

# 1 Etude phénoménologique du retrait-gonflement Approche bibliographique

---

## 1.1 Nature et structure des sols argileux

---

### 1.1.1 Introduction

Le terme argile est assez imprécis, il en existe plusieurs définitions. Pour un géotechnicien ou un mécanicien des sols, un sol argileux est un matériau meuble ou déformable dont une proportion importante des éléments a une taille inférieure à 2  $\mu\text{m}$ . Ces éléments sont constitués de minéraux argileux mais aussi d'autres minéraux non argileux (quartz, carbonates, feldspaths, etc...). La nature et la proportion des minéraux argileux sont en grande partie responsables des caractéristiques géotechniques, du comportement hydrique et mécanique du matériau (plasticité, compressibilité, phénomène de retrait-gonflement). La définition que nous retiendrons par la suite est celle des minéralogistes qui définissent les argiles comme des minéraux phylliteux ou fibreux dont la taille n'excède pas quelques  $\mu\text{m}$ .

La plupart des sols sont susceptibles de gonfler ou de s'effondrer lors d'une imbibition, ce processus dépend de l'intensité des contraintes appliquées au sol et de l'historique de ces contraintes. Ainsi, comme la souligné une classification trop rigide des sols gonflants et des sols effondra les peut induire en erreur [SHA88].

Cependant, au cours de l'imbibition, l'amplitude de gonflement peut changer considérablement d'un sol à l'autre. Ainsi, un fort potentiel de gonflement est principalement attribué à la présence, dans le sol, de minéraux argileux gonflants tels que la montmorillonite.

La compréhension des interactions physico-chimiques existant entre l'eau et l'argile du sol permet d'expliquer son comportement.

Les facteurs entrant en jeu dans la variation de la sensibilité au phénomène de retrait-gonflement des sols sont d'une part la nature et la proportion des minéraux argileux, d'autre part l'arrangement ou texture de l'ensemble des minéraux entrant dans la composition du sol.

Dans ce contexte, l'objectif principal de ce chapitre est de réaliser une synthèse biobibliographique sur ces facteurs de prédisposition au retrait-gonflement et d'exposer les différents critères chimiques, physiques, hydriques, mécaniques jouant un rôle déterminant dans les processus de retrait-gonflement.

Dans la première partie de ce chapitre, après avoir défini les argiles au sens minéralogique et énoncé les propriétés du système eau / particules argileuses, une synthèse de l'ensemble des caractéristiques des « sols argileux » sera présentée. Ensuite, les aspects phénoménologiques des

processus de retrait-gonflement seront analysés, prenant en considération les différentes origines : physico-chimique et mécanique, et précisant les facteurs extérieurs susceptibles d'influencer ces processus. Nous insisterons sur les conséquences de sollicitations hydriques uniques ou cycliques, sur l'évolution de la microstructure, ainsi que sur la propagation de la fissuration, à la fois sur des matériaux naturels et sur des matériaux reconstitués. Pour terminer ce chapitre, les méthodes de caractérisations directes et indirectes de l'aptitude et la pression des sols argileux au retrait-gonflement, aussi bien au laboratoire qu'in situ, par des mesures de paramètres géotechniques mécaniques et quelques résultats bibliographiques sur la stabilisation du sol gonflant, seront exposées.

---

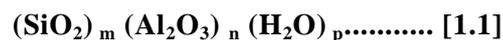
## 1.2 Minéralogie des argiles

---

### 1.2.1 Minéraux argileux

Les argiles sont constituées de fines particules de dimensions inférieures à 2 µm chargées négativement, leur présence rend l'argile fortement sensible aux molécules d'eau. Cette sensibilité se traduit par le gonflement, le retrait et le changement des paramètres mécaniques.

C'est la variation de la teneur en eau qui est le facteur déclenchant des variations de volume. Une augmentation de la teneur en eau entraîne le phénomène de gonflement tandis que sa diminution induit le phénomène de retrait. Ces minéraux sont composés des particules de formes aplaties et de dimensions très petites, les cristaux ressemblent à des minces plaques ou plaquettes. Leur formule chimique est de la forme suivante [HAF93]



---

#### 1.2.1.1 Structure des argiles

Les minéraux argileux sont des silicates hydratés appartenant au groupe des phyllosilicates. Ces phyllosilicates sont formés par un empilement de feuillets, chacun étant formé par un arrangement de deux types de couches, l'une tétraédrique (T) à base de silice et l'autre octaédrique (O) à base d'hydroxyde d'aluminium.

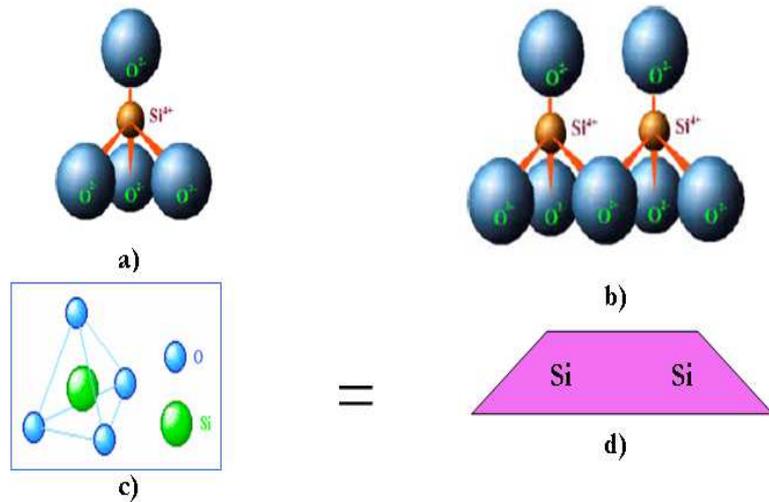
Ces feuillets ont une épaisseur de 7 à 14 Å, alors que les particules argileuses sont formées d'un empilement de paquets de feuillets, avec une épaisseur d'au moins quelques centaines d'Angströms (Å) d'épaisseur.

---

##### 1.2.1.1. a Feuillet en tétraèdre (de silice)

Le feuillet en tétraèdre noté « T » est une combinaison d'unités tétraédriques de silice composées de quatre atomes d'oxygène aux sommets entourant un

atome unique de silicium ; L'épaisseur des feuillets en tétraèdre est de 5 Å. (fig.1.1).

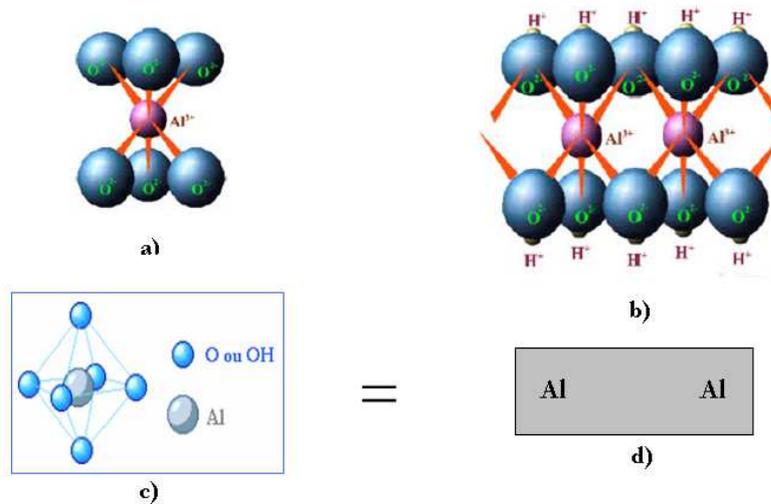


a) et c) *Tétraèdre de silice* [GRI59].  
 b) *Vue isométrique d'un feuillet de silice en tétraèdre* [GRI59].  
 d) *Schéma du feuillet de silice* [LAM53].

**Fig.1.1.** Feuillet en tétraèdre

1.2.1.1.b Feuillet en octaèdre (ou d'alumine)

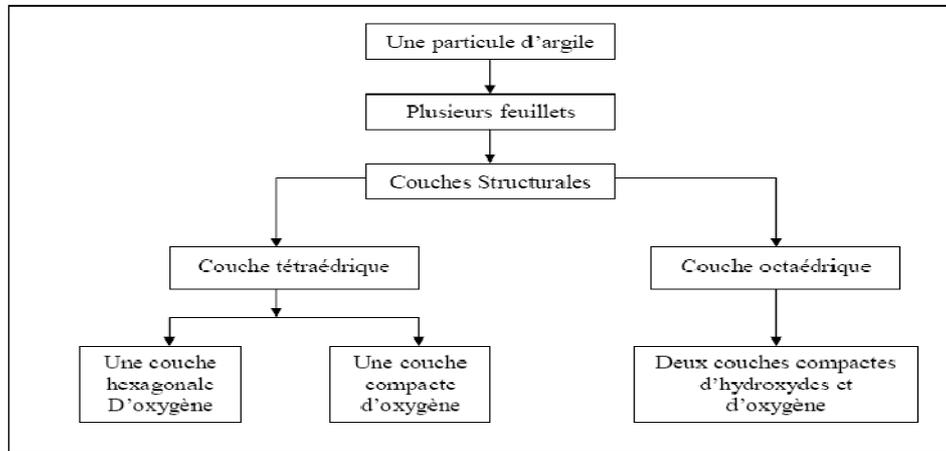
Le feuillet en octaèdre noté « O » est une combinaison d'unités octaédrique composées de six atomes d'oxygène ou d'hydroxyde entourant un atome d'aluminium, de magnésium, de fer ou d'un autre élément (fig.1.2).



a) et c) *Octaèdre d'aluminium* [GRI59].  
 b) *Vue isométrique d'un feuillet en octaèdre* [GRI59].  
 d) *Schéma du feuillet en octaèdre d'aluminium* [LAM53].

**Fig.1.2.** Feuillet en octaèdre.

La représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile est donnée par l'organigramme suivant (fig.1.3).



**Fig.1.3.** Représentation de la structure minéralogique d'une particule d'argile.

#### 1.2.1.2 Principaux groupes de minéraux argileux

En se basant sur le type de feuillet, sa charge et la nature des espaces interfoliaires il est possible d'identifier différentes familles de minéraux argileux qui présentent des caractéristiques structurales, morphologiques et colloïdales spécifiques [BRI51], [CAI56] (Tableau.1.1).

Les sols argileux sont un mélange complexe de différents minéraux, les minéraux argileux les plus représentés étant les illites, les kaolinites, les smectites de type montmorillonite et les interstratifiés. Une description des principales familles de minéraux argileux est présentée dans les paragraphes suivants.

##### 1.2.1.2. a Kaolinite

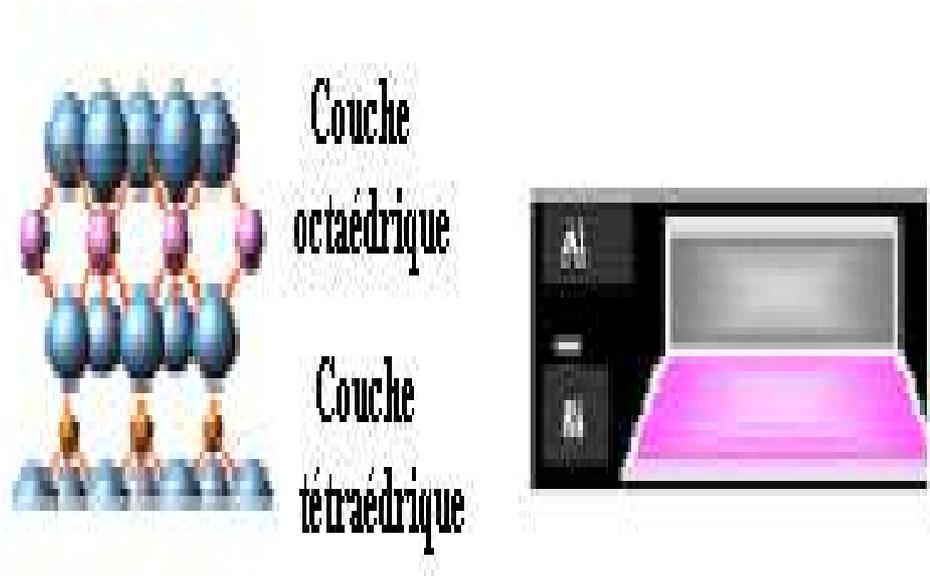
Chaque feuillet de cette famille résulte de l'assemblage d'un feuillet tétraédrique  $\text{SiO}_4$  avec un feuillet octaédrique  $\text{AlO}_2(\text{OH})_4$  (fig.1.4).

Les couches de base successives sont maintenues par les liens d'hydrogène entre les hydroxydes du feuillet en octaèdre et les atomes d'oxygène du feuillet en tétraèdre.

