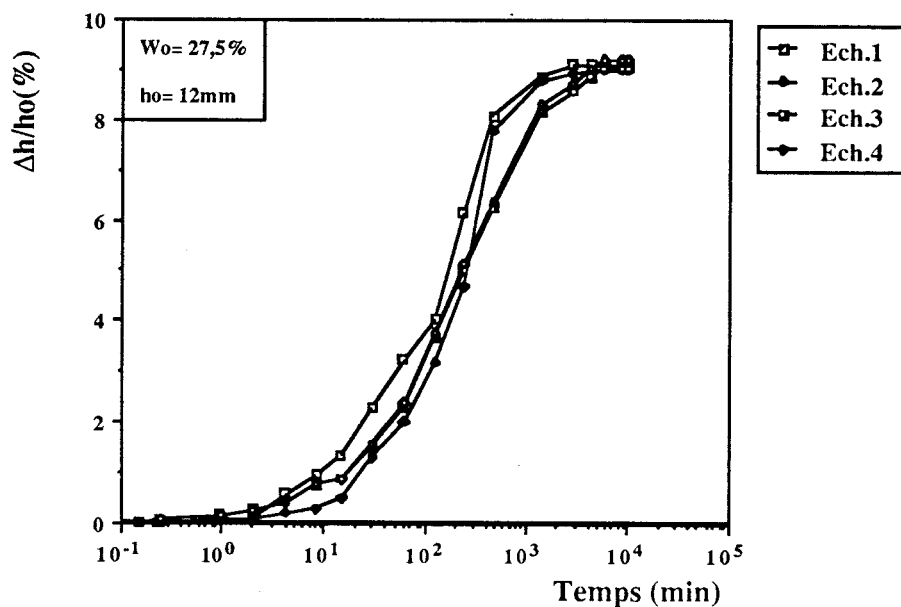


Figure III.2: - Courbes d'évolution de la déformation en fonction du temps ( H = 43 m ) ( Gonflement libre )

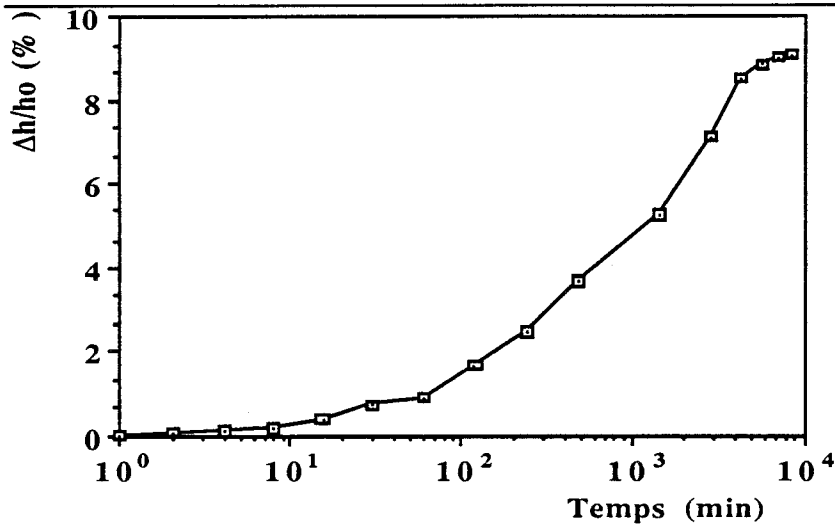


Figure III.3 : - Evolution de la déformation moyenne en fonction du temps (première série)

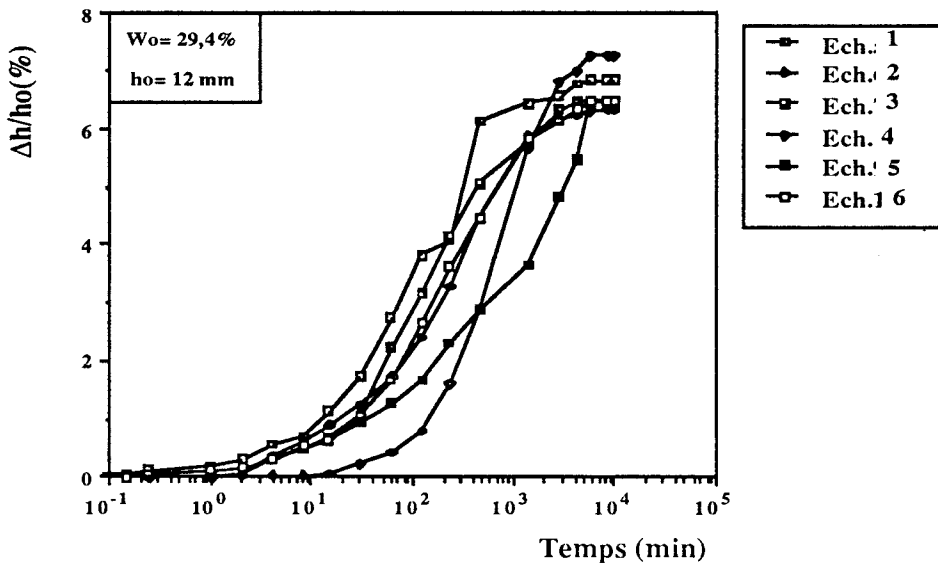


Figure III.4 : - Courbes d'évolution de la déformation en fonction du temps ( H = 40 m )

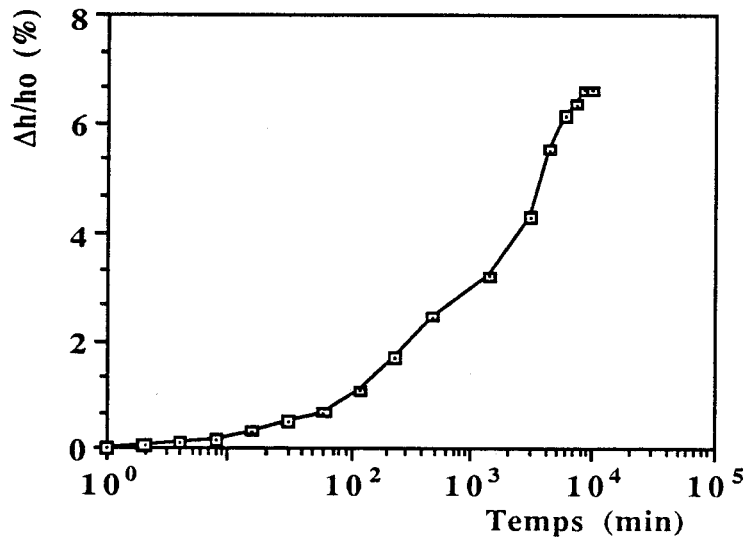


Figure III.5: - Evolution de la déformation moyenne en fonction du temps ( deuxième série )

### III.4-Essais aux pressions différentes

#### III.4.1 - Description de l'essai

Cet essai a pour but la détermination indirecte de la pression de gonflement . Il est effectué selon le mode opératoire suivant :

-Des échantillons sont préparés selon le mode opératoire donné en section ( I.2.2 ).

-Ces échantillons sont soumis à des contraintes verticales initiales différentes.

-On mesure pour chaque échantillon la variation  $\Delta h$  (tassement ou gonflement) jusqu'à la stabilisation.

-On trace la courbe représentant la valeur de l'indice des vides à la stabilisation en fonction de la contrainte appliquée. L'abscisse de l'intersection de cette courbe avec la droite ( $e = e_0$ ) donne la contrainte de gonflement.

#### III.4.2 - Essais réalisés et résultats

Nous avons réalisé trois séries d'essais. Le tableau III.2 donne les caractéristiques des échantillons étudiés.

- La première série comporte six échantillons identiques prélevés à 32m de profondeur avec une teneur en eau initiale de 32,5 %. Les contraintes verticales retenues sont de 5 , 50 ,100 , 150 , 200 et 250 kPa . La figure III.6 illustre les variations de l'indices des vides au cours des essais de gonflement.

-La deuxième série comporte six échantillons identiques prélevés à 38m de profondeur avec une teneur en eau initiale de 30%. Les contraintes verticales retenues sont de 5 , 50 , 100 , 150 , 450 , et 900 kPa.

-La troisième série comporte six échantillons identiques prélevés à 43m de profondeur, avec une teneur en eau initiale de 27,7%. Les contraintes verticales retenues sont de 5, 50, 100, 150, 450 et 900 kPa.

Les figures III.7 à III.9 donnent, pour les trois séries d'essais, la valeur de l'indice des vides à la stabilisation en fonction de la contrainte normale appliquée. La pression de gonflement obtenue est donnée dans le tableau III.3. On constate que cette pression dépend sensiblement de la profondeur : elle passe de 195 à 320 kPa quand la profondeur de prélèvement passe de 32 à 43 m.

Chapitre III : Etude à l'œdomètre

N° série	Contrainte appliquée en kPa	Profondeur H m	Teneur en eau initiale Wi %	Indice des vides eo
1	5	32	32,5	0,926
	50			
	100			
	150			
	200			
	250			
2	5	38	30	0,910
	50			
	100			
	150			
	450			
	900			
3	5	43	27,7	0,850
	50			
	100			
	150			
	450			
	900			

Tableau III.2 : - Caractéristiques des échantillons étudiés  
( méthode aux pressions différentes )

N° série	Profondeur H (m)	Pression de gonflement Pg (kPa)
1	32	195
2	38	290
3	43	320

Tableau III.3 : Pression de gonflement  
( méthode aux pressions différentes )

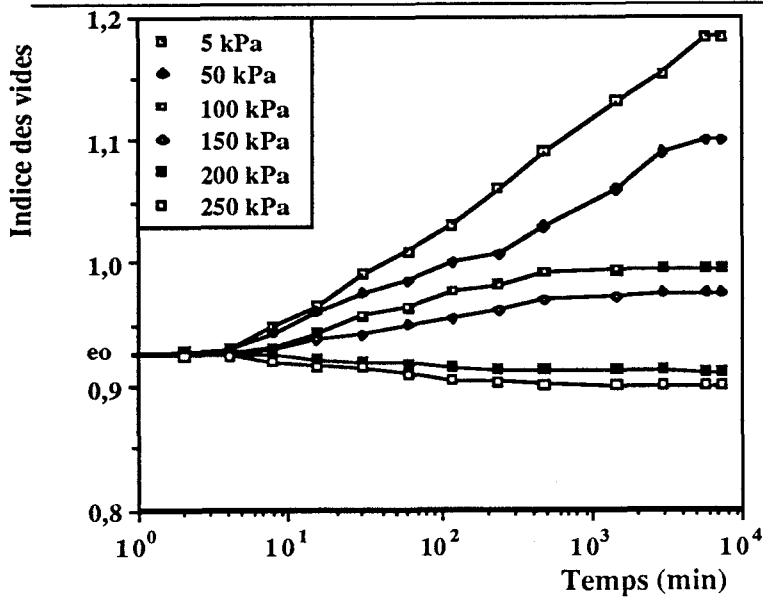


Figure III.6 : - Variation de l' indice des vides en fonction du temps  
( H = 32 m )

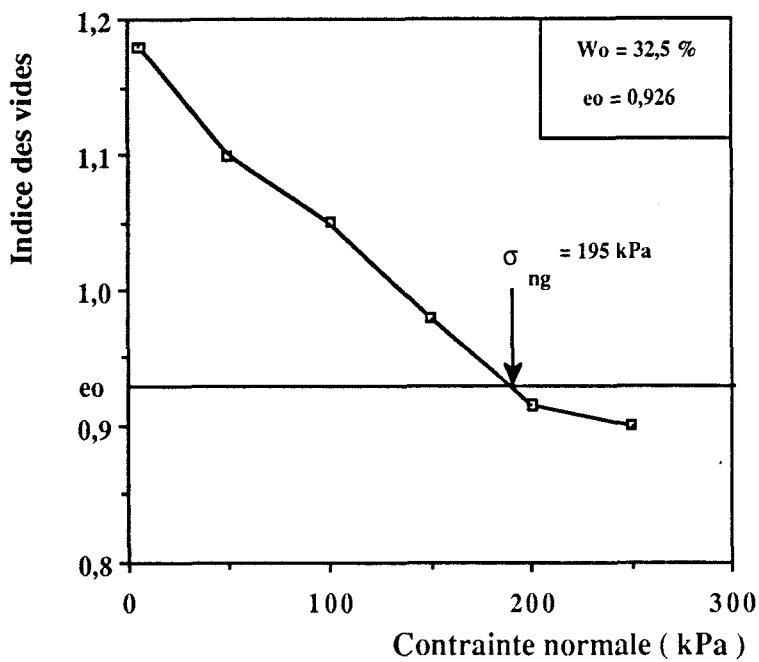


Figure III.7 : - Détermination de la pression de gonflement  
( méthode aux pressions différentes )  
( H = 32 m )

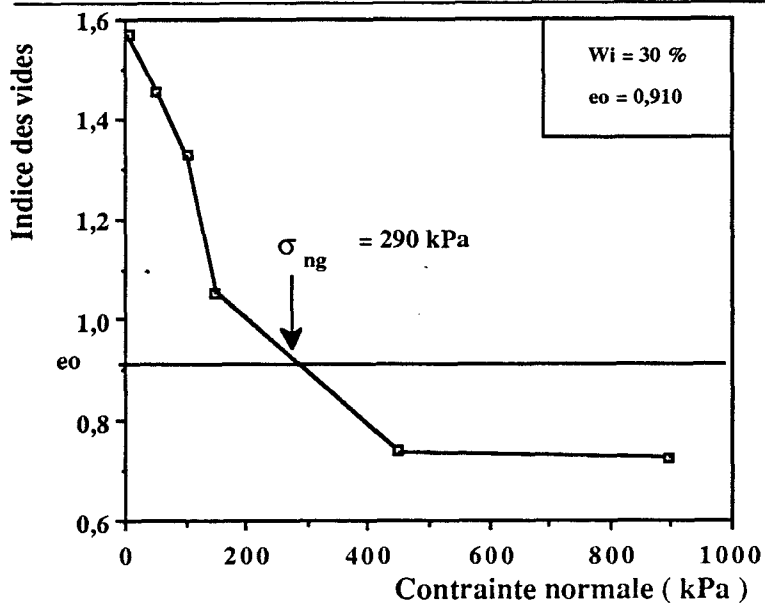


Figure III.8 : - Détermination de la pression de gonflement  
( méthode aux pression différentes )  
(  $H = 38 \text{ m}$  )

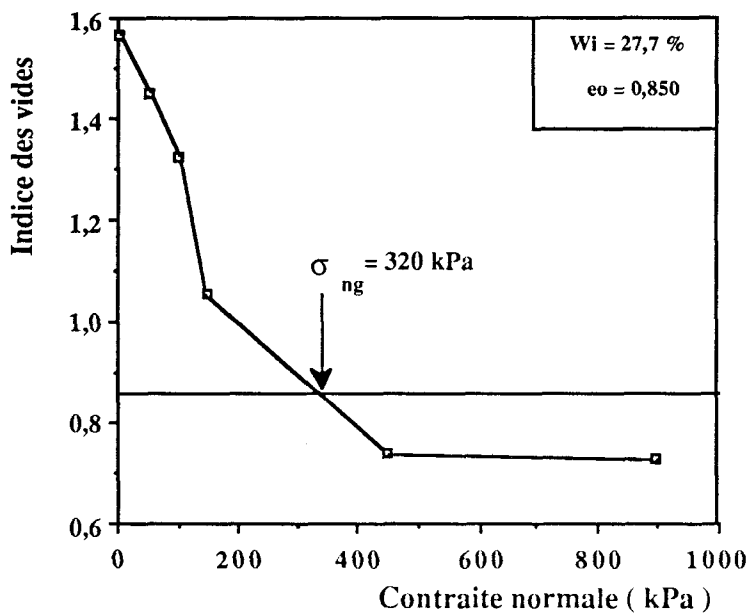


Figure III.9: - Détermination de la pression de gonflement  
( méthode aux pressions différentes )  
(  $H = 43 \text{ m}$  )



### III.5- Méthode du prégonflement

#### III.5.1 - Mode opératoire

Le mode opératoire comporte les phases suivantes:

- La préparation de l'échantillon se déroule comme précédemment.
- L'échantillon est placé dans la cellule œdométrique sous une contrainte verticale de 5 kPa ( poids du piston).

-On met l'échantillon en contact avec le circuit de saturation et on mesure le gonflement ( $\Delta h$ ) en fonction du temps jusqu'à la stabilisation de la déformation verticale.

-On charge l'échantillon par paliers, pour annuler la déformation générée.

-On trace la courbe de variation ( $\Delta h/h_0$ ) en fonction de la contrainte appliquée. L'intersection de la courbe de chargement avec l'axe des contraintes donne la pression de gonflement.

#### III.5.2 - Essais réalisés et resultats

Nous avons réalisé trois séries d'essais avec trois épaisseurs d'échantillon différentes. Le tableau III.4 regroupe les caractéristiques des échantillons étudiés. Les figures III.10 à III.12 donnent l'évolution de  $\Delta h/h_0$  en fonction de la contrainte appliquée. On constate que la pression de gonflement varie entre 300 et 360 kPa.

N°. d'essais	Profondeur H ( m )	Teneur en initiale $W_i$ %	Epaisseur $h_0$ ( mm )	Pression de gonflement kPa
1	34	30,5	12	300
2	40	28,7	24	360
3	38	29,6	44	320

Tableau III.4: - Caractéristiques des échantillons étudiés  
( méthode du prégonflement )

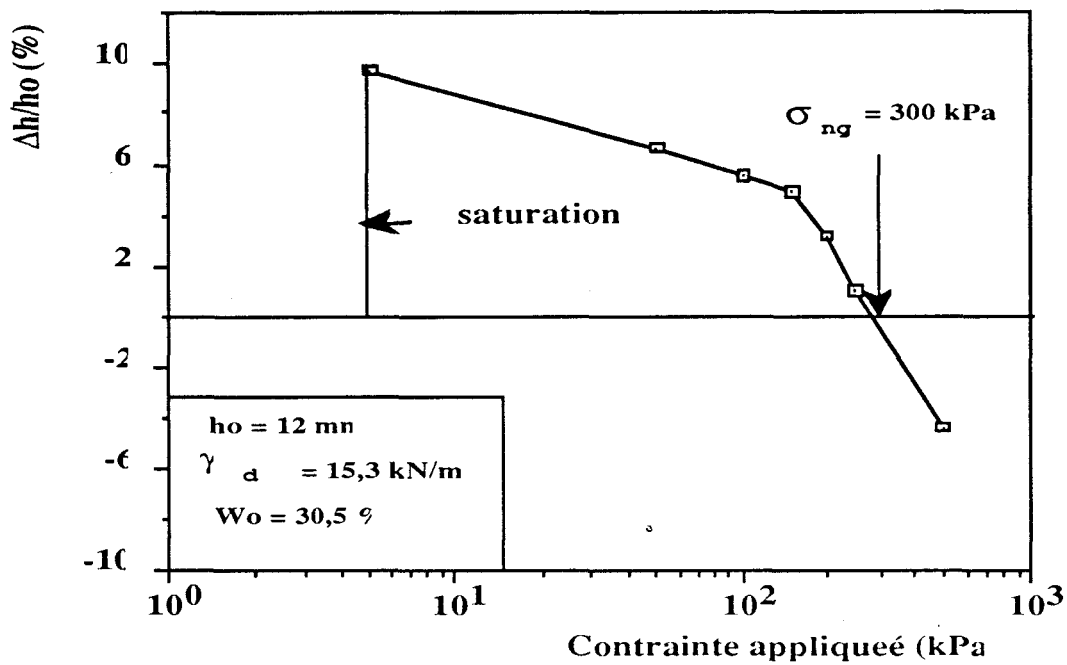


Figure III.10: - Détermination de la pression de gonflement  
( méthode du prégonflement )  
( H = 34 m ,  $h_0 = 12$  mm )

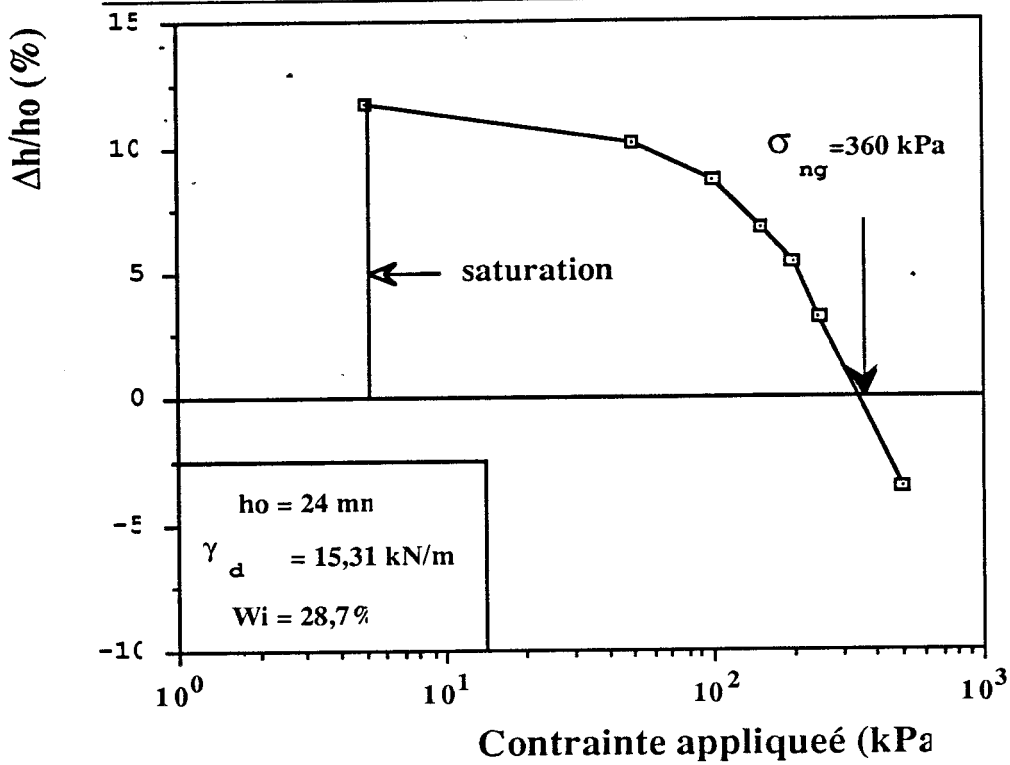


Figure III.11 : - Détermination de la pression de gonflement  
(méthode du prégonflement)  
(H = 40 m , ho = 24 mm)

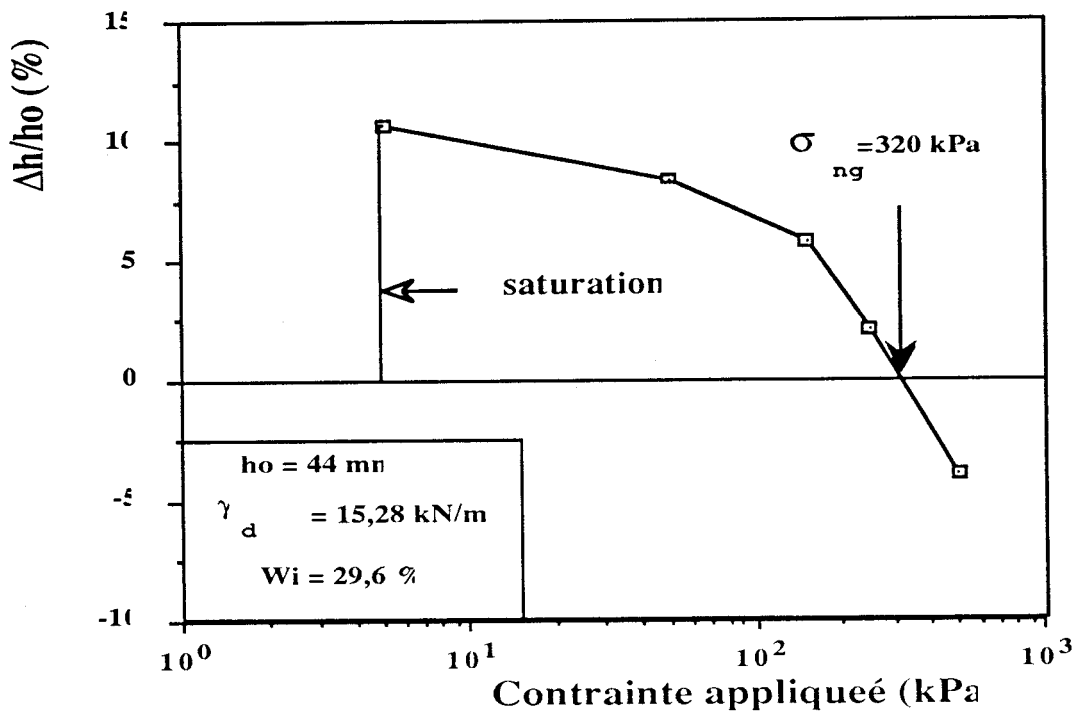


Figure III.12 : - Détermination de la pression de gonflement  
(méthode du prégonflement)  
(H = 38 m , ho = 44 mm)

## III.6 - Méthode directe

### III.6.1-Mode Opératoire

La préparation de l'échantillon se déroule comme précédemment.

La deuxième phase porte sur les trois points suivants:

- La déformation axiale de l'échantillon est bloquée afin d'imposer un volume constant pendant l'essai.