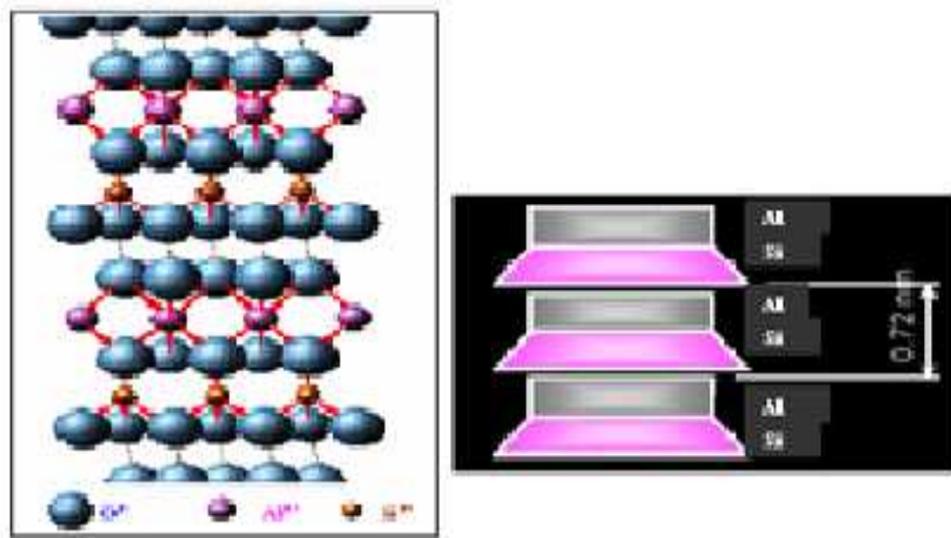
Ces liaisons empêchent l'hydratation entre les feuillets élémentaires permettant un empilement relativement important de couches et la formation d'un cristal d'assez grande dimension. L'espace interfoliaire de cette famille est de  $7.2 \text{ \AA}$ .

La kaolinite est une argile stable, non-gonflante et sa structure élémentaire n'est pas affectée par la présence d'eau et ne peut être détruite que par chauffage à  $450^\circ\text{C}$ .

La formule générale d'un feuillet de kaolinite est donnée par la formule suivante, [HAF93].



a) Schéma de la structure élémentaire de la Kaolinite [LAM53].



b) Vue isométrique de la structure atomique de la kaolinite.

**Fig.1.4.** Structure atomique de la kaolinite.

**Tableau.1.1.** Classification des phyllosilicates (d'après Caillère et Hénin, 1963 ; complété par [BES90]; [MIT93])

Nature du feuillet	Nature des Cations interfoliaires	Charge /maille élémentaire	Groupe	Nature de la couche octaédrique	Exemples
1/1	Pas de cations ou seulement H <sub>2</sub> O	x = 0	Kaolinites Serpentines	Dioctaédrique Trioctaédrique	kaolinite, dickite, nacrite, halloysite chrysotile, antigorite, lizardite

	Pas de cations		x = 0	Pyrophyllites Talc	Diocatédrigue Triocatédrigue	Pyrophyllites talc
	Cations hydratés et échangeables		x = 0.2 à 0.6	Smectites	Diocatédrigue Triocatédrigue	montmorillonite, beidellite, nontronite, saponite, hectorite, sauconite
			x = 0.6 à 0.9	Vermiculites	Diocatédrigue Triocatédrigue	vermiculite, diocatédrigue vermiculite triocatédrigue
2/1	Cations monovalents hydratés	non	x = 0.6 à 1.0	Micas	Diocatédrigue Triocatédrigue	illite, paragonite phlogopite, biotite, lepidolite
	Cations divalents non-hydratés		x = 1.8 à 2.0	Micas durs	Diocatédrigue Triocatédrigue	Margarite ; clintonite
					Diocatédrigue	donbassite
	Hydroxyles		x variable	Chlorites	Di-triocatédrigue Triocatédrigue	cookeite, sudoïte clinochlore, chamosite, nimite
2 / 1 fibreux			x variable	Palygorskites Sépiolites		palygorskite sépiolite

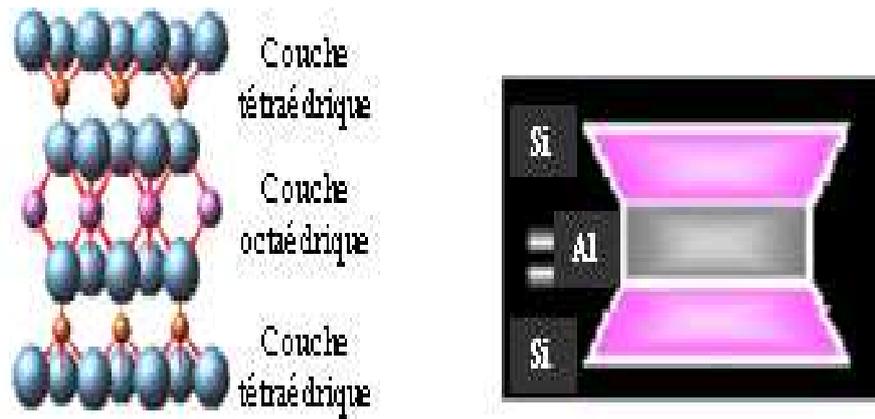
#### 1.2.1.2. b Montmorillonite

L'épaisseur d'un feuillet est de  $10\text{Å}$ , il est constitué par l'association de deux couches tétraédrique de type  $\text{TO}_4(\text{OH})_2$ . T pouvant être  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,... (fig.1.5). la formule générale de la montmorillonite est la suivante, [HAF93].

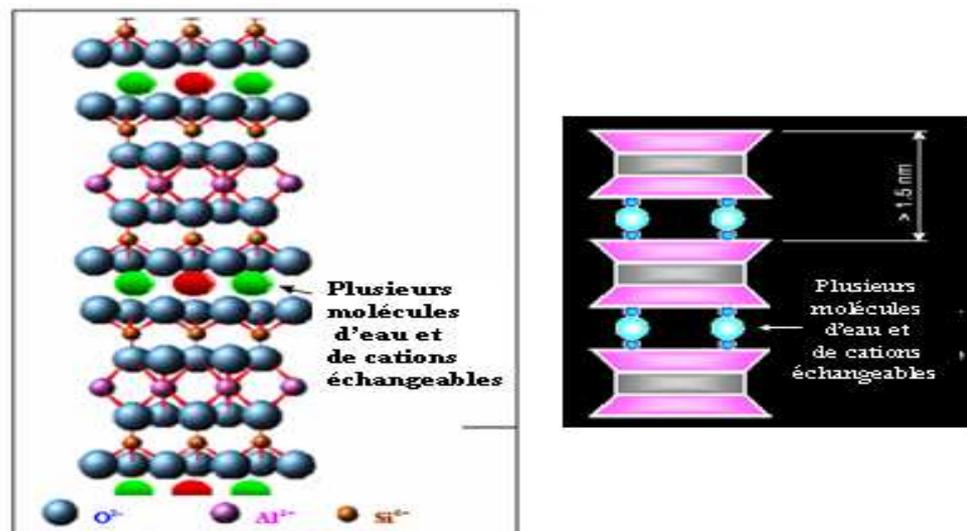


Les liaisons d'un feuillet à l'autre sont faibles et l'eau pénètre facilement entre les feuillets. Pour cette raison, les ions échangeables peuvent pénétrer dans la structure et séparer les couches. La faiblesse de ces liaisons leur confère de grandes surfaces spécifiques et de forts potentiels de gonflement.

L'argile contenant un fort pourcentage de montmorillonite est l'une des argiles connues comme une argile gonflante lorsque la teneur en eau augmente, les pressions de gonflement qui en résultent peuvent facilement causer des dommages aux structures légères.



a) Schéma de la structure élémentaire de la montmorillonite [LAM53].

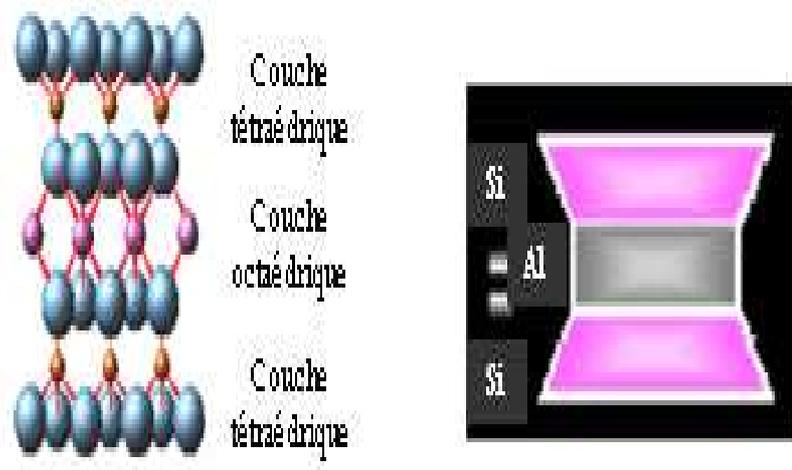


b) Vue isométrique de la structure atomique de la montmorillonite [GRI59].

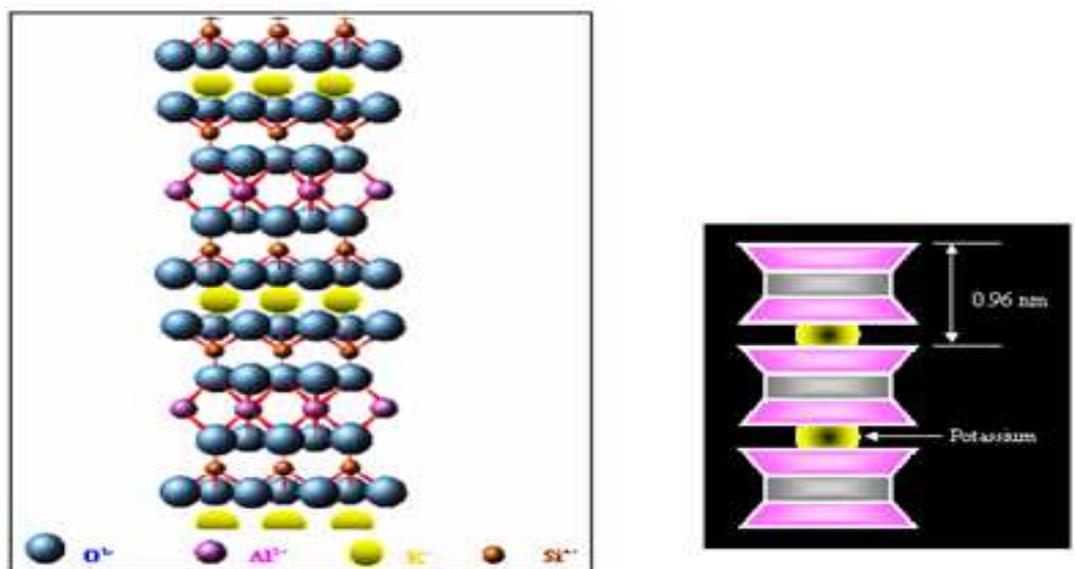
**Fig.1.5.** Structure atomique de Famille de la montmorillonite.

#### 1.2.1.2. c L'illite

La structure de l'illite est analogue à celle de la montmorillonite, mais la présence d'ions potassium  $K^+$  dans la structure (fig.1.6) rééquilibre et renforce la liaison entre les feuilles, rendant ainsi l'argile moins sensible aux phénomènes de retrait-gonflement



a) Schéma de la structure élémentaire de l'illite [LAM53].



b) Vue isométrique de la structure atomique et schématique de l'illite.

**Fig.1.6.** Structure atomique de Famille de l'illite.

### 1.3 Microstructures des sols argileux

Les propriétés mécaniques et hydrauliques des sols argileux sont contrôlées à la fois par leur minéralogie, leurs propriétés physico-chimiques telles que les interactions eau-solide, et l'arrangement microstructural.

La microstructure des sols argileux dépend du mode de sédimentation et de l'état de consolidation. Un sol argileux qui présente une organisation des particules d'argiles serrée et orientée, n'a pas la même aptitude au gonflement qu'un sol argileux dont la sédimentation rapide et récente est responsable d'une distance maximale entre les plaquettes. Cette organisation des minéraux argileux est une des principales causes du gonflement anisotrope.

L'objectif de cette partie est d'exposer les différents types de texture des sols argileux et les différentes terminologies utilisées pour les décrire.

---

### 1.3.1 Définitions et concepts de texture/structure

En pédologie la texture est liée à la granulométrie, alors que la structure désigne d'une part l'assemblage de plusieurs minéraux sous forme d'agrégats et d'autre part l'arrangement spatial de ces unités [AUD79]. En géologie la texture regroupe les deux notions précédentes.

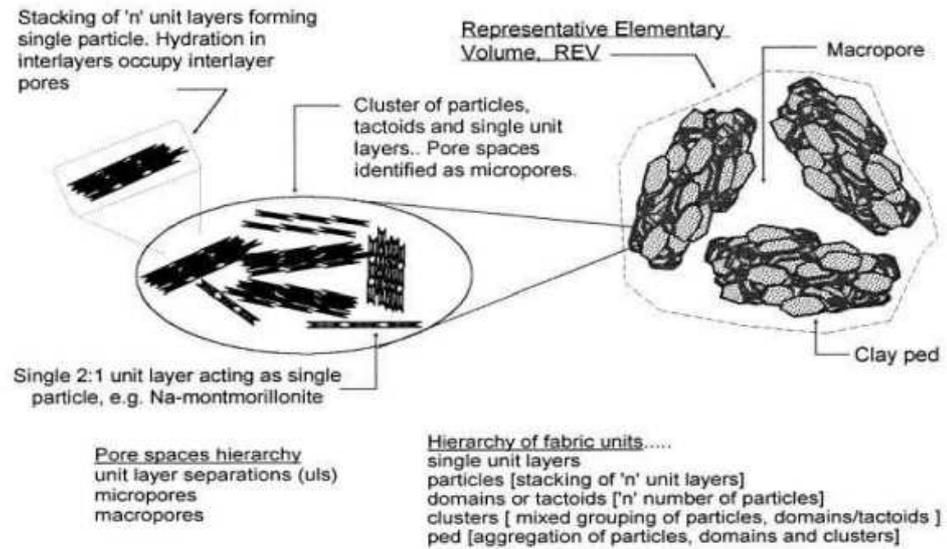
Elle désigne « la forme, la dimension et la disposition d'un certain nombre de minéraux naturellement groupés en une population au sein de la roche » L'observation des sols argileux au Microscope Electronique à Balayage a permis de décrire l'arrangement des particules argileuses et de caractériser certaines textures types. Les sols argileux naturels, en leur grande majorité, sont un mélange de particules de nature et de taille différentes. Elles sont le plus souvent agrégées et présentent des associations de constituants de taille croissante, emboîtées les unes dans les autres [ARN80] ; [DEL84]. Les différents travaux concernant l'étude de ces associations, appel à un vocabulaire spécifique à chaque spécialité concernée (physico-chimie, géologie, pédologie, pétro-physique).