- L'échantillon est mis en contact avec le circuit de saturation.

- L'évolution de la contrainte axiale est mesurée à l'aide d'un capteur de force jusqu'à la stabilisation .

La contrainte axiale mesurée correspond à la pression de gonflement .

La méthode directe présente des avantages par rapport aux autres méthodes étudiées précédemment, notamment dans l'élimination du frottement entre le moule et l'échantillon.

### III.6.2- Essais réalisés et résultats

Nous avons réalisé une série d'essais, sur des échantillons prélevés à différentes profondeurs (33, 35, 40 et 42 m.).

Le tableau III.5 regroupe les données initiales des essais et les résultats obtenus. Les figures III.13 à III.16 montrent les variations de la

contrainte axiale au cours du gonflement. On constate que la pression de gonflement varie entre 116 et 275 kPa.

Deux facteurs interviennent au niveau de la pression de gonflement: la profondeur du prélèvement et la hauteur de l'échantillon. Leurs effets seront analysés dans le chapitre V.

N°. d'essai	Profondeur H (m)	Wo %	$\gamma_d$ kN/m <sup>3</sup>	ho (mm)	Pression de gonflement finale (kPa)
1	33	32	15,4	12	116
2	35	30	15,5	24	190
3	40	28,5	15,7	44	210
4	42	27	15,6	54	275

Tableau III.5 : - Données initiales et résultats obtenus  
( méthode directe )

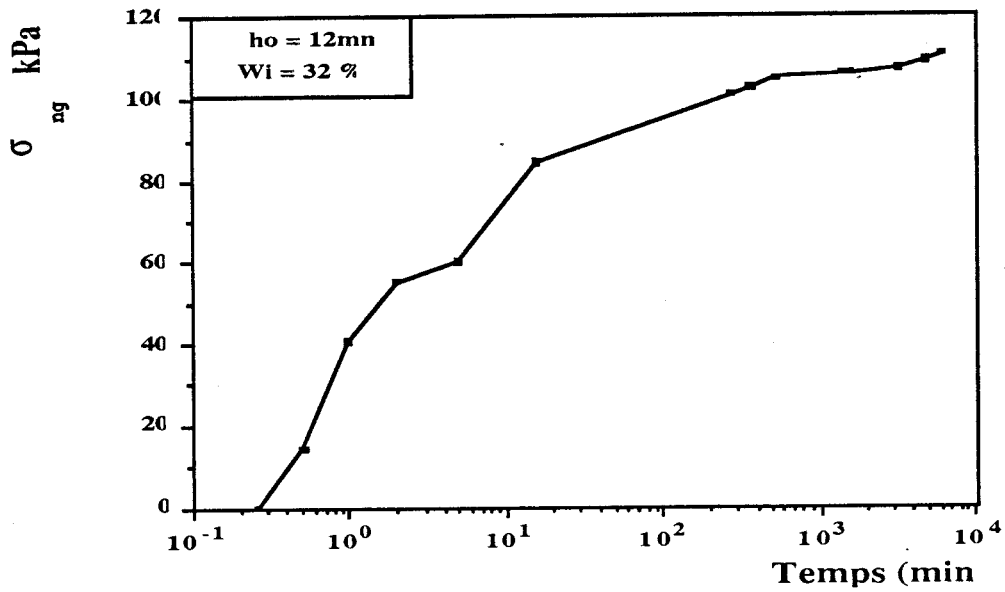


Figure III.13 : - Evolution de la pression de gonflement  
( méthode directe ) ( H = 33 m )

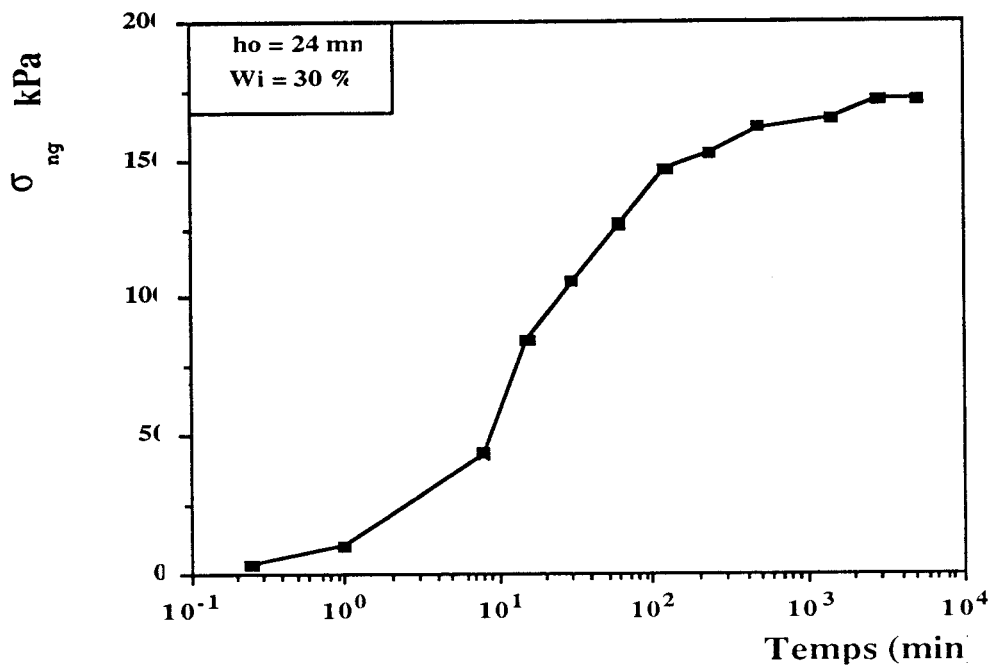


Figure III.14 : - Evolution de la pression de gonflement  
( méthode directe ) ( H = 35 m )

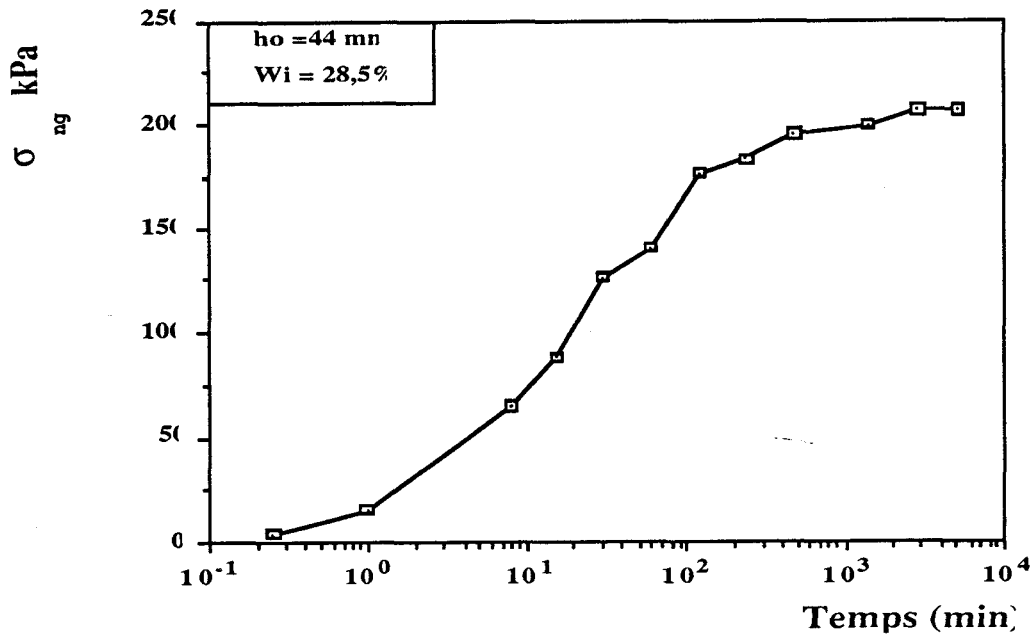


Figure III.15: - Evolution de la pression de gonflement (méthode directe) (H = 40 m)

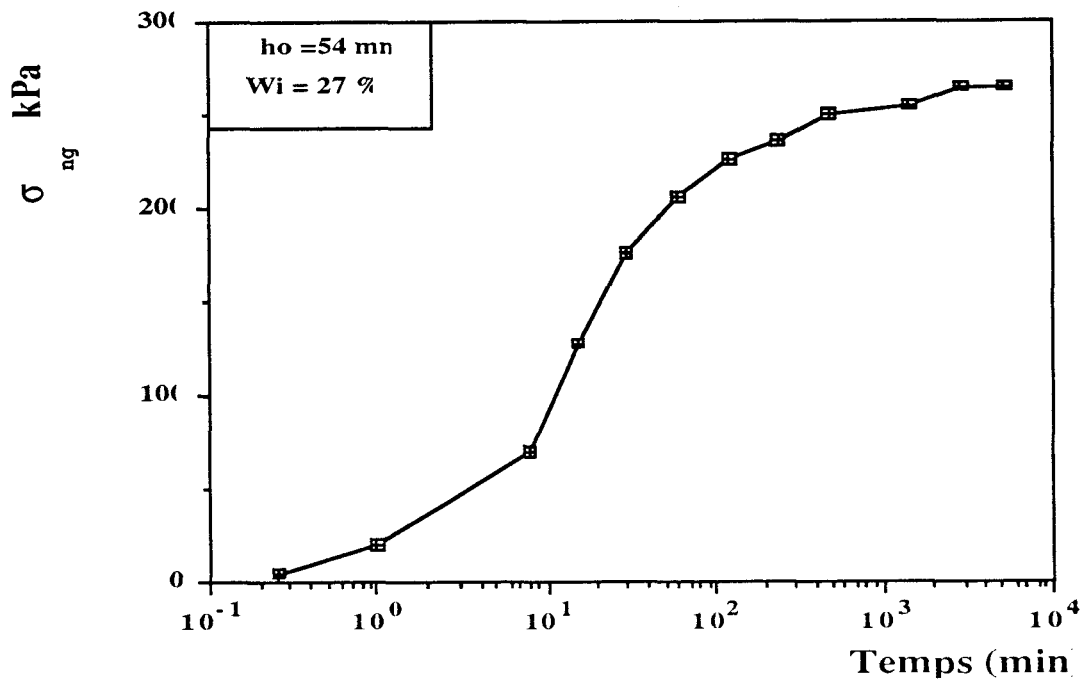


Figure III.16: - Evolution de la pression de gonflement (méthode directe) (H = 42 m)

### III.7 - Comparaison entre les différentes méthodes

La figure III.17 donne une récapitulation des résultats obtenus avec les différentes méthodes. On constate que les pressions de gonflement obtenues avec les méthodes directe et aux pressions différentes peuvent varier du simple au double. Ceci peut être attribué à l'effet de certains paramètres sur le gonflement, notamment la profondeur du prélèvement, l'épaisseur de l'échantillon et la teneur en eau initiale. L'analyse de l'effet de ces paramètres sera présentée au chapitre V. On note cependant que la méthode directe donne des pressions de gonflement les plus faibles. ceci peut être expliqué en partie par le phénomène de relaxation. La méthode de prégonflement donne les pressions de gonflement les plus élevées, ceci peut être attribuée à l'effet du frottement entre l'échantillon et le moule et au chargement rapide pour revenir à l'état initial. On peut considérer que, selon la méthode utilisée et l'état de l'échantillon testé, la pression de gonflement de cette argile varie entre 120 et 360 kPa.



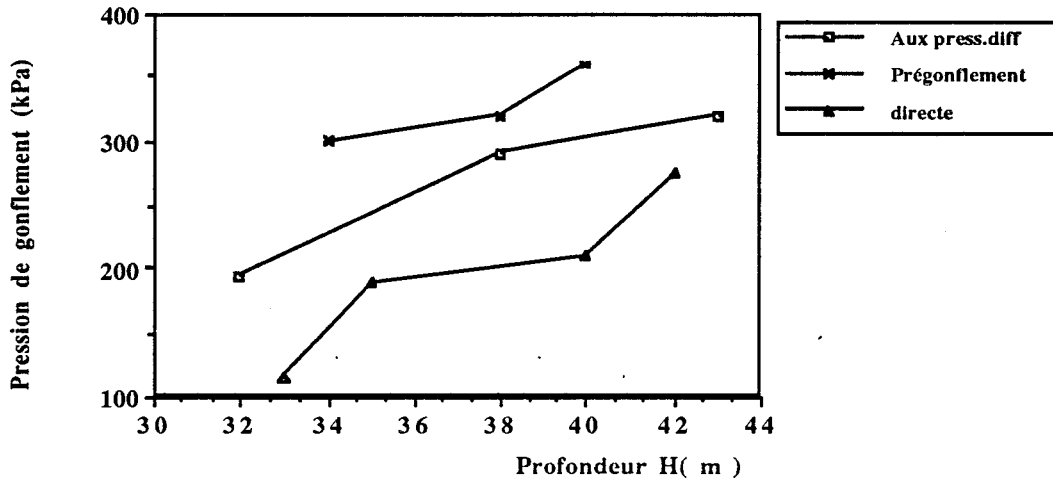


Figure III.17: - Récapitulation des résultats obtenus avec les différentes méthodes

### III.8 : - Simulation des essais de gonflement libre

Pour étudier l'évolution du gonflement ( $\Delta h/h_0$ ) en fonction du temps, nous allons utiliser le modèle proposé par Vayssade (1978). Ce modèle considère le gonflement comme une fonction hyperbolique du temps:

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

Où:

$h_0$  est hauteur initiale de l'échantillon,

$\Delta h/h_0$  le gonflement de l'échantillon,

G et B sont deux paramètres (G représente le gonflement final ( $\Delta h/h$ )<sub>f</sub> et B représente le temps pour lequel 50% du gonflement est atteint).

Les paramètres G et B peuvent être déterminés facilement. En effet, l'équation précédente peut être écrite sous la forme:

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

On remarque que dans le plan ( t, t/( $\Delta h/h_0$ )) la relation précédente est représentée par une droite de pente 1/G et dont l'intersection avec l'origine est B/G.

Ce modèle a été appliqué à trois séries d'essais de gonflement libre. Les figure III.18 à III.20 illustrent la régression linéaire pour la détermination des paramètres. Le tableau III.6 donne les valeurs des paramètres trouvées et les valeurs de ( $\Delta h/h_0$ )<sub>f</sub> et  $t_{0,50}$  déterminées directement à partir des essais. On constate un bon accord entre G et ( $\Delta h/h_0$ )<sub>f</sub> et entre B et  $t_{0,50}$ .

La simulation des trois séries d'essais est illustrée dans les figures III.21 à III.23. On constate que le modèle décrit bien l'évolution du gonflement au cours du temps.

N° : série	Nb.d'essais par série	Profendeur H (m)	Epaisseur ho (m)	G %	B ( min )
1	4	43	12	9,2	450
2	6	40	12	6,6	720
3	3	32	24	5,7	320

Tableau III.6 : - Détermination des paramètres du gonflement  
( Modèle hyperbolique )

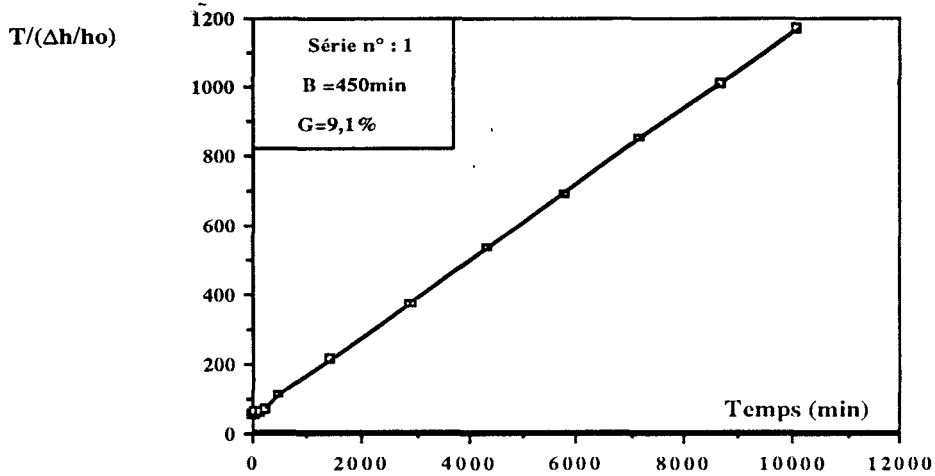


Figure III.18 : - Détermination des paramètres de la loi hyperbolique  
( 1<sup>er</sup> série )

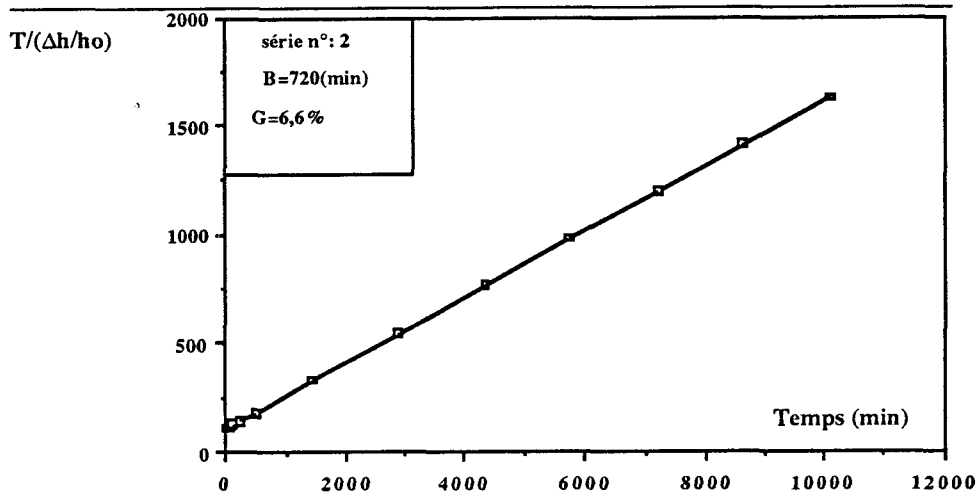


Figure III.19: - Détermination des paramètres de la loi hyperbolique (2ème série)

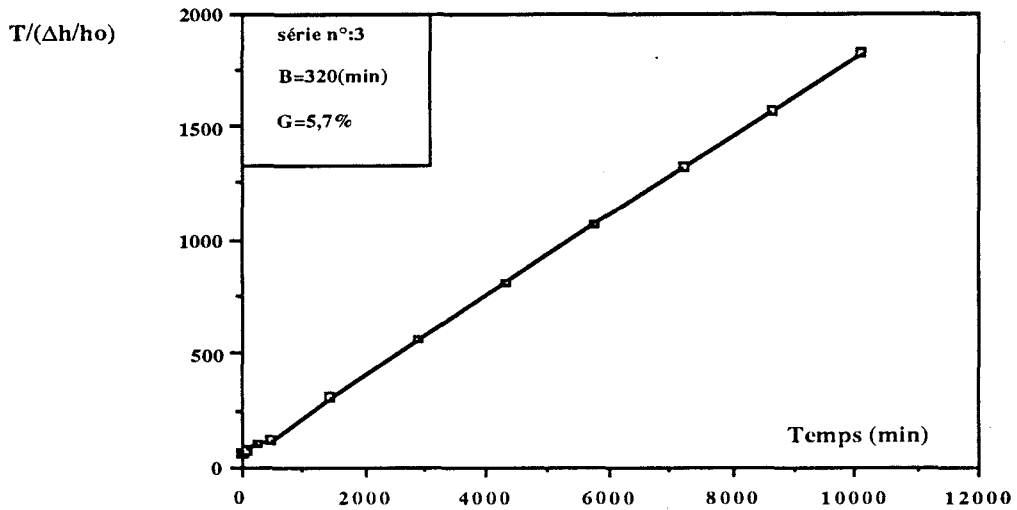


Figure III.20: - Détermination des paramètres de la loi hyperbolique (3ème série)

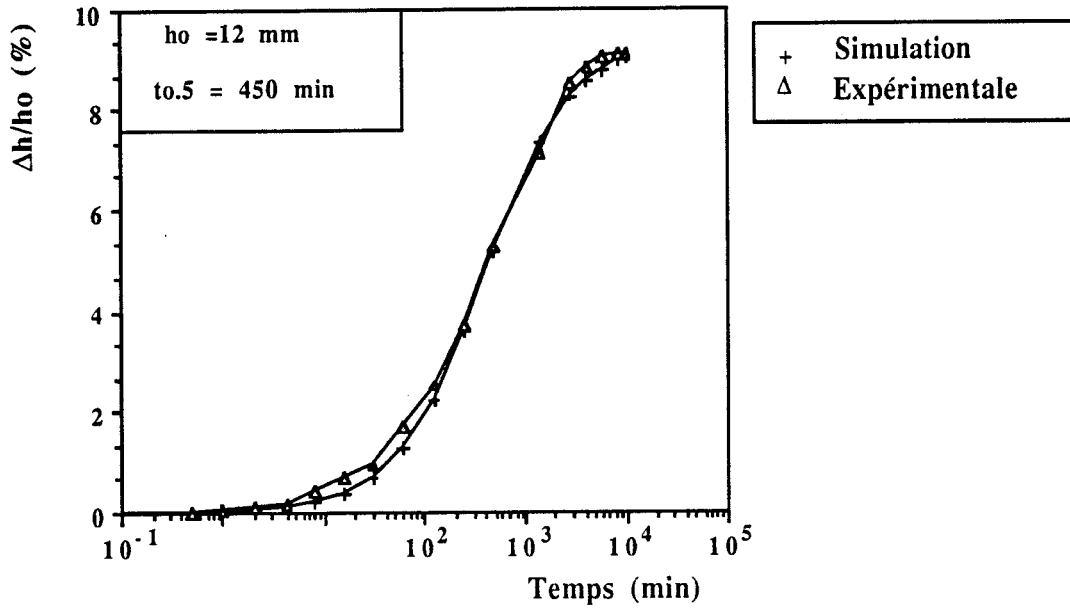


Figure III.21 : - Simulation d'un essai de gonflement avec la loi hyperbolique ( 1<sup>ère</sup> série )

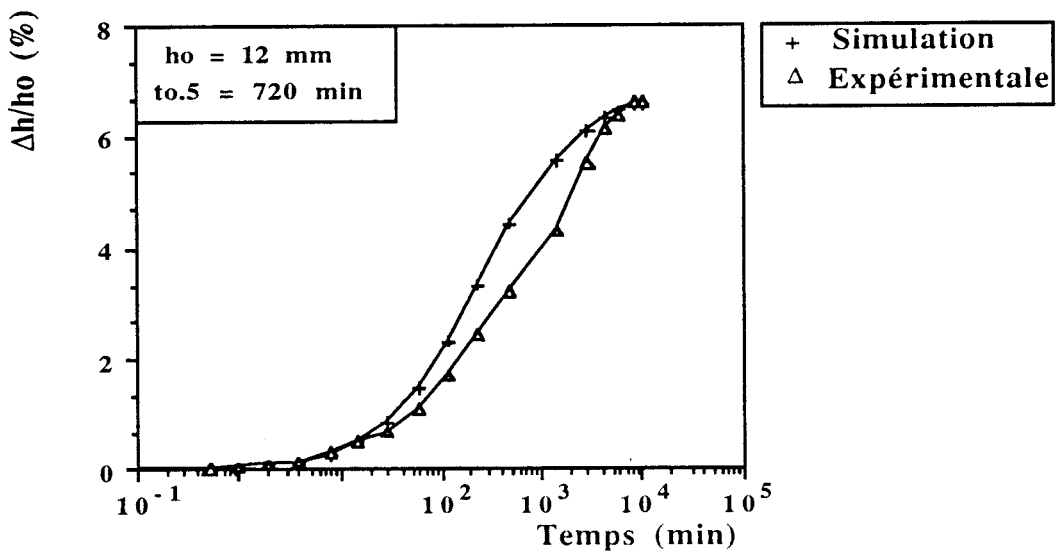


Figure III.22 : - Simulation d'un essai de gonflement avec la loi hyperbolique ( 2<sup>ème</sup> série )

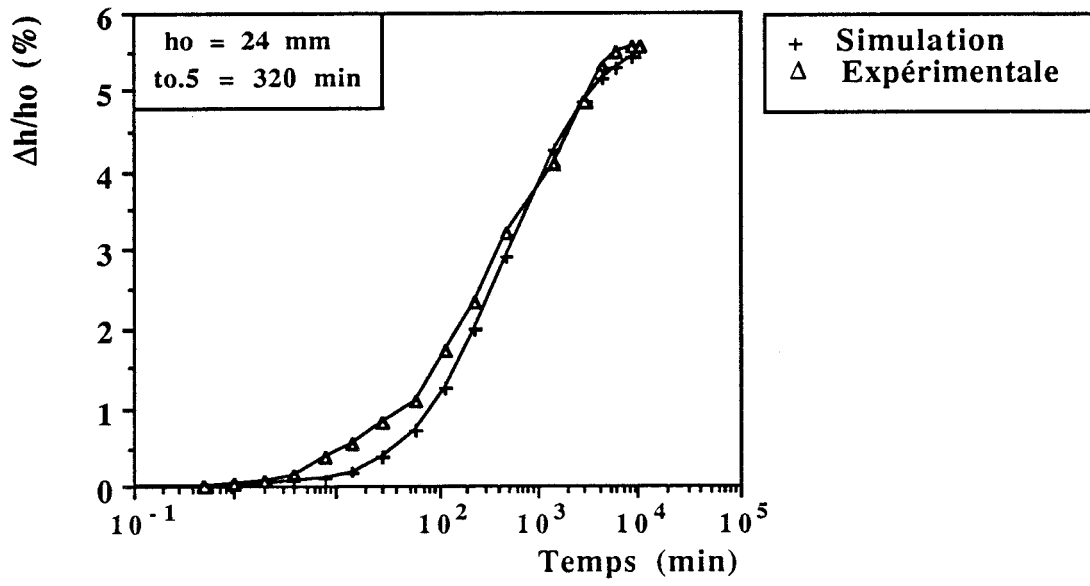


Figure III.23 : - Simulation d'un essai de gonflement avec la loi hyperbolique ( 3<sup>ème</sup> série )