D'après [TES84], la constitution des argiles comprend plusieurs niveaux superposés :

- ✓ *les feuillets* ;
- ✓ *la particule primaire* (ou la cristallite élémentaire) qui est un empilement de feuillets ;
- ✓ *l'unité morphologique*, plus petite unité stable, qui peut être la cristallite élémentaire isolé (cas de la kaolinite) composé de feuillets sous la forme de plaquettes, le micro domaine (cas des illites) composé d'agrégats de cristallites, eux même composés de 5 à 7 feuillets anhydres, et le quasi-cristal (cas des smectites) formé par l'accilage face à face des feuillets de smectites ;
- ✓ *l'association des unités morphologiques* : soit bord - face, caractérisée par une porosité importante et une isotropie marquée, soit face-face, caractérisée par une faible porosité et une forte anisotropie.

Pour [YON75];[YON99a] ; [YON99b] ; la hiérarchie d'organisation des argiles se présente de la façon suivante : feuillets < particules < domaines ou tactoïdes < "cluster" < "ped" (Fig.1.7).

Selon lui les « peds » représentent l'unité constitutive des argiles observables à l'œil nu (macroscopique) formée par une association de "clusters" de taille microscopique. Alors que, les domaines et les tactoïdes sont ultramicroscopiques (observables en microscopie électronique) et composés de deux ou trois particules.



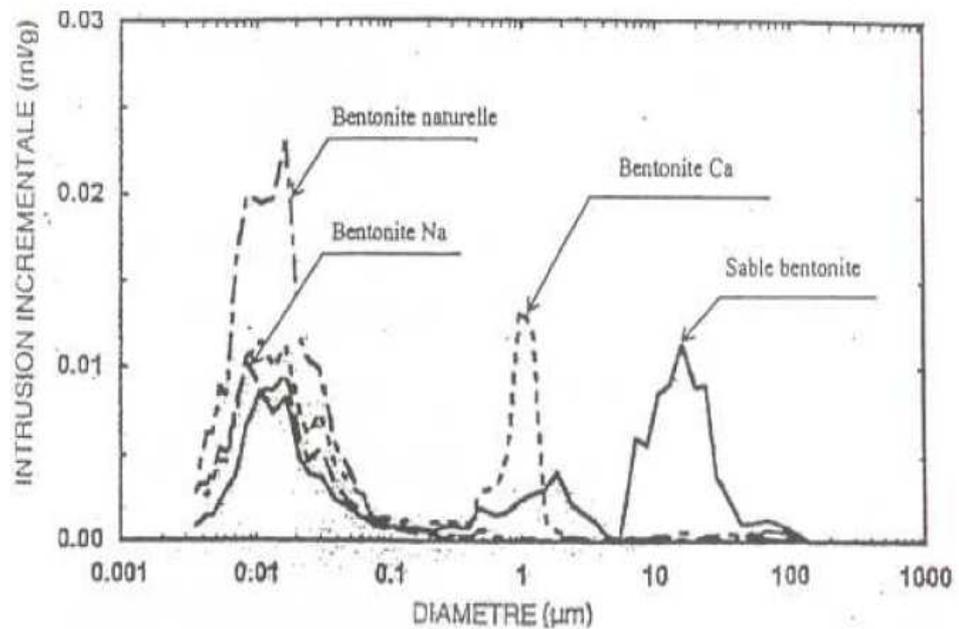
**Fig.1.7.**Organisation des particules d'argiles [YON99].

C'est donc l'organisation de ces diverses unités en association avec des éléments non argileux qui définit la texture d'un sol argileux. Les forces répulsives et attractives entre particules jouent un rôle capital dans l'organisation de ces diverses unités constitutives et de ce fait dans la texture des sols argileux. D'après [YON99], une diminution des forces de répulsion peut entraîner la floculation des particules argileuses, c'est le cas des sols gonflants en présence d'une concentration élevée en sel.

Ont remarqué que dans le cas d'un sol compacté, pour une teneur en eau supérieure à celle de l'optimum Proctor, un pH élevé, une faible concentration en cations échangeables, dont un pourcentage plus élevé de cations monovalents, favorise une texture dispersée ou orientée. Ces mêmes auteurs, travaillant sur une argile ( $W_L = 107\%$ ,  $I_p = 55\%$ ) saturée par différents cations ( $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ), ont montré que l'association des particules diffère en fonction du cation de saturation, ceci ayant pour conséquence une modification des propriétés géotechniques du sol (limite d'Atterberg, compaction, potentiel de gonflement,...) [ABD99]

Par ailleurs, les résultats d'essais porosimétriques [CUI02]; effectués sur trois types de mélange bentonitique compacté à la même densité sèche de  $12,5 \text{ kNm}^{-3}$  : un mélange sable-bentonite (50-50 % en poids), une bentonite sodique et une bentonite calcique, ont montré que le spectre de la taille des pores dépend de la nature des cations présents dans la solution :  $Na^+$  favorise une répartition unimodale des accès de pores vers les faibles rayons 1 nm alors que  $Ca^{2+}$  favorise la formation d'agrégats se traduisant par une répartition bimodale (une famille dont la taille est identique à la précédente et une famille vers  $50 \mu\text{m}$  correspondant à la porosité interagrégat) (Fig.1.8).

La texture du sol dépend donc des interactions eau-argile à tous les niveaux d'organisation, de la particule élémentaire à l'agrégat [TES84]

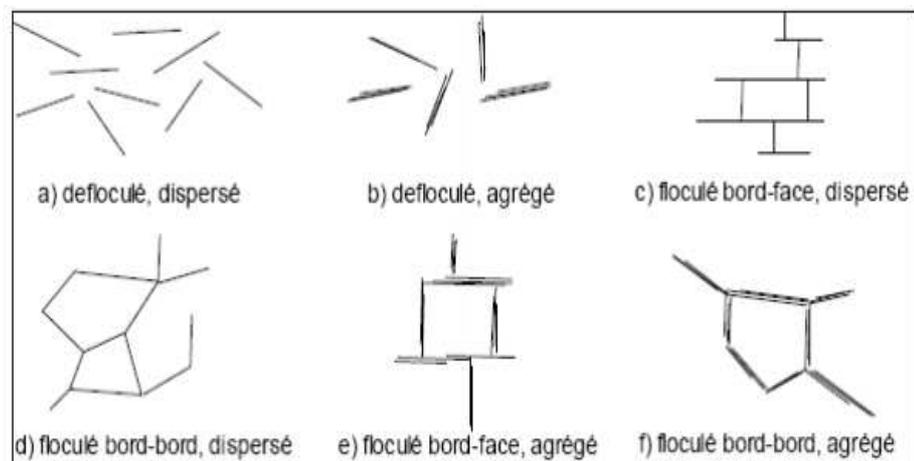


**Fig.1.8.** Influence de l'électrolyte sur la porosité d'une bentonite [CUI02].

### 1.3.2 Classification des différentes textures

A partir des unités constitutives, différentes classifications de la texture des sols ont été proposées.

Ainsi **Van Olphen** a proposé une classification basée sur l'association des particules argileuses en suspension. Cette classification ne repose pas sur une observation directe, mais sur des possibilités d'assemblages géométriques. Le modèle suppose que, dans les suspensions d'argile, trois modes d'associations, liés aux charges de surface et de bord des feuillets d'argiles, peuvent être considérés : bord-face (B-F), bord-bord (B-B) et face-face (F-F) (Fig.1.9) [VAN63]

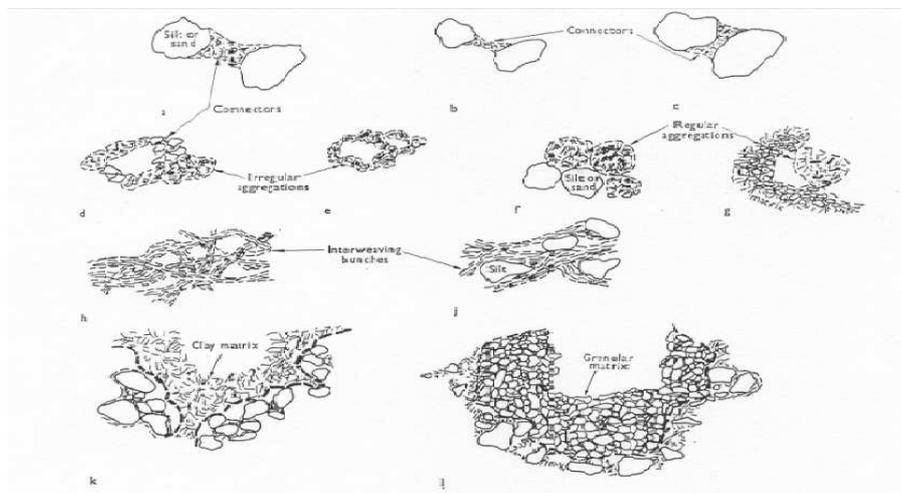


**Fig.1.9.** Arrangement des particules d'argile en suspension [VAN63]; modifié par [BUL01].

**Collins et al**, travaillant sur des sols naturels et utilisant le MEB, ont tenté de compléter la schématisation de Van Olphen dans le cas de sols contenant une proportion non négligeable de grains non argileux. Ils ont introduit dans leur classification les relations existant entre particules argileuses et grains sableux ou silteux (Fig.1.10) : connexions argileuses entre grains silteux (a, b, c), agrégats irréguliers en nid d'abeille (d, e), agrégats réguliers (f, g), particules argileuses entrelacées avec ou sans inclusion silteuse (h, j), matrice argileuse (k) ou matrice granulaire (l) [COL18].

Le Roux distingue, à partir de l'observation d'une marne au Microscope Electronique à Balayage trois classes principales de textures :

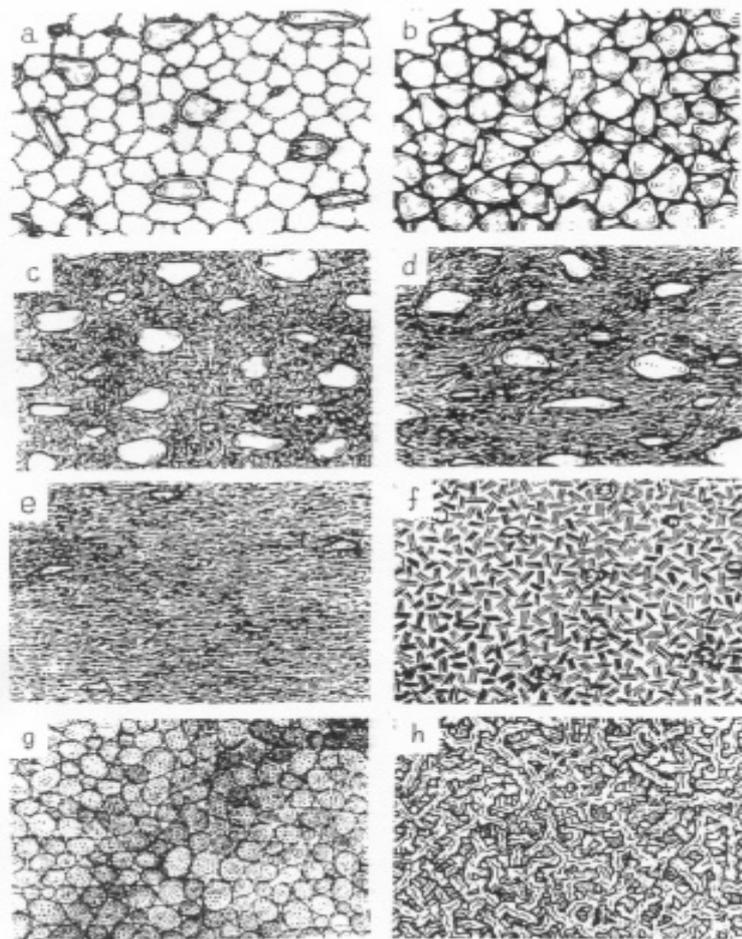
- ✓ *une texture homogène* où tous les minéraux sont intimement mélangés et où aucune direction n'est privilégiée, avec des sous-classes : homogène à dominante argileuse ou à dominante carbonatée, et homogène compacte ou lâche suivant la compacité et la continuité ;
- ✓ *une texture orientée* où une direction privilégiée apparaît dans l'arrangement des grains, en particulier des phyllites ;
- ✓ *une texture floconneuse* ou en microagrégats où la phase argileuse se présente sous forme de flocons grossièrement sphériques, soit seule, soit associée aux carbonates. Lorsque la dimension des flocons devient importante de l'ordre de 100 µm on passe à une texture en microagrégats (A. Roux, [ROU19]).