**CHAPITRE IV :**

**ETUDE A L'APPAREIL TRIAXIAL**

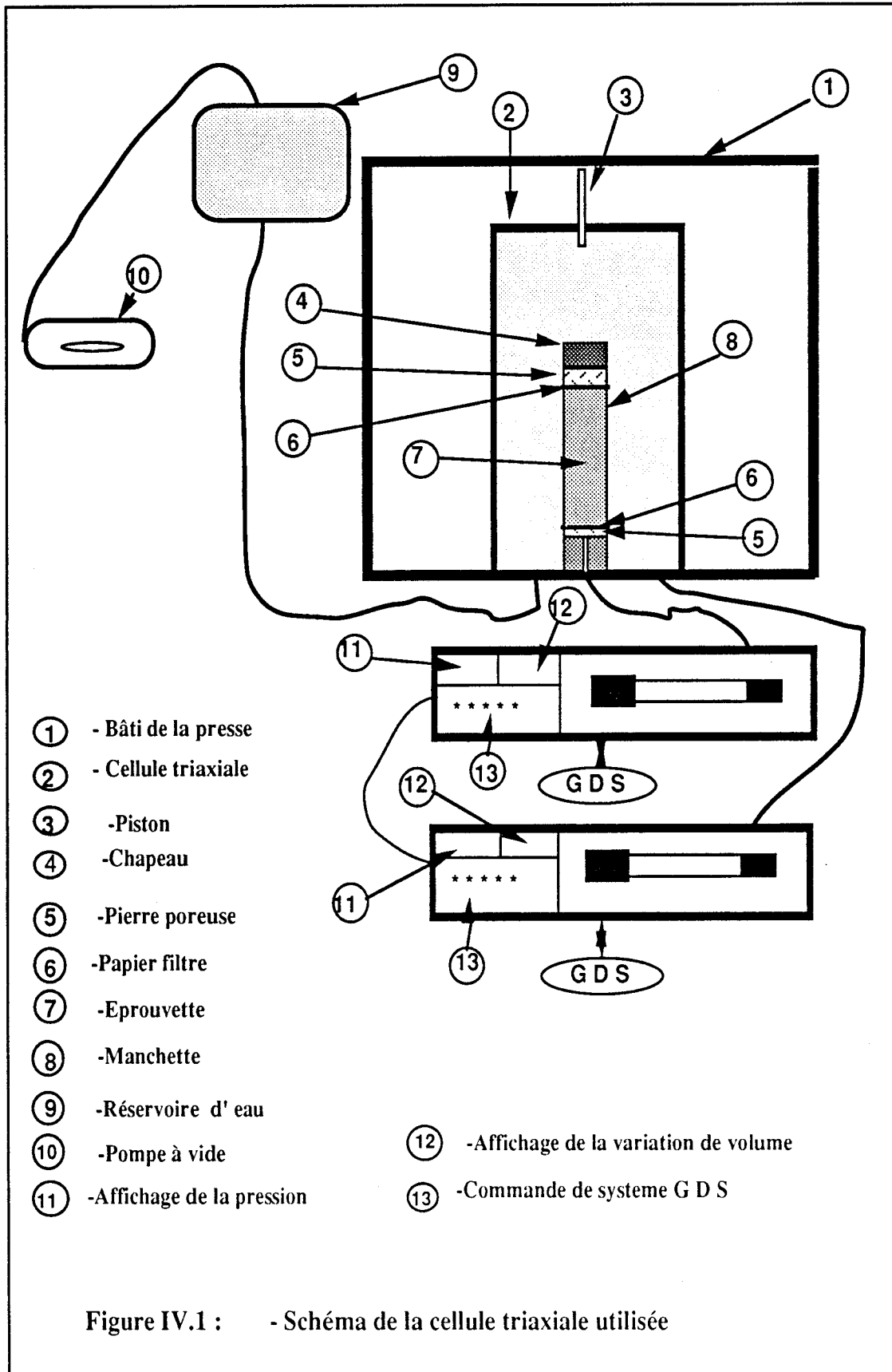
### IV.1 - Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les résultats des essais de gonflement libre et de prégonflement réalisés à l'appareil triaxial. Seuls les essais isotropes seront présentés car des difficultés ont été rencontrées dans les essais anisotropes.

### IV.2 - Matériels d'essais

Les essais ont été réalisés dans le Département Sols-Structures du Laboratoire de Mécanique de Lille sur une presse triaxiale type TRITECH WF 10056 ( WYKEHAM FARANCE ) de capacité 50 kN. Une cellule triaxiale classique (diamètre de l'échantillon:  $\varnothing=36\text{mm}$ ) a été utilisée. Elle est équipée d'un capteur de force type WF 17104 fabriqué par WYKEHAM FARANCE mode traction-compression de capacité 5 kN. La mise en pression est assurée par deux contrôleurs digitaux de pression et volume type **G D S** qui permettent de travailler en pression ou en volume imposés. Les **G D S** ont une capacité de  $200\text{ cm}^3$  et permettent d'appliquer une pression allant jusqu'à 2 MPa. Ils ont une résolution de 0,25 kPa en pression et de  $1\text{ mm}^3$  en variation de volume. Ils fonctionnent de façon autonome ou peuvent être contrôlés par ordinateur. La figure IV.1 représente le dispositif expérimental utilisé.





### IV.3 - Mode opératoire

#### *-Préparation de l'échantillon*

Le mode opératoire comporte les étapes suivantes:

- l'échantillon est taillé à un diamètre de 36 mm avec un élanement unitaire,
  - le circuit d'eau est vérifié et saturé,
  - l'échantillon est placé entre deux pierres poreuses,
  - les joints toriques et la manchette sont placés,
  - la cellule est remplie d'eau dégazée,
  - on applique une faible pression de confinement ( PC ) et une contre pression ( CP ).
- l'échantillon est mis en contact avec le circuit de saturation.

Au cours de la saturation, on procède, selon le type d'essai, à la mesure de la déformation volumique ( par le volume d'eau expulsée de la cellule ) ou de la pression développée dans la cellule. On mesure également le volume d'eau échangé avec l'échantillon.. Ceci permet d'analyser l'évolution du gonflement en fonction de la variation de la teneur en eau. L' essai est arrêté quand la variation pendant 24 heures de la déformation volumique est inférieure à 0,01% .

IV.4 - Essais réalisés et résultats

Quatre essais de gonflement libre ont été réalisés sur des échantillons prélevés à 34m de profondeur. Chaque essai a été suivi par une augmentation de la pression de confinement jusqu'à l'annulation de la déformation volumique, ce qui permet d'avoir directement la pression de gonflement. Les contraintes de confinement initiales sont données dans le tableau IV.1 Elles varient entre 50 et 350 kPa.

N° : d'essais	Profondeur H ( m )	Wi ( % )	Hauteur ( cm )	Pression de confinement ( kPa )	Contre pression ( kPa )
1	34	29,5	4,7	50	20
2			4,4	100	
3			3,6	150	
4			4,3	350	

Tableau IV.1 : - Caractéristiques des échantillons étudiés  
à la cellule triaxiale

La figure IV.2 donne l'évolution de la déformation volumique en fonction du temps. On constate que le potentiel de gonflement dépend sensiblement de la contrainte de confinement. Il passe de 6.4 % à -1.9 % quand la pression de confinement passe de 50 à 350 kPa.

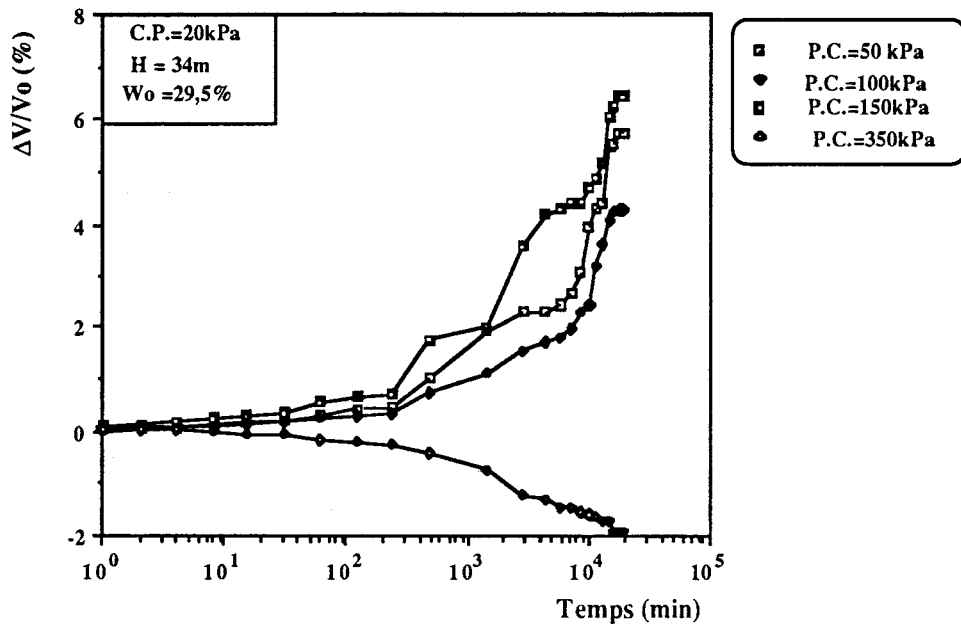


Figure IV.2 : - Evolution de la déformation volumique au cours du gonflement ( Essai dans une cellule triaxiale )

La mesure de la pression de gonflement avec la méthode du prégonflement a donné des valeurs comprises entre 280 et 350 kPa (tableau IV.2 ). L'évaluation de cette pression avec la méthode aux pressions différentes a donné 290 kPa (figure IV.3).

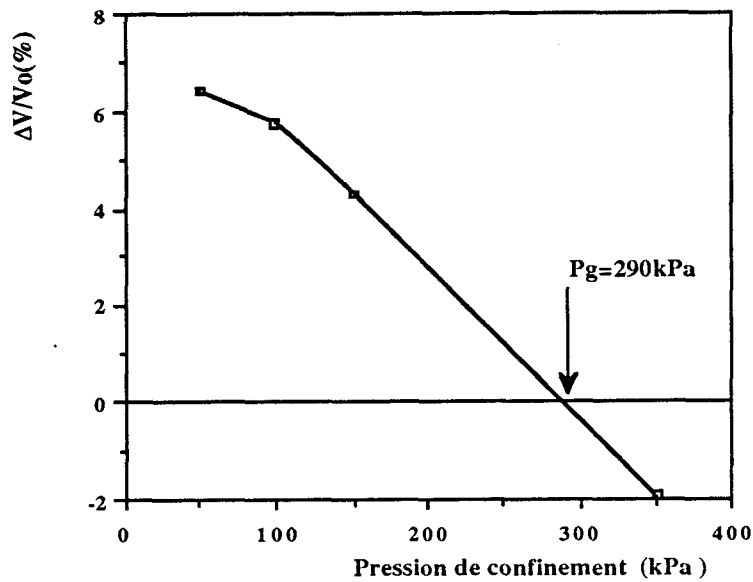


Figure IV.3 : - Détermination de la pression de gonflement  
( méthode aux pressions différentes )  
( Essais à la cellule triaxiale )

L'évolution de la déformation volumique  $\Delta V/V_0$  en fonction du volume d'eau échangé avec l'échantillon est donnée dans la figure IV.4. On constate que la variation du volume de l'échantillon est égale au volume d'eau échangée avec le circuit de saturation. Ceci confirme la saturation de l'échantillon.

La Figure IV.5 donne une récapitulation des résultats obtenus avec l'œdomètre et la cellule triaxiale. On constate qu'avec la méthode aux pressions différentes, la cellule triaxiale donne une pression de gonflement supérieure à celle obtenue avec l'œdomètre. Ceci peut être attribué à l'effet du frottement entre le moule œdométrique et l'échantillon. Pour la méthode de prégonflement, les comparaisons sont difficiles, car les essais n'ont pas été réalisés avec le même confinement initial, qui affecte sensiblement la valeur de la pression de gonflement.

N°. d'essai	W f (%)	gonflement libre	Prégonflement	
		$\Delta V/V_0$ (%)	P.C (initiale) (kPa)	P.C (finale) (kPa)
1	34,4	6,39	50	279
2	32,8	5,72	100	320
3	32,3	4,28	150	350
4	28,3	-1,92	350	

Tableau IV.2 : - Essais de gonflement libre et de prégonflement dans une cellule triaxiale

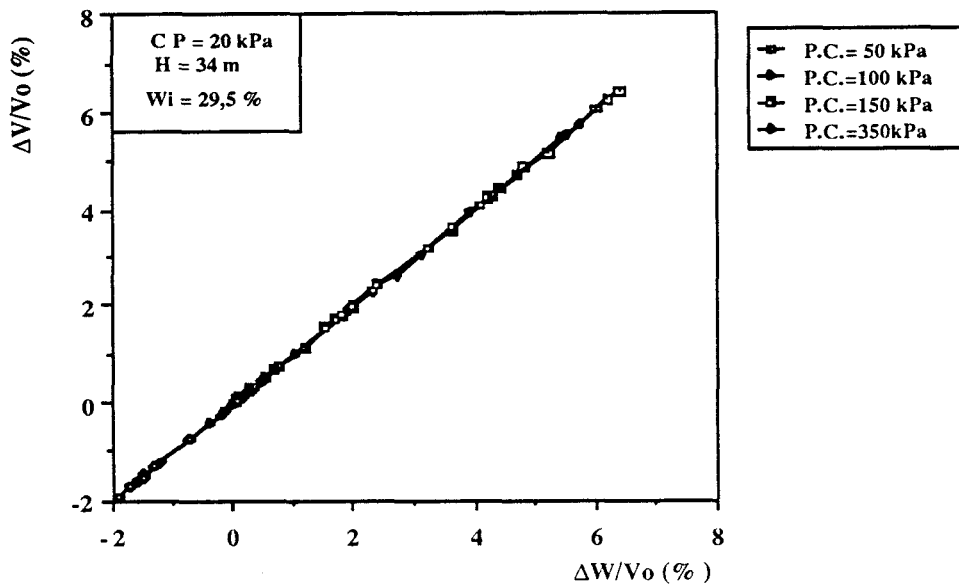


Figure IV.4 : - L'évolution de la déformation volumique en fonction du volume d'eau échangé avec l'échantillon

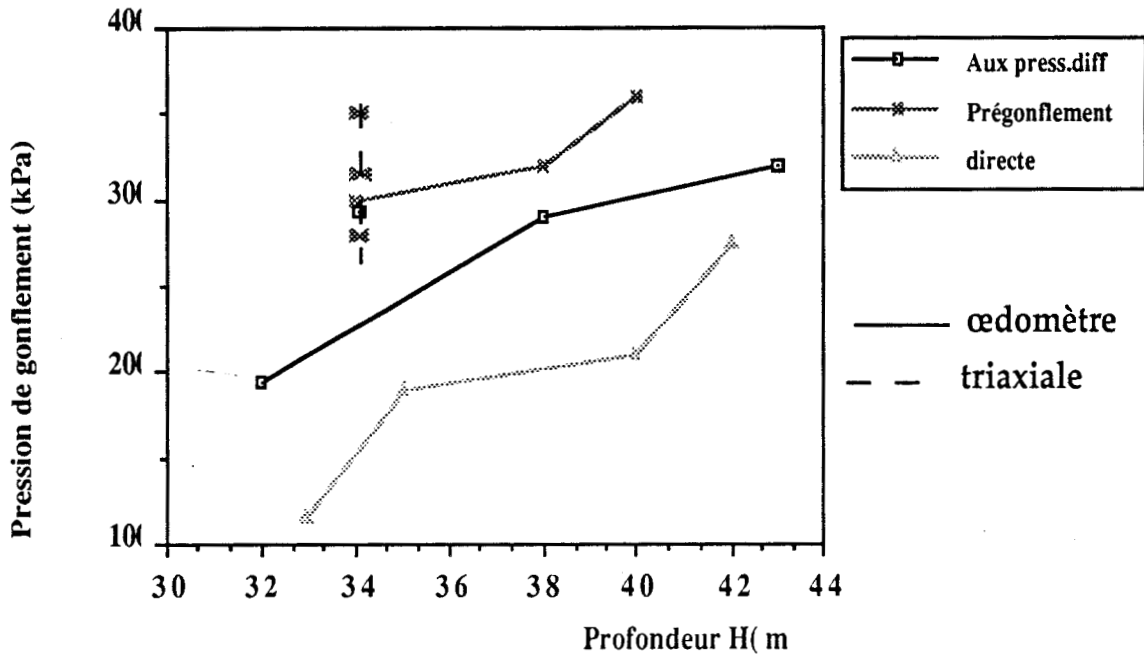


Figure IV.5 : Pressions de gonflement obtenues avec les différentes méthodes

**CHAPITRE V:**

**ETUDE PARAMETRIQUE**



## V.1 - Introduction

Dans cette section, nous allons étudier l'effet sur le gonflement de l'argile des Flandres des paramètres suivants:

- l'épaisseur des échantillons,
- la teneur en eau initiale,
- la contrainte verticale appliquée sur l'échantillon,
- le chemin de chargement.

## V.2 - Effet de l'épaisseur des échantillons

Des essais de gonflement libre ont été réalisés sur quatre échantillons d'épaisseurs différentes (12, 24, 44 et 54 mm). La figure V.1 illustre les résultats obtenus. On constate que le potentiel de gonflement diminue de 20% quand l'épaisseur passe de 12 à 24 mm, mais qu'il se stabilise ensuite. Cette constatation est en accord avec les résultats expérimentaux de Vayssade (1978) sur une argile plastique. Par contre, des essais réalisés par Chen (1975) sur l'argile de Denver et par Vayssade (1978) sur l'argile verte n'ont pas montré de diminution importante du potentiel de gonflement quand l'épaisseur de l'échantillon passe de 12 à 24 mm.

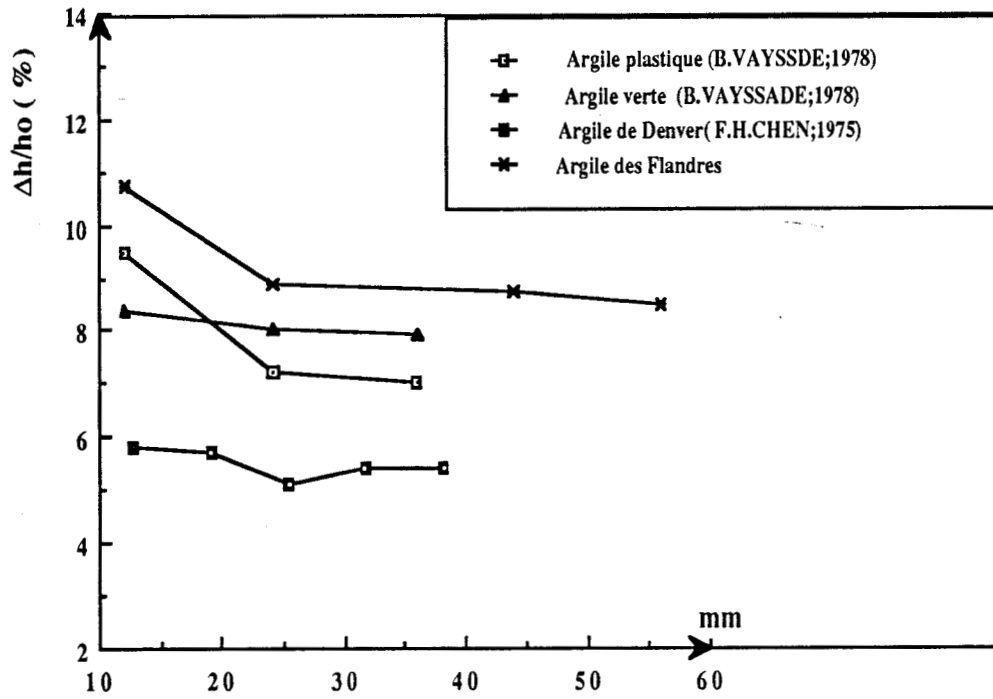


Figure V.1 : - Effet de l'épaisseur d' échantillons sur le potentiel de gonflement

### V.3 - Effet de la teneur en eau initiale

Des essais de gonflement libre ont été réalisés sur des échantillons ayant des teneurs en eau initiales différentes et des épaisseurs de 12 et 24mm. Le tableau V.1 et les figures V.2 et V.3 montrent les résultats obtenus. On constate que le potentiel de gonflement diminue avec l'augmentation de la teneur en eau initiale. Il passe de 9.5% à 6% quand la teneur en eau initiale passe de 26% à 33.5%.

N°. essai	Epaisseur de l'échantillon $h_0$ mm	Teneur en eau initiale $W_i$ %	$(\Delta h / h_0)_f$ %
1	12	26,2	9,45
2	12	30,3	7,28
3	12	33,5	5,92
4	24	27,5	8,57
5	24	29,3	7,45
6	24	32,1	5,73

Tableau V.1 : - Variation du potentiel de gonflement en fonction de la teneur en eau initiale

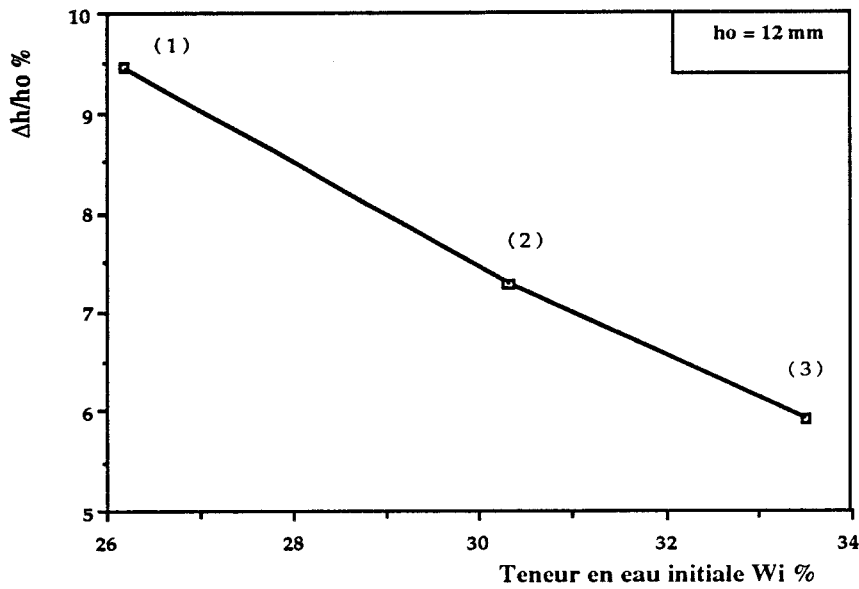


Figure V.2 : - Evolution du potentiel de gonflement en fonction de la teneur en eau initiale (  $h = 12$  mm )

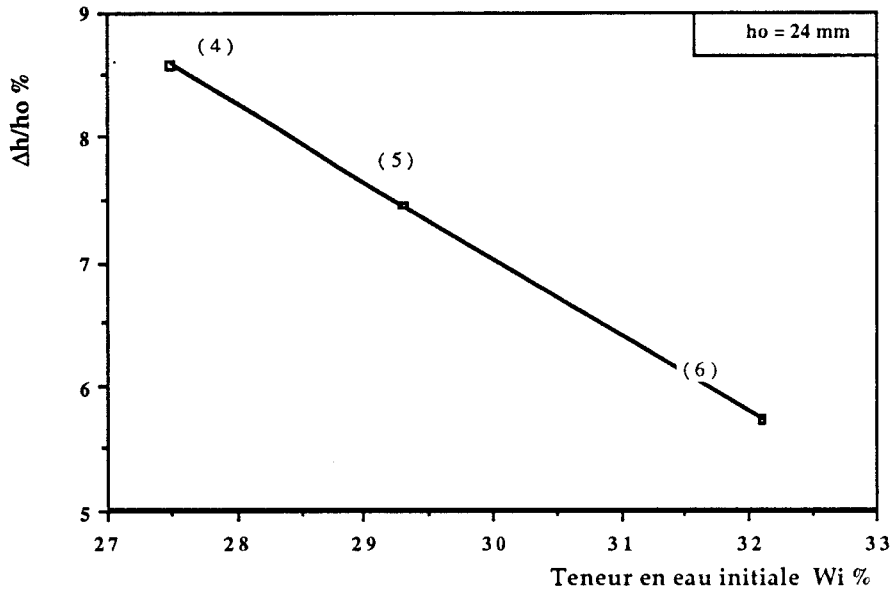


Figure V.3 : - Evolution du potentiel de gonflement en fonction de la teneur en eau initiale (  $h = 24$  mm )

#### V.4 - Effet de la contrainte verticale appliquée à l'échantillon

Des essais de gonflement à déformation imposée ont été réalisés sur des échantillons intacts de 12 et 24 mm d'épaisseur soumis initialement à des contraintes verticales distinctes (5, 500, 1000, 1500 et 2500 kPa). Les pressions mesurées sont illustrées dans la figure V.4. On constate que la pression de gonflement augmente avec la contrainte verticale initiale. Cette augmentation est importante pour les faibles niveaux de contrainte (jusqu'à 1000 kPa) mais faible pour les niveaux de contraintes plus importants (1500 à 3000 kPa).