**Fig.1.10.** Représentation schématique d'assemblages de particules argileuses et grains non argileux [COL18].

À partir d'observations au MEB d'un très grand nombre de sols différents, ont établi une classification de la texture des sols argileux en relation avec leur formation et leur degré de compaction (Fig.1.11) [SER20]. Ils ont défini ainsi cinq types de textures pour les sols d'origine sédimentaire :

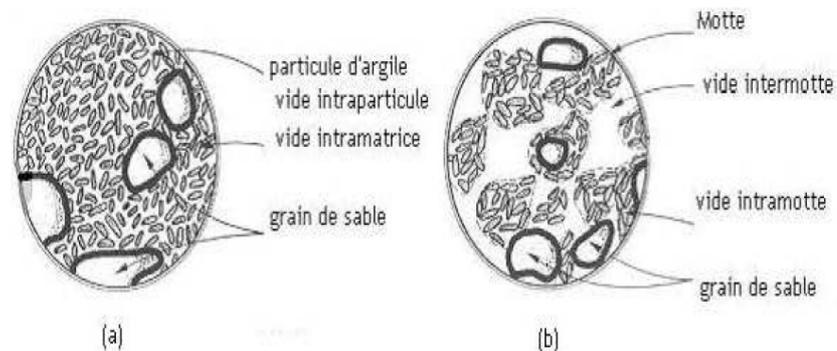
- ✓ *en nid d'abeille* : prédominant dans les dépôts d'origine marine et lacustre récents et n'ayant pas subi de forte compaction ;
  - ✓ *en squelette* : prédominant dans les dépôts glaciaires ne contenant que peu d'argile ;
  - ✓ *matricielle* : prédominant dans les dépôts alluviaux et glaciaires peu compactés ;
  - ✓ *fluidale* : prédominant dans les dépôts alluviaux fortement compactés ;
  - ✓ *laminaire* : prédominant dans les dépôts glacio-lacustres.
- Ils ont aussi défini trois types de textures pour les sols d'origine éluviale :
- ✓ *en domaines* : prédominant dans les kaolinites provenant de l'altération des granites ;
  - ✓ *pseudoglobulaire et en éponge* : prédominant dans les montmorillonites et nontronites provenant des serpentines.



**Fig.1.11.** Classification des textures des sols d'origines sédimentaire et éluviale [SER20] : texture en nid d'abeille (a), en squelette (b), matricielle (c), fluidale « turbulent » (d), laminaire (e), domaines (f), pseudoglobulaire « pseudoglobular » (g) et en éponge (h).

**Gens et al** se basant en particulier sur les travaux de, [COL18] ont proposé un schéma de texture pour les sols gonflants (Fig.1.12). Selon ces auteurs les particules élémentaires sont composées de quelques feuillets sous la forme de

plaquettes et leur assemblage donne des mottes ou des agrégats. Si la texture est dominée par l'arrangement des particules élémentaires on aura une texture « matricielle », et si elle est composée par des mottes en forme de grains on aura une texture « agrégée ». La première texture est typique des sols compactés côté humide de l'optimum Proctor, et la deuxième est représentative de la majorité des sols naturels ou compactés côté sec de l'optimum Proctor. Trois niveaux texturaux peuvent alors être distingués : l'infra, la micro et la macro-texture correspondant respectivement aux particules élémentaires, aux agrégats et à l'arrangement des agrégats entre eux [GEN21].

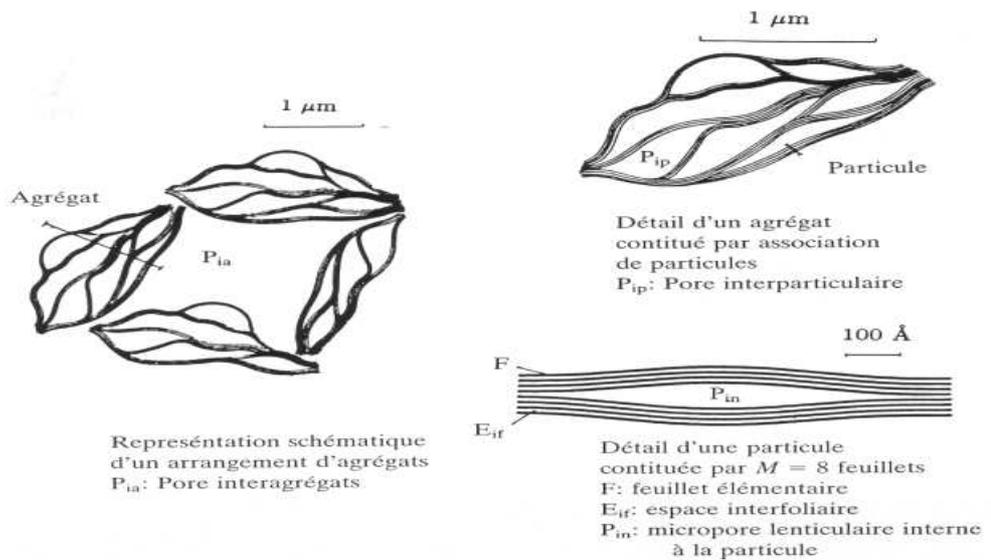


**Fig.1.12.** *Texture des sols gonflants* [GEN21].

**Gens et al** ont repris ce schéma d'organisation, qu'ils qualifient de « double structure » comme fondement de leur modèle de comportement des sols gonflants.

### 1.3.3 Définitions des unités de l'espace poreux

Par ailleurs, à partir de ces différents modèles de structure, les espaces poreux correspondants ont aussi été définis avec la même richesse terminologique : vides inter-(foliaires, lamellaires, particulaires, agrégats), intra-(particulaire, agrégat, domaine). On parle aussi de micropores, méso-pores et macro-pores. La classification des pores donnée par [TOU90]; et reprise par différents chercheurs ([DUR95]; [QI96] ; [ALM96] ; [ROB96] ; [GUI02] ; [VAN02]), paraît assez complète et passe en revue les différents types d'espace poreux dans les sols argileux.



**Fig.1.13.** Représentation schématique des différents types de pores [TOU90]  
Ces auteurs ont proposé quatre types d'arrangement de l'espace poreux (Fig.1.13) :

- ✓ *l'espace interfoliaires (ou inter lamellaire)* existant à l'intérieur des empilements périodiques de feuillets au sein des paquets (ou « particules ») ;
- ✓ *les pores lenticulaires* correspondant aux zones de défauts où deux zones périodiques ont un écartement supérieur à la distance interfeuillets [VAN02], au sein d'un même paquet (ou particule). Cette porosité interfeuillets est due à la déformabilité ou la flexibilité des feuillets et peut atteindre une taille de 100 Å. Elle peut être ouverte ou fermée à la pénétration de l'eau [QI96]
- ✓ *les pores interparticulaires* correspondant à la porosité entre « particules », au sein d'entités plus grandes appelées « agrégats ». Ces pores ont une taille maximale de l'ordre du micron ;
- ✓ *Les pores interagrégats* correspondant aux vides entre les agrégats, leur taille étant au moins égale au micromètre

Le comportement hydrique et mécanique des sols argileux dépend de cette organisation et plus particulièrement de la cohésion ou de la liaison entre les différentes entités (particules, agrégats, grains,...) à l'origine de cette organisation. La morphologie de cet assemblage conditionne largement les interactions eau-sol et ainsi le phénomène de retrait-gonflement.

#### 1.4 Forces entre particules d'argile

Les feuillets sont soumis à trois forces dont deux de nature répulsive et l'autre attractive du type Van der Waals.

La résultante des forces, qui est de nature répulsive, diminue avec l'augmentation de la distance interfoliaire, autrement dit avec le gonflement.

---

#### 1.4.1 Force de répulsion

Les forces de répulsion sont dues généralement à l'énergie d'hydratation des feuillets et des cations compensateurs, à l'interaction des doubles couches ioniques associés à des feuillets voisins et à la pression osmotique.

---

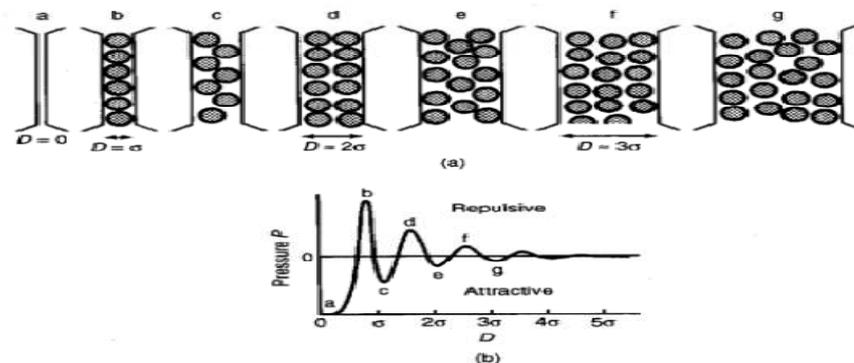
#### 1.4.2 Force d'attraction

La force de Van der Waals est de nature attractive. Elle génère une énergie d'attraction qui est inversement proportionnelle à la distance qui sépare les deux feuillets.

---

#### 1.4.3 Force d'hydratation (attractive – répulsive)

En théorie, lorsque la distance interfeuille est réduite, les forces d'attraction dominent les forces de répulsion, autrement dit il n'y a pas de gonflement.



**Fig.1.14.** Force d'hydratation [ESL88].

---

### 1.5 Phénomène de gonflement

---

#### 1.5.1 Mécanisme de gonflement

Certaines argiles, pour lesquelles les liaisons interfeuillets sont très faibles, ont la propriété de fixer des molécules d'eau entre deux feuillets voisins comme dans le cas des smectites. L'eau pénètre alors à l'intérieur des particules et s'organise en couches monomoléculaires.

### 1.5.2 Description du phénomène de gonflement

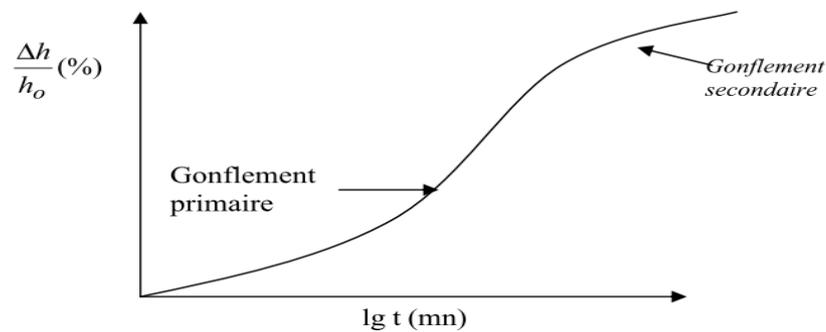
On distingue deux types de gonflements, un gonflement intraparticulaire (interfoliaire) et un gonflement interparticulaire (fig.1.14) [MOU88]; [POP86].

- ✓ *Le gonflement interfoliaire* résulte de la cassure des faibles liaisons entre les feuillets des particules d'argile, et permettant l'acquisition d'eau au sein de la structure des particules. Ce gonflement est assez rapide et son amplitude est très notable.
- ✓ *Le gonflement interparticulaire* résulte de l'apport d'eau supplémentaire qui écarte les plaquettes (assemblage de feuillets) les unes des autres. Cette réaction est lente et peut durer des années même lorsque la succion devient nulle. Le gonflement interparticulaire a une ampleur assez limitée et affecte toute les argiles contrairement au gonflement interfoliaire.



**Fig.1.15.** Mécanismes de gonflement des argiles par hydratation [MOU88]

Le processus de gonflement des sols argileux est contrôlé par plusieurs mécanismes superposés à différentes échelles et s'exprime de manière différée à l'échelle macroscopique. La cinétique du gonflement, c'est-à-dire la relation existant entre la déformation et le temps, est en générale très lente et dépend de la nature et de l'état du sol et du niveau de chargement [SER96].



**Fig.1.16.** Courbe de gonflement en fonction du temps.

Sur la courbe du gonflement en fonction du logarithme du temps (Fig.1.16), obtenue, soit lors d'un essai de gonflement libre, soit lors d'un palier de déchargement, il est possible de distinguer deux phases de déformations : un gonflement primaire et un gonflement secondaire [SER96] ; [PAR80] ; [ALO93]

- ✓ *Gonflement primaire*: Qui prend place très tôt, sa fin est caractérisée par un point d'inflexion permettant le changement de l'allure de la courbe
- ✓ *Gonflement secondaire* : Qui est caractérisé par la portion linéaire de la courbe

## 1.6 Facteurs influençant le retrait-gonflement des sols argileux

Les propriétés du sol et les conditions environnantes sont des facteurs importants contrôlant le phénomène de retrait - gonflement des sols. En général, les facteurs contrôlant le gonflement contrôlent aussi le retrait des sols mais à différents degrés [CHE87].

### 1.6.1 Facteurs intrinsèques

#### 1.6.1.1 Composition minéralogique

Ce facteur est très important pour estimer le gonflement d'un sol. Les propriétés gonflantes du matériau seront d'autant plus marquées que le pourcentage d'éléments argileux est grand (<2 μm).