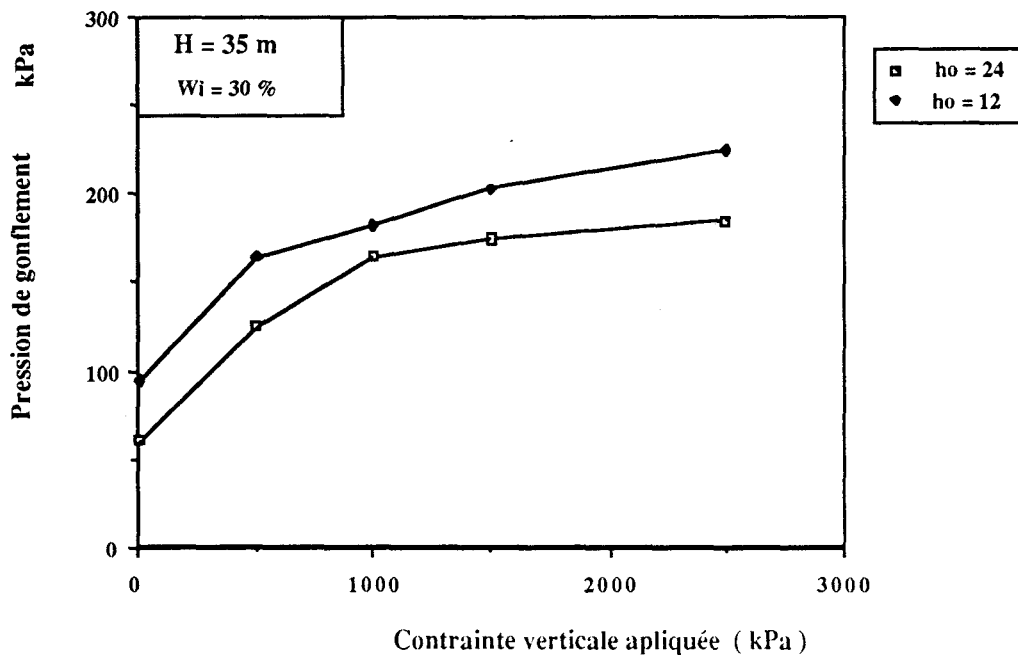


Figure V.4 : - Evolution de la pression de gonflement en fonction de la contrainte verticale appliquée

## V.5 - Effet de l'histoire du chargement

### V.5.1 - Effet d'un déchargement

Afin d'étudier l'effet d'un déchargement sur la pression de gonflement, nous avons réalisé quatre essais selon le mode opératoire suivant:

-Après la stabilisation de la contrainte axiale, on débloque la déformation. Ensuite on rebloque à nouveau la déformation et on mesure la contrainte axiale jusqu'à la stabilisation.

-On répète cette étape jusqu'à la stabilisation finale de la pression de gonflement.

Les figures V.5 à V.8 représentent l'évolution de la pression de gonflement en fonction du temps. On constate qu'après la stabilisation de la pression de gonflement, la libération de la contrainte axiale induit de nouveau un gonflement de l'échantillon. Ceci indique clairement que le gonflement dépend sensiblement de la contrainte appliquée et de son évolution au cours de la saturation.

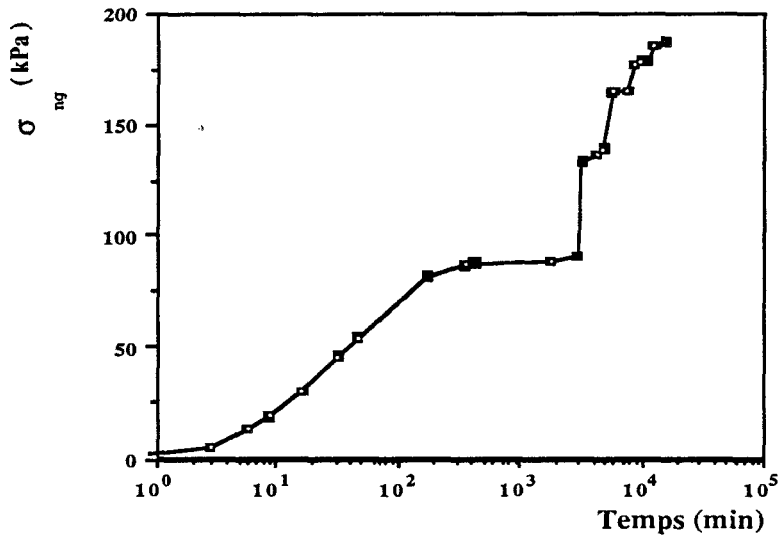


Figure V.5 : - Evolution de la pression de gonflement en fonction du temps ( Effet d'un déchargement )  
(  $h_o = 12$  mm,  $Wi = 32$  % )

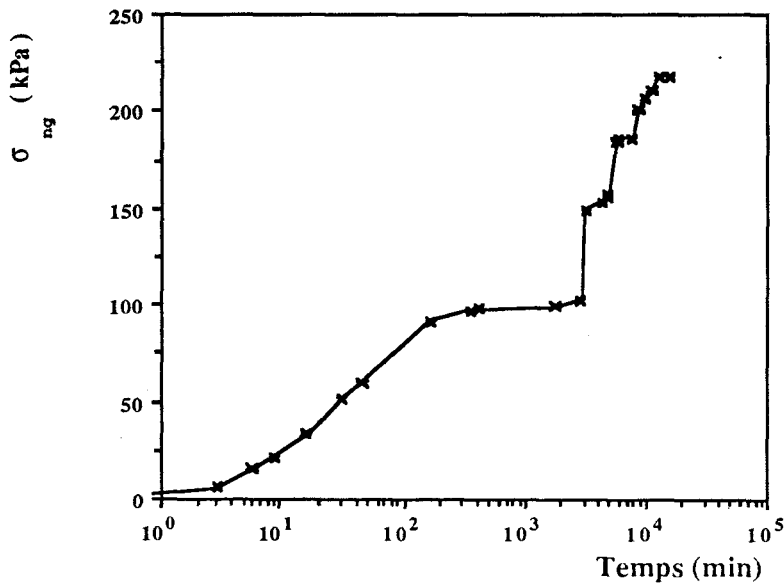


Figure V.6 : - Evolution de la pression de gonflement en fonction du temps ( Effet d'un déchargement )  
(  $h_o = 24$  mm,  $Wi = 30$  % )

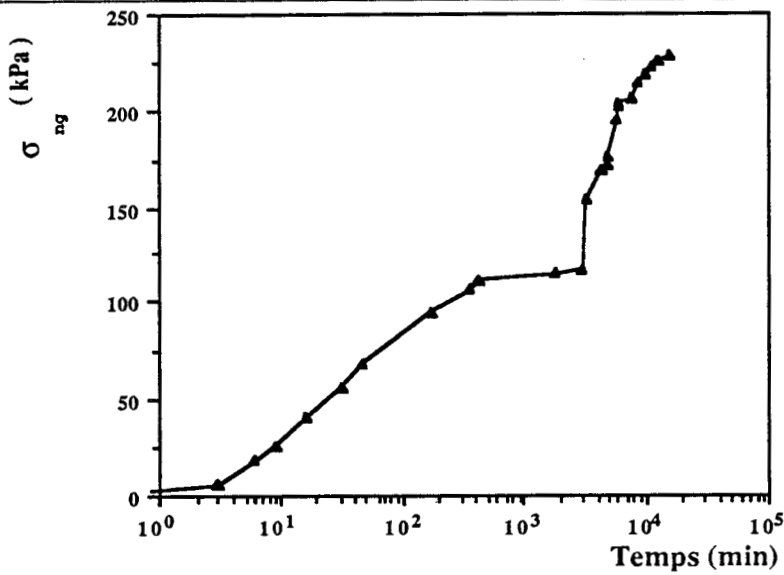


Figure V.7 : - Evolution de la pression de gonflement en fonction du temps ( Effet d'un déchargement )  
 (  $h_o = 44$  mm,  $Wi = 28,5$  % )

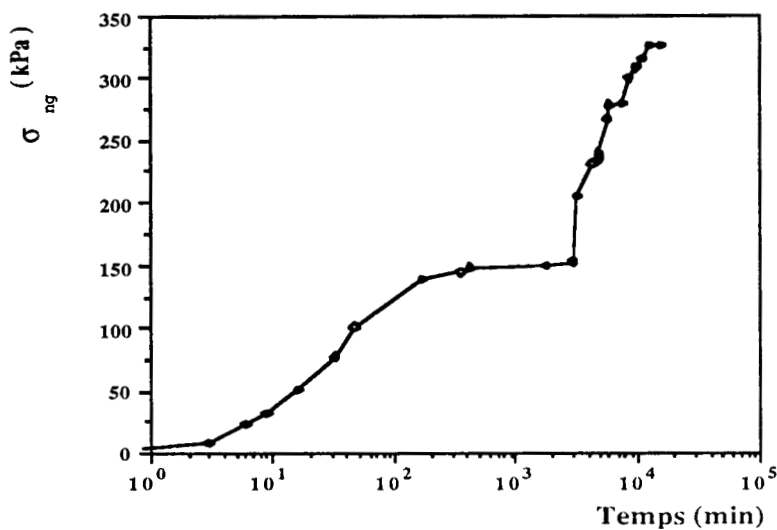


Figure V.8 : - Evolution de la pression de gonflement en fonction du temps ( Effet d'un déchargement )  
 (  $h_o = 54$  mm,  $Wi = 27$  % )



### V.5.2 - Effet d'un cycle de chargement

Un essai de gonflement libre a été réalisé pour étudier l'effet d'un cycle de chargement sur le potentiel de gonflement. Le mode opératoire suivi est illustré en figure V.9. Il comporte:

- un gonflement libre sous le poids du piston (5 kPa),
- un chargement de l'échantillon par paliers de 350 kPa jusqu'à une contrainte verticale de 2500 kPa qui correspond à la contrainte de préconsolidation,
- un déchargement total de l'échantillon par paliers de 350 kPa.

Pour chaque niveau de chargement, le potentiel de gonflement a été mesuré.

Les figures V.9 et V.10 montrent les résultats obtenus. On constate que le cycle de chargement-déchargement a réduit le potentiel de gonflement obtenu.