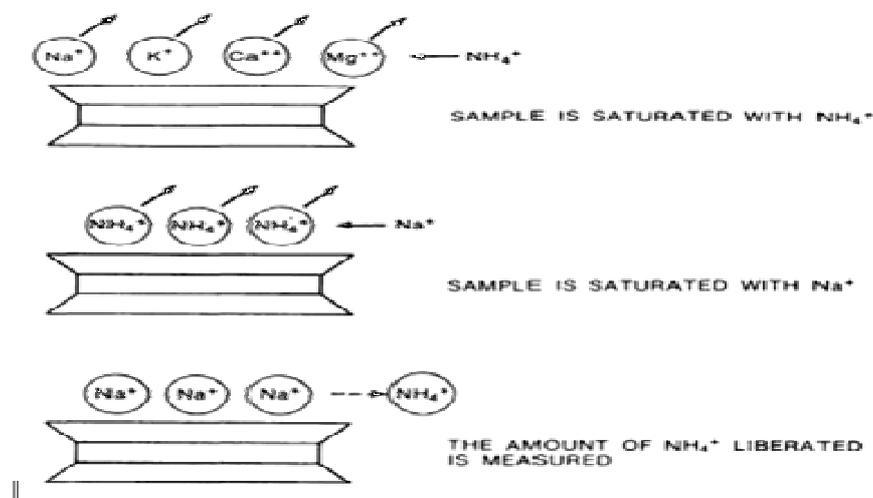
- ✓ L'étudié le gonflement libre de trois types d'argile : la kaolinite, l'illite et la montmorillonite. Il constate des différences dans le taux et la cinétique du gonflement entre les trois argiles utilisées avec une supériorité remarquée pour la montmorillonite, [SRI86].

### 1.6.1.2 Capacité d'échange cationique (CEC)

C'est la capacité d'une argile à échanger des cations. Elle est exprimée en milliéquivalent par 100 grammes d'argiles et représente la charge (sous forme de cations attirés à la surface de la particule) nécessaire pour l'électroneutralité.

Cette aptitude des argiles à libérer leurs cations dépend de la valence et la masse atomique du cation présent dans la solution, selon l'ordre croissant suivant:

$Li^+ < Na^+ < K^+ < H^+ < Mg^{++} < Ca^{++} < Al^{+++}$  (voir tableau 1.2). Le Principe de la mesure est montré sur la fig.1.17.



**Fig.1. 17.** Mesure de la CEC [ESL88].

**Tableau.1.2.** Relation entre type de cations et gonflement [GUP67].

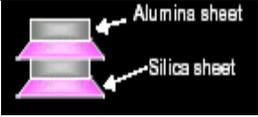
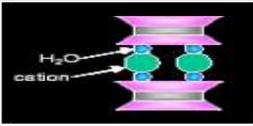
Cations	ordre de gonflement
Monovalents	$Na^+ > K^+ > NH_4^+ > H^+$
Bivalents	$Ca^{2+} > Mg^{2+} > Sr^{2+} > Ba^{2+}$
Trivalent	$Al^{3+} > Cr^{3+} > Fe^{3+}$

### 1.6.1.3 Surface spécifique d'une particule argileuse

Elle est comprise entre les particules et la surface interne correspondant à l'espace interfoliaire. L'augmentation de la surface spécifique donne un pouvoir de gonflement plus important et par conséquent un potentiel de gonflement plus élevé.

Le tableau 1.3 représente les principales caractéristiques des quatre types d'argiles.

**Tableau.1.3 .Caractéristiques physico-chimiques des minéraux argileux courants, [GRI59].**

Minéraux argileux	Type de structure	Structure du minéral	Taille De la particule	S.S.T (m2/g)	C.E.C (meq/100)	Espace interfoliaire (Å)
Kaolinite	1 :1		Grande (> 1µm)	10-20	5-15	7,1-7,2
Montmorillonite (Smectite)	2 : 1		Petite (<1µm)	600-800	80-100	14,0-15,0
Illite	2 :1		Moyenne (<1µm)	90-130	20-40	9,9-10,1
Chlorite	2 :1 :1		Petite (<1µm)	100-175	10-30	13,6-14,7

#### 1.6.1.4 Activité des argiles

Les valeurs des limites d'Atterberg sont liées à la quantité d'eau retenue à la surface des particules et ceci représente la quantité d'argile présente dans le sol [SKE53], a défini l'activité d'une argile par le rapport de l'indice de plasticité ( $I_p$ ) et du pourcentage des éléments inférieurs à deux microns ( $C_2 < 2\mu m$ ).

$$A_1 = I_p / C_2 \dots \dots \dots [1.4]$$

Skempton a classifié les argiles selon leurs activités comme suit: [TEC96] :

1. *Argile inactives* : pour ceux qui ont une activité inférieure à 0,75. Ces argiles sont à base de kaolinite, ou qui contiennent peu de minéraux argileux.
2. *Argile normale* : qui a une activité comprise entre 0.75 et 1.25.
3. *Argile active* : qui a une activité comprise entre 1.25 et 2.
4. *Argile très actives* : qui a une activité supérieure à 2.

En ce qui concerne les argiles compactées, [SEE62], ont introduit une modification à la définition de Skempton sous la forme suivante :

$$A_2 = I_p / (C_2 - n) \dots\dots\dots [1.5]$$

n = 5 cas des sols naturels ; n = 10 cas des sols reconstitués

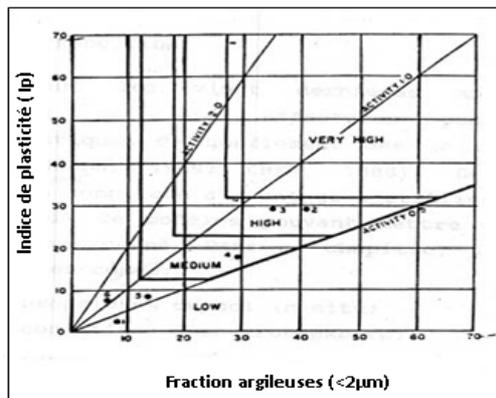
Le tableau 1.4 présente le minéral prédominant dans la matrice argileuse basant sur l'activité, proposé par, [SKE53].

L'activité d'un sol dépend essentiellement de sa composition minéralogique : le type et la quantité du minéral argileux, de la teneur d'argile et des ions échangeables, [ELS86]. Les deux définitions citées ci dessus indiquent que l'activité est proportionnelle à l'indice de plasticité et inversement proportionnelle à la teneur en éléments inférieurs à deux microns (fig.1.18).

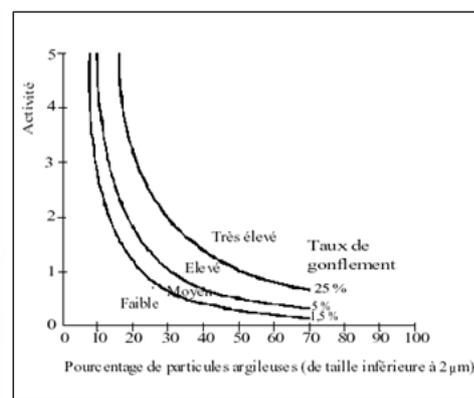
D'autre part, [SEE62] ont proposé un abaque permettant d'évaluer le potentiel de gonflement à partir de l'activité et du pourcentage de particules fines ( $C_2 < 2\mu\text{m}$ ), (Fig.1.19).

**Tableau.1.4. Activité de différents minéraux ([SKE53], [MIT76]).**

Minéral	Activité
Montmorillonite $\text{Na}^+$	4 - 7
Montmorillonite $\text{Ca}^+$	1,5
Illite	0,5 - 1,3
Kaolinite	0,3 - 0,5
Calcite	0,2
Quartz	0



**Fig.1.18. Abaque pour identification des sols gonflants [DJE01]**

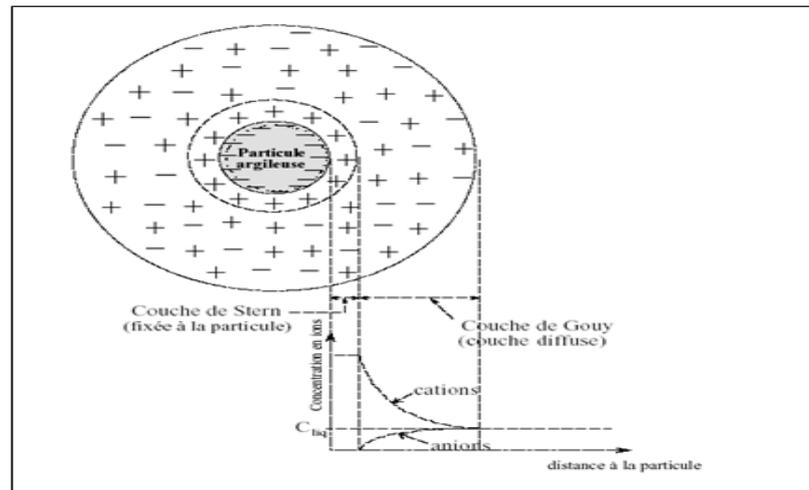


**Fig.1.19. Abaque d'évaluation de potentiel de gonflement [SEE62]**

### 1.6.1.5 Théorie de la double couche

La théorie de la double couche diffusée, qui a été le sujet de plusieurs études expérimentales, essaye de donner une explication au mécanisme de gonflement des argiles à l'échelle microscopique. L'existence et la formation de cette double couche est liée principalement à la charge de la particule argileuse qui est généralement négative ; celle-ci liée rigidement sur sa surface, une

première couche d'ions dite couche fixe, au-delà, les forces de liaison se relâchent et la particule s'entoure d'une atmosphère d'ion dite diffusée, l'ensemble constituent ce qu'on appelle la double couche (fig.1.20).



**Fig.1.20.** Schéma d'une double couche d'eau entourant une particule argileuse [BUL01].

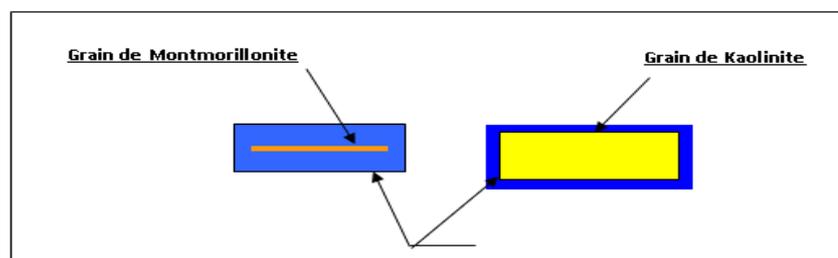
La théorie de la double couche diffusée a été initialement proposée par [GOU10] et [CHA13] et plus tard modifiée par [STE24]. Une description simple de la double couche diffusée peut être donnée comme suit :

- ✓ La première couche comprend :
  1. La particule argileuse (charge négative en surface).
  2. Couche mince de cations (couche de Stern).
  3. Des molécules d'eau

Notons que la couche mince de cations ainsi que les molécules d'eau sont fortement retenues contre la surface, formant ainsi une couche adsorbée possédant une charge globale négative (fig.1.21).

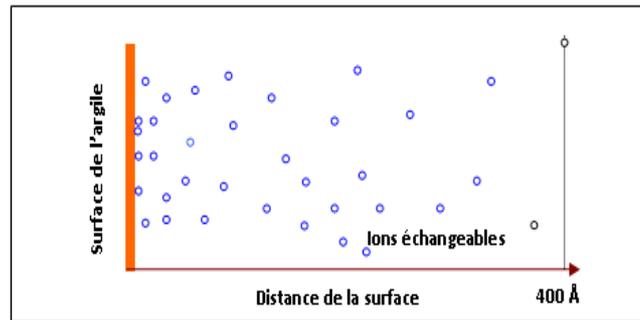
- ✓ La deuxième couche comprend :
  1. Couche diffusée de contre - ions (cations hydratés et anions).
  2. Des molécules d'eau.

Cette deuxième couche possède une charge globale positive



**Fig.1.21.** Schéma de l'eau adsorbée des minéraux argileux

(D'après Philipponnat, Huber, 1997, [PHI97]).



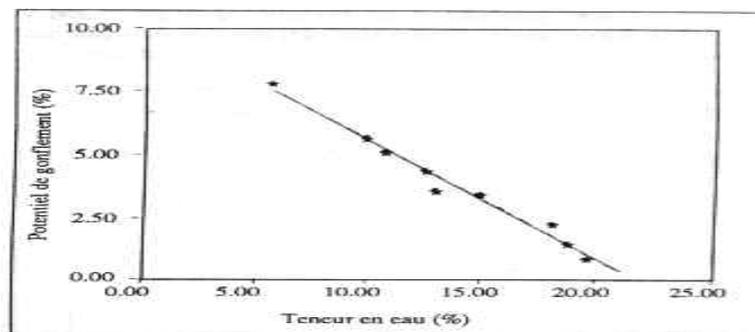
**Fig.1.22.** Ions échangeables (D'après Philipponnat, Huber, 1997, [PHI97])

### 1.6.2 Facteurs externes

Ces facteurs sont définis à l'échelle macroscopique contrairement aux facteurs précédents qui interviennent à l'échelle microscopique.

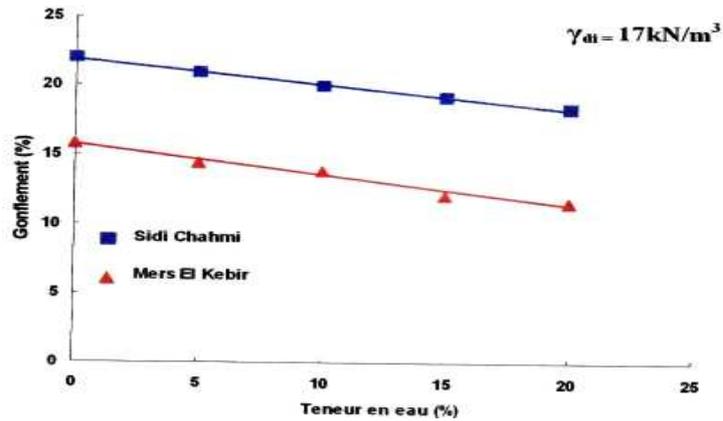
#### 1.6.2.1 Teneur en eau initiale

Le gonflement pour différentes teneurs en eau initiales suit une loi linéaire (fig.1.23). La nature de cette relation autorise la définition d'une teneur en eau critique (égale à 22%) qui donnerait lieu à un gonflement apparent nul [ALO87].



**Fig.1.23.** Potentiel de gonflement en fonction de la teneur en eau initiale

- ✓ Il y'a une tendance à la diminution du gonflement lorsque la teneur en eau initiale augmente. Ils confirment que l'augmentation de la teneur en eau initiale ne conduit à une diminution du gonflement qu'au dessus de la limite de retrait ; pour les teneurs en eau inférieures à cette limite, le gonflement ne change pas [HAC99].
- ✓ L'influence de la teneur en eau sur le gonflement. Pour cela il a réalisé cinq essais pour deux argiles à différentes teneur en eau : 0, 5, 10, 15 et 20%, selon la fig.1.24, la relation entre le gonflement et la teneur en eau initiale est presque linéaire, et l'augmentation du gonflement est inversement proportionnelle à la teneur en eau initiale, ce qui confirme les résultats d'Alonso et al, 1987.

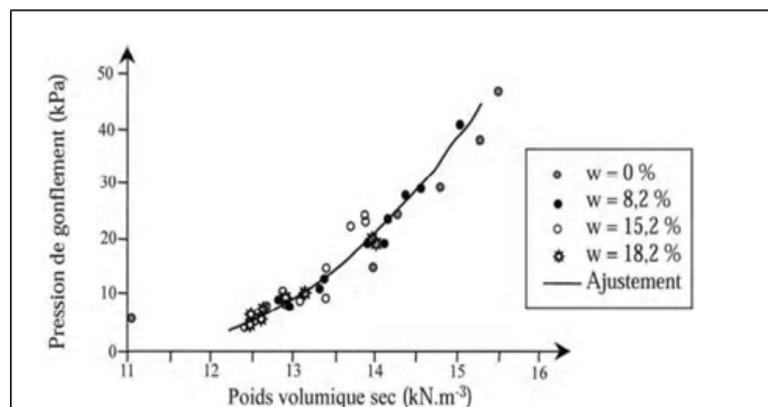


**Fig.1.24.** *Variation du gonflement en fonction de la teneur en eau initiale [HAC99].*

### 1.6.2.2 Densité sèche

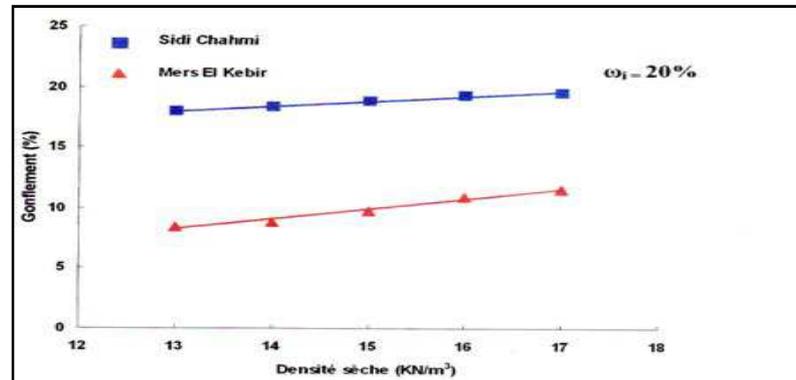
La densité sèche initiale influence considérablement sur le gonflement et la pression de gonflement.

- ✓ **Suratman (1985)** a réalisé des essais sur la montmorillonite, l'illite et la kaolinite et il a trouvé les mêmes résultats que [CHE88].
- ✓ Ont menés 32 essais de gonflement à volume constant avec quatre teneurs en eau initiale. Ou il a constaté que la pression de gonflement varie proportionnellement à la densité et inversement proportionnelle à la teneur en eau (Fig.1.25) [SRI86].
- ✓ Ont effectués des essais de gonflement sur quatre bentonites sodiques « Na » compactées à différentes densités sèches initiales. Ils ont remarqué que le taux de gonflement croît linéairement avec la densité sèche initiale [KOM94]



**Fig.1.25.** *Variation de la pression de gonflement en fonction de la densité sèche [SRI86].*

- ✓ L'influence de la densité sèche sur le gonflement. Pour cela il a effectué des essais sur des échantillons reconstitués de deux argiles, en variant la densité sèche entre 13 jusqu'à 17 KN/m<sup>3</sup> à une teneur en eau initiale de 20%. Il a constaté que le gonflement libre maximal croît linéairement avec l'augmentation de la densité sèche initiale. (Fig.1.26) [HAC06].



**Fig.1.26.** Variation du gonflement en fonction de la densité sèche initiale [HAC06].

### 1.6.2.3 Mode de compactage

Certains auteurs ont abordés les modes de compactages (statique ou dynamique)

- ✓ Un échantillon compacté statiquement abouti à un gonflement plus fort [SEE62].
- ✓ Un gonflement final plus faible pour des échantillons reconstitués par compactage statique que pour des échantillons intacts [HAC06].
- ✓ L'influence de la méthode de compactage sur la perméabilité. D'après eux, cette différence est due au fait que la structure d'une argile est très influencée par les déformations de cisaillement associées au processus de compactage. Mitchell et al. (1985)

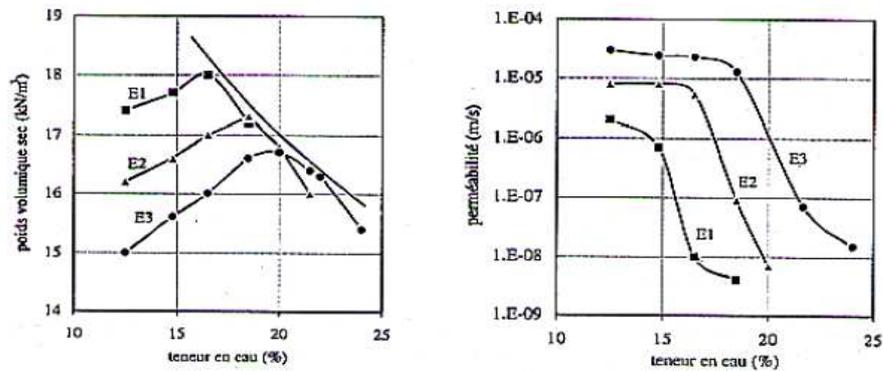
L'influence du compactage sur la perméabilité fait intervenir, d'une part, l'énergie de compactage appliquée à l'échantillon ou à la couche mise en place, et d'autre part le mode de compactage proprement dit (statique, dynamique ou par pétrissage).

Lorsqu'on augmente l'énergie de compactage, la tendance est à la diminution de la valeur de  $w_{opt}$ , quant à la densité sèche maximale ( $\gamma_{dmax}$ ), elle est une fonction croissante de l'énergie de compactage.

Du point de vue de la perméabilité, l'augmentation de l'énergie de compactage se traduit par une diminution de la conductivité hydraulique ont également montré.

Effectivement, ces déformations de cisaillement sont directement liées au degré de dispersion des particules dans l'échantillon. Ils ont ainsi montré que les déformations de cisaillement étant supérieures pour le compactage par

pétrissage que pour le compactage statique et le compactage dynamique, les échantillons compactés par pétrissage sont moins perméables que ceux compactés par une autre méthode (fig.1.27). Toutefois, la méthode de compactage, si elle a une influence appréciable du côté humide de la courbe de compactage, a peu d'effet du côté sec.



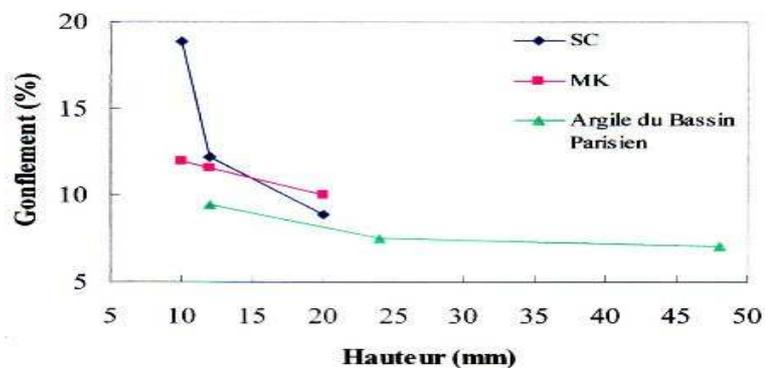
E1 : compactage par pétrissage ; E2 : compactage statique ; E3 : compactage dynamique.

**Fig.1.27.** Comparaison entre les valeurs de perméabilité obtenue sur des éprouvettes compactées par pétrissage et par méthode statique (Mitchell et al, 1985)

#### 1.6.2.4 Effet de l'échelle

C'est l'influence de la hauteur ou du diamètre de l'échantillon sur le gonflement libre ou sur la pression de gonflement

- ✓ Les essais sur des échantillons de trois argiles, argile de Sidi Chahmi (SC), argile de Mers el Kébir (MK) et argile du bassin Parisien avec des hauteurs 10, 12 et 20 mm, et de 40, 70 et 50 mm de diamètre respectivement et il a déduit qu'il y'a une diminution du gonflement mesuré lorsque la hauteur de l'échantillon augmente, dû au frottement sur la paroi du moule (fig.1.28) [HAC06].



**Fig.1.28.** Variation du gonflement final en fonction de l'épaisseur des échantillons [HAC06].

---

## 1.7 Stabilisation des sols gonflants

D'après les conséquences des sols expansifs, Plusieurs chercheurs ont étudié la stabilisation des sols expansifs. Le gonflement des sols argileux est un phénomène très complexe qui fait intervenir un grand nombre de paramètres intrinsèques et environnants. Cette complexité est due principalement à la structure minéralogique de l'argile (mélange d'illites et montmorillonites).

Un bon nombre de solution a été proposé afin de résoudre ce problème, il existe plusieurs techniques de stabilisation, parmi elles, on peut citer deux méthodes principales:

- ✓ *Stabilisation mécanique* : Ce sont par exemple les sables, les graviers, utilisés en mélange avec les argiles gonflantes. Ces matériaux inertes réduisent le pourcentage global d'éléments actifs (inférieurs à 2 microns) et réduisent, par la même, l'activité du gonflement de l'argile. L'efficacité de ce mode de traitement sera fonction du pourcentage d'éléments inertes, de leur granulométrie et du mode de mise en place du mélange.
- ✓ *Stabilisation physico-chimiques* : sont employés surtout pour des sols contenant une certaine quantité d'argile. Ils ont pour effet de réagir avec la fraction argileuse et de modifier leur environnement chimique et sa structure minéralogique.

---

### 1.7.1 Stabilisation mécanique

Parmi les méthodes appliquées, nous pouvons citer:

- ✓ Méthode de compactage.
- ✓ Méthode de substitution.
- ✓ Méthode de pré humidification.
- ✓ Stabilisation par ajout de sable

---

#### 1.7.1.1 Méthode de compactage

En (1959), il a été proposé par Dawson et Chen (cité par, [BEN04]) un compactage à faible densité pour des sols très expansifs.

L'influence de la densité et de l'humidité sur le compactage de l'argile gonflante, le gonflement de l'argile est faible lorsqu'elle est compactée à une basse densité et une grande teneur en eau (cité par, [HOL56]).

Les argiles compactées du côté sec de l'optimum ont plus tendance à gonfler si elles sont compactées du côté humide (cité par, [SEE61]).

[KAO54], ont montré qu'en gardant la même teneur en eau et à densité initiales différentes, le gonflement augmente proportionnellement avec la densité.

On peut conclure pour la réduction du potentiel de gonflement, que les sols doivent être compactés du côté humide de l'optimum.

---

#### 1.7.1.2 Méthode de substitution

Cette technique a pour objectif la diminution globale du soulèvement, à la fois par suppression du sol gonflant et par la mise en place du remblai qui peut amortir une partie du soulèvement ultérieur et aussi par une amélioration de l'homogénéité de couche de sol, donc du soulèvement uniforme pour l'ensemble de la construction, [KAO54].

- ✓ *Si la couche a une faible épaisseur*, il peut être possible de la supprimer totalement (substitution totale).
- ✓ *Si la couche à une grande épaisseur*, on ne peut pas envisager une suppression complète, il faut excaver jusqu'à une certaine profondeur puis remblayer avec du sable ou autre matériau graveleux (substitution partielle).

---

#### 1.7.1.3 Méthode de préhumidification

Il s'agit d'augmenter artificiellement la teneur en eau du sol jusqu'à saturation, ce qui engendre un gonflement maximal, [CHE88]

Cette méthode est basée sur les hypothèses suivantes :

Avant toute construction, on provoque un gonflement par humidification.

Le mouvement de gonflement est stabilisé après la construction. Généralement deux techniques sont utilisées.

- ✓ Simple arrosage par jet
- ✓ Création de bassin au dessus du sol gonflant

D'après, [CHE88], l'augmentation de la teneur en eau initiale diminue le potentiel de gonflement mais n'influe pas sur la pression de gonflement.