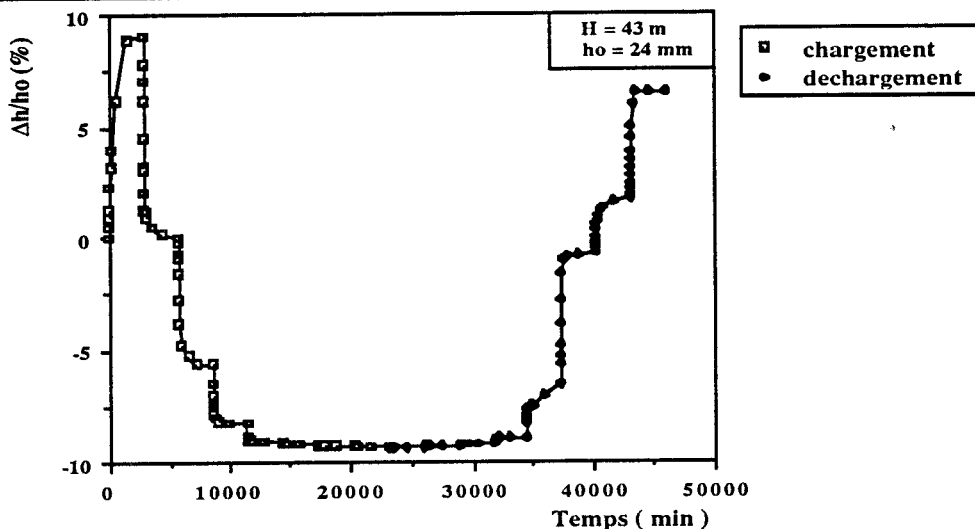


Figure V.9 : - Effet de l'histoire du chargement sur le potentiel de gonflement

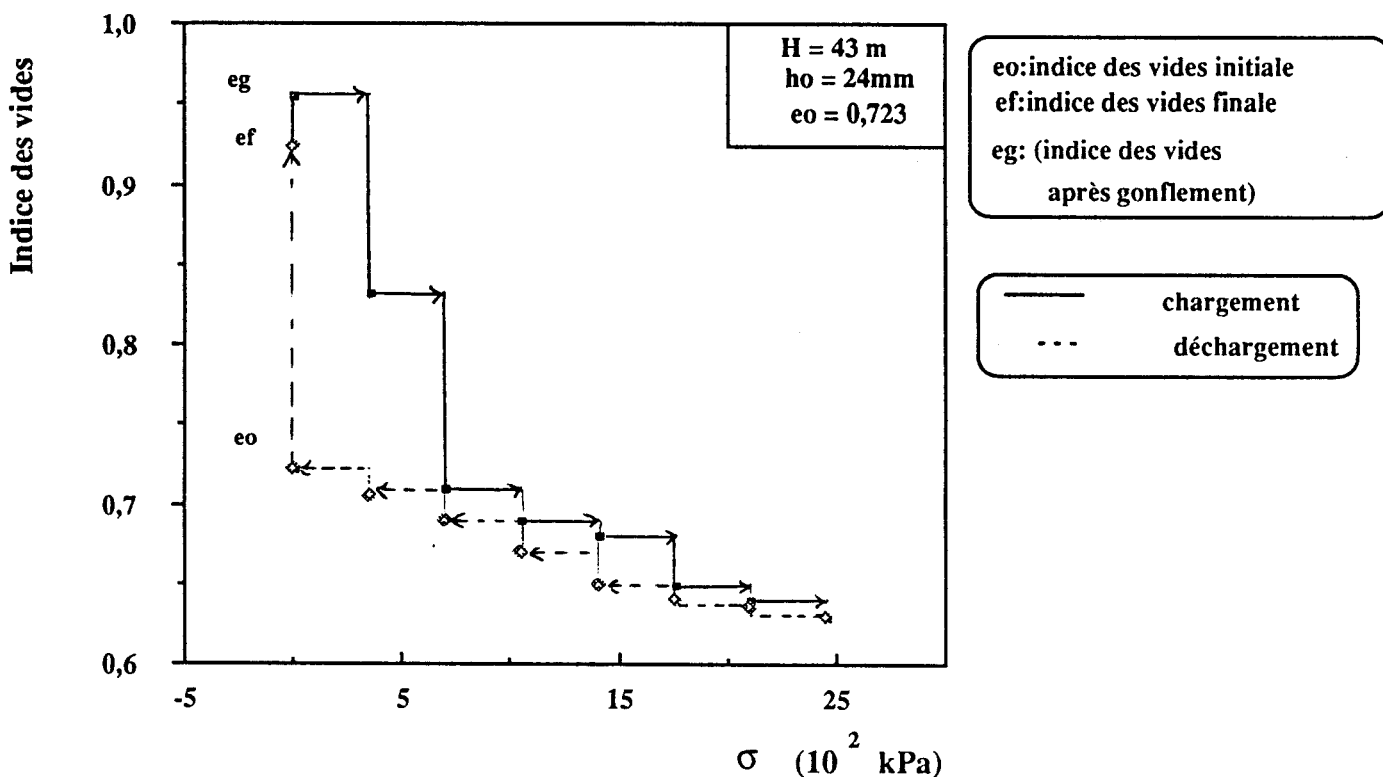


Figure V.10 : - Variation de l'indice des vides en fonction de la contrainte appliquée ( Effet de l'histoire du chargement )

CONCLUSION

### CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons présenté une étude en laboratoire du gonflement de l'argile intacte des Flandres. L'étude à l'œdomètre a été effectuée avec quatre méthodes (gonflement libre, gonflement aux pressions différentes, prégonflement et gonflement direct). L'étude à la cellule triaxiale a été effectuée avec trois méthodes (gonflement libre, gonflement aux pressions différentes et prégonflement). Une étude paramétrique a été également effectuée pour analyser l'effet de certains facteurs sur le gonflement. Cette étude permet de tirer les conclusions suivantes:

- Des essais de répétabilité ont montré qu'une grande dispersion peut être obtenue au niveau de la vitesse d'évolution du gonflement, mais à la stabilisation, on note un bon accord entre les résultats des essais réalisés dans les mêmes conditions.

- L'utilisation de la méthode directe nécessite une attention particulière, notamment au niveau des variations de température qui peuvent affecter sensiblement les résultats expérimentaux.

- Les méthodes étudiées donnent des résultats différents. Ceci peut être expliqué par les différences de mécanismes mis en œuvre pendant le gonflement (augmentation de la pression avec la méthode directe,

travail sur différents échantillons avec la méthode aux pressions différentes, relaxation et fluage, etc).

- Le gonflement de l'argile des Flandres dépend sensiblement de la profondeur du prélèvement, de la teneur en eau initiale, de la contrainte verticale appliquée et de l'histoire du chargement .

- Les propriétés de gonflement de cette argile peuvent se résumer ainsi : indice de gonflement libre entre 50 et 65%, potentiel de gonflement entre 6.3 % et 9.5% et pression de gonflement entre 100 et 360 kPa.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

**Aboushook M. (1984)** " Contribution à l'étude quantitative du gonflement des sols argileux: Application à des sols intacts de la zone urbaine du Caire"- Thèse de Docteur Ingénieur. I.N.P.L. Nancy.

**Andrei S. (1977)** " Propriétés hydrauliques et mécaniques des sols non saturés"- Revue Française de Géotechnique, N°2.

**Andrews D.E. , Schmidt P.W. et Van Olpen H. ( 1967 )** " X-ray study of interaction between montmorillonite platelets"- 15th Conf. Clays and Clay Minerals , 321 à 330.

**Ben Rhaiem H. (1983)** "Etude du comportement hydrique des montmorillonites calciques et Sodiques par analyse de la diffusion des rayons X aux petites argiles"- Thèse de 3ème cycle, Université d'Orleans .

**Bouche M. (1974)** - "Influence d'une charge hydraulique sur un écoulement horizontal dans un sol compacté naturel ou hydrophobé". C.R. Acad. Sc. Paris, T. 278, série B, pp. 255-258.

**Chen F.H. (1962)** "The use of piers to prevent the uplifting of lightly loaded structures founded on expansive soils"- Proc.I.R.E.C.E.C.S., Texas, pp. 152-171.

**Chen F.H. (1970)** "The basic physical property of expansive soils". Proc. of the 3 rd. Int. Conf. on Expansive Soils, Haifa, Vol 1, pp. 17-26.

**Chen F.H. (1975)** "Foundation on expansive clays"- Elsevier Ed., Amsterdam.

✓ **Didier G. (1972)** "Gonflement cristallin et macroscopique des montmorillonites"-Thèse de Docteur Ingénieur, Université Claude Bernard-Lyon.

**Didier G. (1972)** " Etude du gonflement cristallin des montmorillonites"- Bull. Groupe Français d'Argiles, N°24, T. XXIV, pp. 99-110.

**Didier G. et al (1973)** "Prévision du potentiel et de la pression du gonflement des sols"- 8 th ICSMFE , Moscou , vol.2, pp. 73-80.

**Grim R.E. (1968)** " La minéralogie des argiles en relation avec les propriétés mécaniques des matériaux argileux."- Ed. Mc Crow Book, New York, 1962, Tome I, pp. 204-277. Traduction L. C.P.C., 63t, 1968.

**Grim, R.E. (1968)** " Clay Mineralogy"- McGraw Hill , Second Edition, New York .

**Gromko G.J. (1974)** "Review of expansive soils"- Journal of the Geotechnical Division, ASCE, Vol.100, N° 616, pp.667-687.

**Guinier A. (1964)** " Théorie et technique de la radiocristallographie". Dunod Paris .

**Holtz W.G. et Gibbs (1956)** " Engineering properties of expansive clays" Transactions , ASCE, Vol 121, pp. 641-677.

**Huder et Amberg (1972)** " Quellung in Mergel, Opalunuston und Anhydrite"- Schweizerische, Bauzeitung, Jg. 88, N° 43, pp. 975-950.

**Iltis M. (1979)** "Contribution à l'étude du traitement des argiles gonflantes au cours de forage"- Thèse de Docteur Ingénieur, I.N.S.A de Lyon.

✕ **Kabbaj M. (1981)** "Contribution à l'étude des propriétés mécaniques et du gonflement anisotrope d'une bentonite compacte"- Thèse de 3ème cycle, I.N.P.G., Grenoble.

**Khaddaj S., Lancelot L. & Shahrou I. (1992)** - "Experimental study of the swelling behaviour of heavily overconsolidated Flandres clays"- 7th international Conference on Expansive Soils, Dallas Texas.

**Kassif G., Baker ( 1971 )** " Experimental relation between swell pressure and suction"- Geotechnique, Vol. N°3 pp.245 à 255.

**Ladd C.C. and Lambe T.W. (1961)** " The identification and behaviour of compacted expansive clays"- 5th I.C.S.M.F.E., (Paris) , pp201-205.

**Lambe T.W. (1953)** "The structure of inorganic soil "- Separate, A.S.C.E., 315.

**Lambe T.W. (1960)** " Compacted clay, a symposium, structure engineering behaviour"- Trans. A.S.C.E., 125, Paper 3041.

✓ **Mamy J. (1968 )** " Recherches sur l'hydratation de la montmorillonite" . Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Paris.

✕ **Mouroux P. (1969)** "Contribution à l'étude des problèmes de retrait et de gonflement des sols"- Thèse de 3ème cycle, Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble.

**Norrish K. et Rausell-Colom, J.A. ( 1963 )** " Low-angle X-ray diffraction studies of the swelling of montmorillonite and vermiclité". 10th National Conf. Clays and Clay Minerals , 123-149 .

**Pons C.H. (1980)** -" Mise en évidence des relations entre la texture et la structure dans les systèmes eau-smectites par diffusion aux petits angles du rayonnement X synchrotron ". Thèse de Doctorat d'Etat . Université d'Orléans .



**Ranganatham B.V. et Satyanarayana B. (1965 )** " A rational method of predicting swelling potential for compacted expansive clays"- 6th. ICSMFE, Montreal, Vol. 1, pp.92-96.

**Seed H.B., Mitchell J.K. & Chan C.K. (1962)** " Swell and swell pressure characteristics of compacted clay"- Highway Research Board Bulletin N°313, pp.12-39.

**Skempton A.W. (1953)** " Tthe colloidal activity of clay "-3rd ICSMFE, Switzerland, Vol. 1, pp.57-61.

**Van Olphen H. (1963)"** Unit layer interaction in hydrous montmorillonite systems "- J. Colloid Sci .17, pp. 660-667.

**Van Olphen H. (1977)** "An Introduction to clay colloid Chemistry"- John Wiley and Sons, London.

**Vayssade B. (1978)** "Contribution à l'étude du gonflement interparticulaire de sols argileux"- Thèse Docteur Ingénieur, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

**Wigyodarsono S.L. (1985)** " Etude de l'action des surfactantes sur les propriétés hydrauliques et mécaniques des argiles"- Thèse Docteur Ingénieur E.C.A.M., Paris.

**Williams A.A.B., Donaldson G.W. (1980)** - "Building on expansive soils in south Africa: 1873-1980, Proc. 4 th.

## ETUDE EN LABORATOIRE DU GONFLEMENT DE L'ARGILE DES FLANDRES

### Résumé :

Ce travail porte sur l'étude en laboratoire du gonflement de l'argile des Flandres. Il est composé de cinq parties :

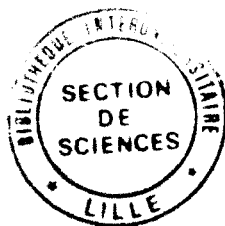
La première partie comporte une analyse du phénomène du gonflement (son origine, sa caractérisation,.. ) et des méthodes de son étude en laboratoire. Une classification des argiles d'après leur potentiel de gonflement est donnée.

La seconde partie est consacrée à l'analyse des propriétés de l'argile des Flandres. Pour cette argile, on donne les compositions chimique et minéralogique, les caractéristiques de résistance mécanique et l'indice de gonflement libre.

La troisième partie porte sur l'étude à l'œdomètre du potentiel de gonflement. Quatre méthodes sont utilisées et comparées (gonflement libre, gonflement aux pressions différentes, prégonflement et gonflement direct). Une simulation numérique des essais de gonflement libre est présentée.

Dans la quatrième partie, on présente des essais de gonflement à la cellule triaxiale avec trois méthodes ( gonflement libre, prégonflement, et gonflement aux pressions différentes ).

La cinquième partie comporte une étude de l'effet sur le gonflement de certains paramètres comme l'épaisseur de l'échantillon, la teneur en eau initiale, la contrainte verticale appliquée et l'histoire de chargement.



### Mots clés :

Argile - Flandres - Gonflement - Œdomètre - Libre - Potentiel  
Prégonflement - Triaxial.