Ce résultat a permis de conclure à l'inefficacité du procédé de préhumidification (cités par, [KAO94])

---

#### 1.7.1.4 Stabilisation par ajout de sable

Il s'agit d'augmenter artificiellement la teneur en eau du sol jusqu'à saturation, ce qui engendre un gonflement maximal (d'après, [CHE88]) C'est dans les années soixante que les traitements des sols sont devenus une pratique courante, spécialement, la stabilisation chimique qui a été employée.

Des études récentes ont été menées par de nombreux chercheurs et qui montrent que l'ajout de sable réduit la plasticité du mélange argile-sable, donc réduit son potentiel de gonflement. Nous citerons certaines d'entre elles :

L'étude de [SAT69], a été consacrée au traitement des argiles gonflantes de l'Inde (black cotton) sous forme de mélange avec le sable, et sous forme de couches. Il a constaté que la pression du gonflement est réduite par le simple ajout de faibles pourcentages de sable. Plus le pourcentage de sable augmente, plus la réduction de la pression diminue (différence marquée à partir 50% de sable). L'insertion de couches de sables (différentes positions avec l'argile), réduit la pression du gonflement en proportion appréciable due principalement à la capacité du sable à absorber le gonflement de l'argile. Cette capacité du

sable dépend de la facilité de la couche de sable avec laquelle elle se déforme par compression ou, par mouvement latéral. [DID72], a montré qu'un ajout de 10 % de sable suffit pour réduire la pression de gonflement de 50 % environ et que la relation qui lie la pression de gonflement au pourcentage de sable, est logarithmique.

L'étude de [KOM69] a été réalisée sur des mélanges d'argiles traitées par l'ajout de sable à différents pourcentages. L'étude a permis de montrer que l'ajout de sable augmente la densité sèche maximale et diminue la teneur en eau optimale pour des pourcentages de sable ajouté allant de 10% à 30%. [SUR85], a réalisé cinq essais de gonflement libre avec cinq pourcentages de sable (10% à 50%) à granularité moyenne ( $0.1\text{mm} < D < 0.5\text{mm}$ ). D'après ces résultats, un pourcentage de 20 % de sable permet de réduire le gonflement libre de 26% et 30% de sable fait diminuer le gonflement de 50% de sa valeur initiale. Il a vérifié la validité de la relation (citée par, [CHE88]) :

$$G = K C^x$$

G = % de gonflement ; C = % <math> < 2 \mu\text{m}</math>

x et K coefficients dépendants du type d'argile

[KAO94], ont montré que l'addition de 20 % de sable réduit le potentiel de gonflement de 25% et la pression de gonflement a été réduite de plus de 60%, par contre pour 80 % de sable, la réduction était de 75%.

---

## 1.7.2 Stabilisation chimique

C'est dans les années soixante que les traitements des sols sont devenus une pratique courante, spécialement, la stabilisation chimique qui a été employée pour différents projets, en utilisant des liants hydrauliques qui sont principalement les additions de chaux et /ou de ciment et l'hydratation avec les solutions salines, dont le but de minimiser le gonflement.

D'une manière générale, les procédés les plus utilisés dans le domaine géotechnique pour stabiliser les sols argileux sont les suivantes :

---

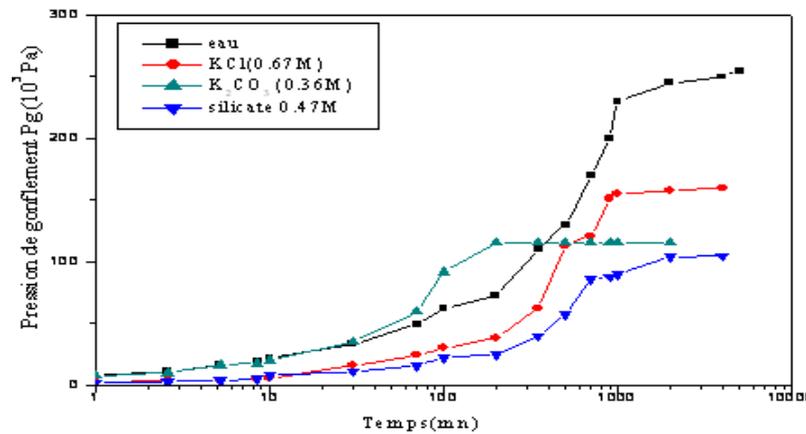
### 1.7.2.1 Addition des solutions salines

De nombreux travaux ont montré que la stabilisation par les sels pouvait réduire considérablement le gonflement des argiles. Nous citerons les résultats et les interprétations de quelques auteurs :

- ✓ [DID72] s'est penché dans ces recherches sur l'influence des sels sur la pression du gonflement et le gonflement libre de la montmorillonite. Il a donné des relations exprimant le gonflement en fonction du pourcentage théorique d'éléments inférieurs à 2 microns, et de l'indice de retrait de la montmorillonite pour divers fluides hydratants.
- ✓ Waller et Lawler, cité par [TIS83] ont étudié l'influence des sels sur un échantillon d'argile reconstituée à partir de déblai de forage. Les meilleurs résultats sont obtenus à l'aide des solutions qui associent le KCl avec un polymère.
- ✓ [ILT79] a étudié plusieurs types de gonflement en présence de plusieurs types de sels. Cette étude a mis en évidence deux agents stabilisants, le chlorure de potassium et le chlorhydrate de guanidine.

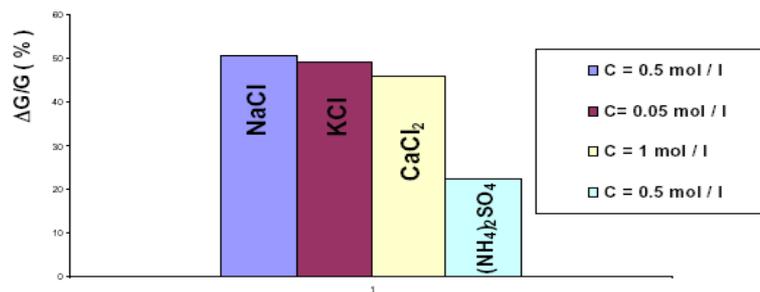
- ✓ Azzouz et Didier (1983, cité par [TIS83]), ont effectué des travaux sur la stabilité des argiles feuilletées. Ils ont montré que les meilleurs résultats peuvent être obtenus par l'association d'un sel de potassium et d'un polymère, ce qui a été confirmé par Waller et Lawler (1976).

La fig.1.30 montre les variations de la pression de gonflement en fonction du temps pour différentes solutions salines.



**Fig.1.29.** Variation de la pression de gonflement en fonction du temps avec les différentes solutions (D'après [DID83])

- ✓ [HAC99] ont étudié la réduction du gonflement final de plusieurs échantillons intacts des sols d'Algérie par ajout de quatre solutions saline (KCl, NaCl, CaCl<sub>2</sub> et NH<sub>4</sub>Cl) avec les molalités (mole/litre noté M) 0,05 M ; 0,5M ; 1 M et 2M. Dans cette étude, dans la majorité des cas, des réductions substantielles ont été obtenues avec de fortes concentrations de sels et que la réduction peut atteindre 80%.
- ✓ [HAL88] ont étudié la réduction du gonflement des argiles de la région d'Oran par des sels, des polymères et par l'association sel + polymère. Des réductions importantes ont été observées par l'association d'un sel de Chlorure d'ammonium et d'un polymère par rapport à celle donnée par le sel seul ou celle donnée par une forte concentration de polymères. La réduction du taux de gonflement peut atteindre 90%.
- ✓ [HAC99] montrent, d'après les résultats obtenus, que les sels minéraux aient une efficacité très forte sur la réduction de gonflement, et que le KCl est plus efficace que le NaCl, ce qui est confirmé par [ABO04], fig.1.31.



**Fig.1.30.** Effet des sels utilisés sur l'argile de Mansourah [ABO04].

### 1.7.2.2 Stabilisation par les liants hydrauliques (Chaux, Ciment)

L'utilisation de la chaux comme liant est très ancienne : Grande Muraille de Chine localement en argile traitée à la chaux; voies romaines, habitations (chaux+sable+terre argileuse).

L'utilisation du ciment date du début du siècle : en Allemagne, un grand nombre de sols d'aérodromes ont été stabilisés au ciment durant la deuxième guerre mondiale. Mais surtout depuis vingt ans, l'emploi de ces liants s'est développé en technique routière. Elle concerne essentiellement les sols fins (argileux, limoneux...).

La chaux et le ciment ont pour effet de réagir avec la fraction argileuse et de modifier leur environnement chimique et sa structure minéralogique. Parmi les stabilisations les plus couramment utilisés:

#### 1.7.2.2.a Stabilisation par ajout de la chaux

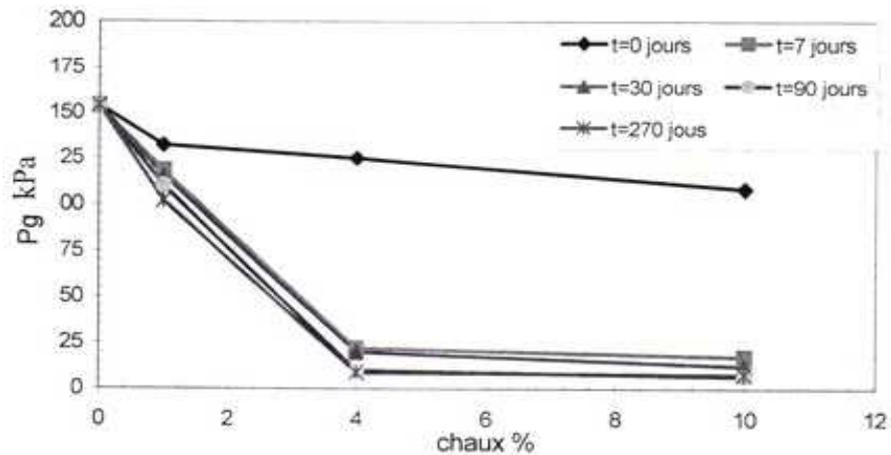
L'utilisation de la chaux vive comme stabilisant est une technique très ancienne. Les caractéristiques des sols traités à la chaux dépendent du type de sol, de la qualité de la chaux, du pourcentage employé et de conditions de cure (temps, température).

Généralement l'addition d'un pourcentage de 3% à 8% par poids de la chaux hydratée au sol, améliore les caractéristiques mécaniques et réduit le gonflement. Le processus chimique intervenant pendant la réaction, est très complexe, les réactions essentielles sont l'interchange ionique et la carbonisation.

Il est maintenant reconnu que l'addition de la chaux aux argiles gonflantes conduit à la réduction de la plasticité. Beaucoup de chercheurs ont réalisé des essais de stabilisation chimique des sols, parmi eux, [MOU69] qui ont montré, que l'addition au sol d'un faible pourcentage de chaux (2% à 6%) entraîne une réduction importante du gonflement et augmente sa résistance. Donc on peut conclure que la chaux réduit la plasticité du sol, réduit son potentiel de gonflement et augmente sa résistance.

Khattab ,2002 ( cité par [HAC06] ), a effectué des essais de pression de gonflement sur des échantillons d'une argile gonflante (argile de la région Parisienne, France nommée FoCa), compactés à l'optimum Proctor à différentes teneur en chaux et pour des temps de mûrissement de 0.7, 30, 90, et 270 jours, a conclue que les résultats montrent que la pression de gonflement a pratiquement été éliminée après 7.

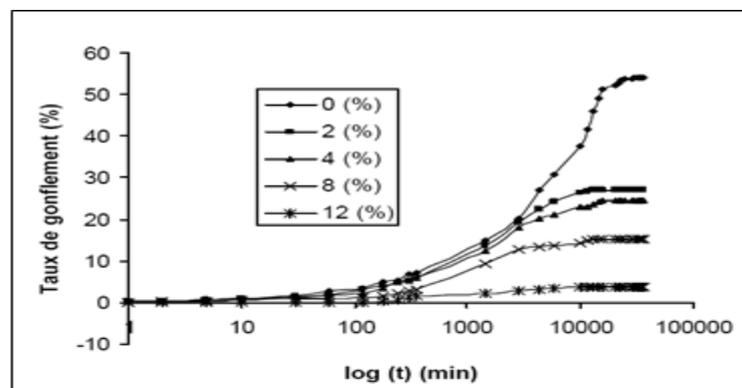
- ✓ jours en utilisant 4% de chaux, et qu'une quantité de chaux de plus de 4% contribue très peu à la réduction de la pression de la pression de gonflement (fig.1.32).



**Fig.1.31.** Effet de la chaux sur la pression de gonflement des échantillons traités compactés à l'OPN Khattab, 2002, cité par, [HAC06].

[DGE01], (fig.1.33), ont conclu d'après des résultats des essais de gonflements libre effectués sur des échantillons reconstitués d'argile de Tlemcen et dosés à différents taux de chaux et de ciment que :

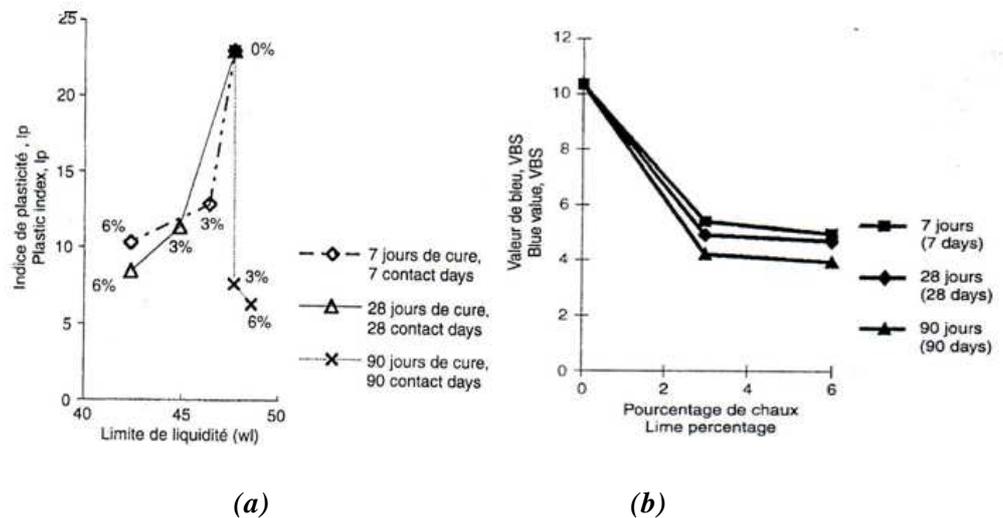
1. Le gonflement diminue quand le dosage augmente.
2. La chaux et le ciment ont des effets pratiquement similaires sur les paramètres du gonflement.
3. Pour un taux de dosage identique, le gonflement produit est presque identique.
4. Le gonflement est pratiquement nul pour le dosage à 12%.



**Fig.1.32.** Effet du dosage à la chaux sur le gonflement de la Bentonite de Maghnia [DGE01].

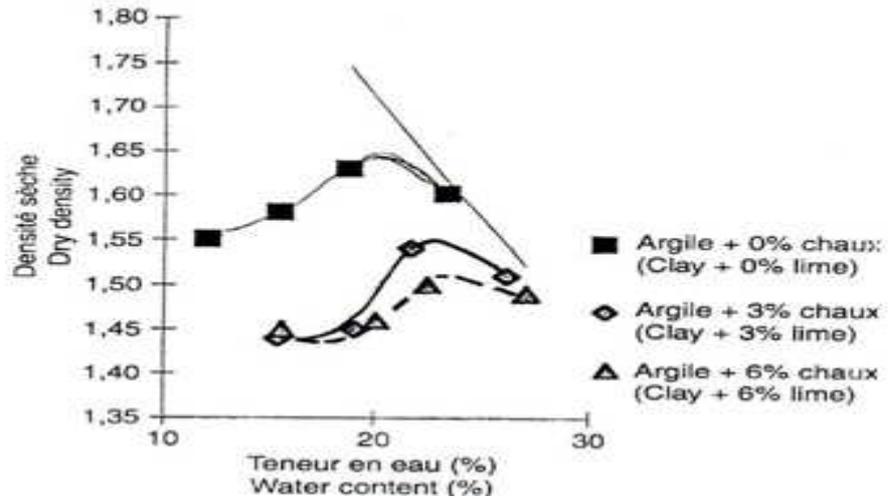
[AFE00] ont effectué des traitements de l'argile de Mila par 3% et 6% de chaux pour des temps de cure de 7, 28, et 90 jours, l'étude du gonflement de cette argile a été procédée selon deux modes de conservation du mélange chaux-argile : (1) en vrac à l'état foisonné sans perte de teneur en eau ; et (2) : compacté dans des bagues immédiatement après traitement et conservé à la teneur en eau de mélange. Les constatations tirées de cette étude sont les suivantes :

1. L'évolution des limites de consistance : la fig.1.33 (a) montre que l'argile de plasticité moyenne est évoluée vers un limon de faible plasticité, cette évolution est liée au pourcentage de chaux et à la durée du temps.
2. Une diminution de la valeur au bleu (surface spécifique) est proportionnelle au pourcentage de chaux et du temps de cure, fig.1.33 (b).



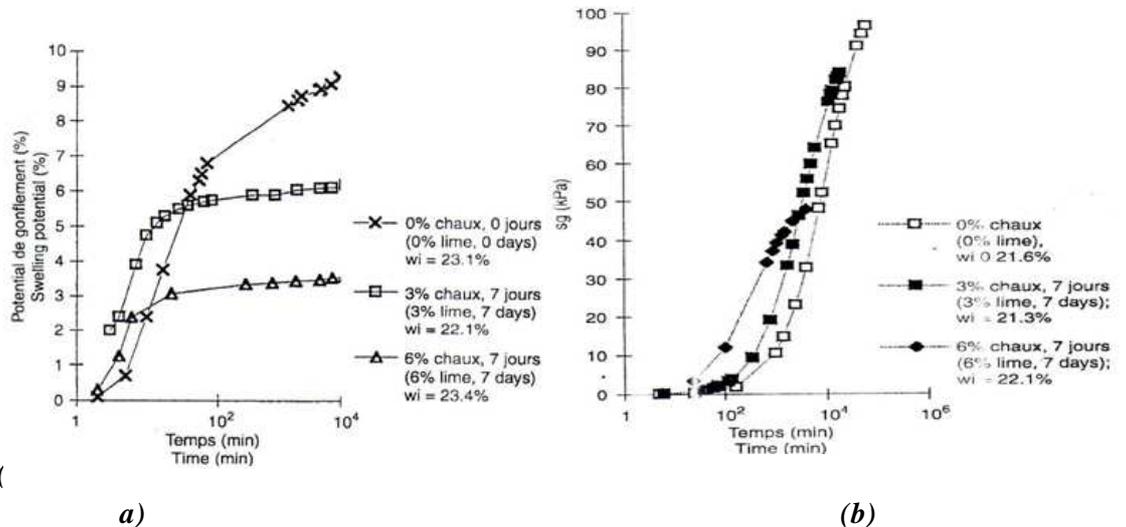
**Fig.1.33.** (a) Variation des limites de consistance en fonction du temps pour 3% et 6% chaux [AFE00] ; (b) Evolution de la valeur au bleu de méthylène en fonction de pourcentage de chaux [AFE00].

3. Une diminution de la densité sèche maximale et augmentation de la teneur en eau optimale. (Fig.1.34).



**Fig.1.34.** Courbe Proctor de l'argile traitée à la chaux et non traitée.

4. Le potentiel de gonflement final et la pression de gonflement finale diminuent en fonction du pourcentage de chaux et du temps de cure. (fig.1.35).



**Fig.1.35.** (a) Evolution du potentiel de gonflement des éprouvettes traitées à 3 et 6% de chaux conservées suivant le premier mode. (b) Evolution de pression de gonflement.

#### 1.7.2.2.b Stabilisation par ajout du ciment

Le traitement au ciment convient plus particulièrement aux sols peu plastiques, qui sont a priori inadaptés au traitement à la chaux du fait de leur faible teneur en argiles. Ce traitement augmente la cohésion, la résistance mécanique et améliore la stabilité à l'eau et au gel.

En tant que **liant fort**, le ciment rigidifie rapidement le sol de manière irréversible mais s'il y a rupture de l'horizon traité (action mécanique) il n'y a pas de nouvelle prise.

La prise au ciment est plus rapide que celle de la chaux (qui peut évoluer encore au bout d'un an), mais elle est stoppée par le gel. Les constituants hydratés du ciment relient les grains d'argile entre eux en formant des sortes de ponts nombreux et solides, ceci aboutit à l'augmentation de la portance, des résistances mécaniques et de la résistance au gel cité par Haras nationaux, (2004).

- ✓ L'hydratation du ciment est une réaction pouzzolamique très compliquée. Il n'est bien admis que l'addition d'un certain pourcentage de ciment (2% à 3%) à des argiles gonflantes conduit à des effets équivalents à ceux de la chaux. [KAO94].
- ✓ [ALR05] ont étudié un sol gonflant de nord d'Oman (Al-Khod) par la chaux et le ciment et la combinaison chaux avec ciment et la pouzzolane artificielle (Sarooj). Les différents pourcentages utilisés sont donnés par le tableau 1.5 suivant :

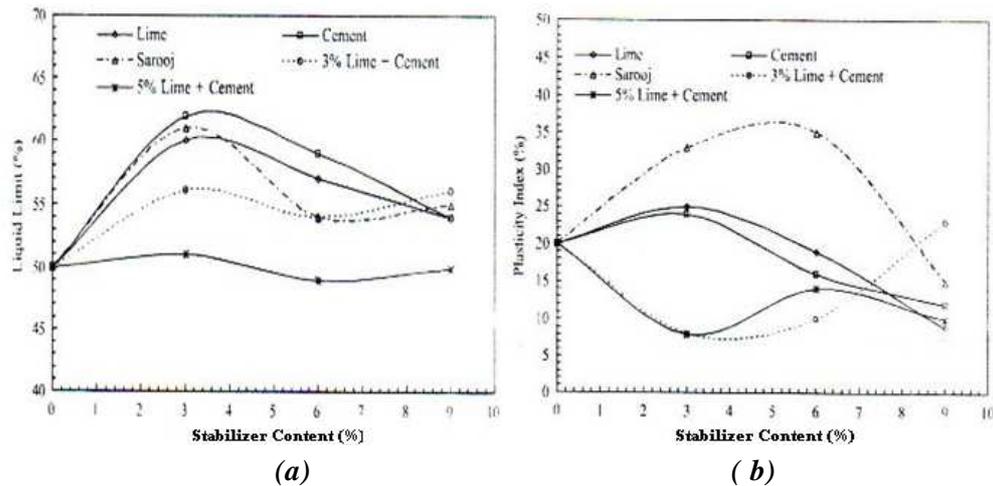
**Tableau.1.5.** Les pourcentages utilisés.

Chaux	Ciment	Pouzzolane	Chaux+Ciment
3%	3%	3%	3%Ch+3%Ci
6%	6%	6%	3%Ch+6%Ci
9%	9%	9%	3%Ch+9%Ci
/	/	12%	5%Ch+3%Ci
/	/	/	5%Ch+6%Ci
/	/	/	5%Ch+9%Ci

Les résultats obtenus sont les suivants:

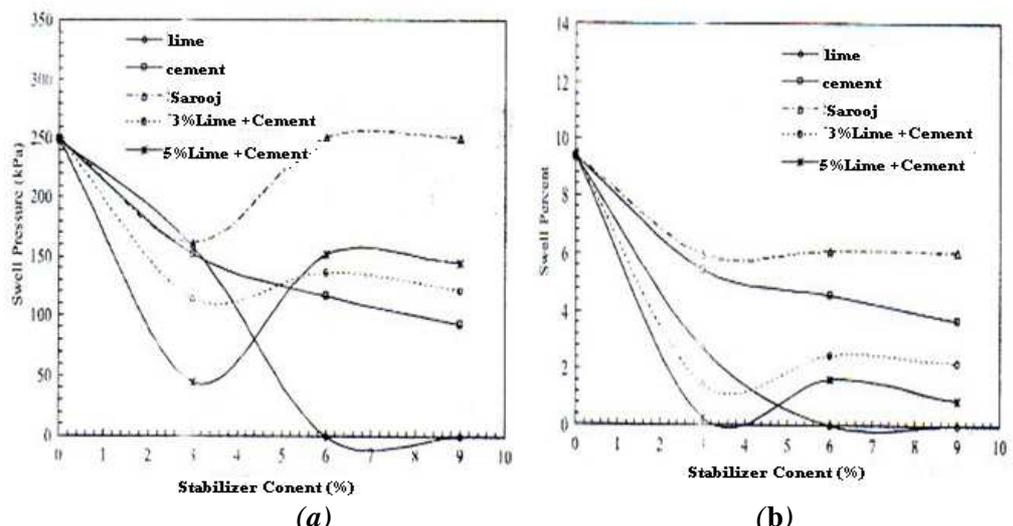
1. Une amélioration de la consistance de l'argile traitée par les différents stabilisants.
2. Une réduction totale de taux de gonflement et de la pression de gonflement à des teneurs de 6% et 9% de chaux (le taux de gonflement et la pression de gonflement de sol non traité sont respectivement (9,39% et 249Kpa).
3. Dans le cas de ciment, la réduction de taux de gonflement et la pression de gonflement dépend de pourcentage utilisé.
4. Une légère augmentation du taux de gonflement et de la pression de gonflement par rapport au sol non traité.
5. Les meilleures combinaisons qui ont donnés une bonne réduction du gonflement et de pression de gonflement sont 3%chaux+3%ciment et 5%chaux+3%ciment.

Les figures 1.36 et 1.37 montrent l'effet des stabilisants sur les limites de consistances et sur les paramètres du gonflement



(a) Effet des stabilisants sur la limite de liquidité  $W_L$  (%). (b) Effet des stabilisants sur l'indice de plasticité  $I_P$  (%).

Fig.1.36. Effet des stabilisants sur les limites des consistances.



(a) Effet des stabilisants sur la pression du gonflement. (b) Effet des stabilisants sur le potentiel du gonflement.

Fig.1.37. Effet des stabilisants sur les paramètres mécaniques de gonflement.

### 1.8 Caractérisations directes et indirectes de l'aptitude des sols argileux au retrait-gonflement

La quantification du phénomène de retrait-gonflement par des paramètres macroscopiques est essentielle pour le dimensionnement des ouvrages de génie civil.

Deux approches de la caractérisation du gonflement sont réalisées ; soit par des méthodes indirectes basées sur les paramètres géotechniques qui permettent d'identifier les sols sensibles à ce phénomène, soit par des méthodes directes s'appuyant sur des essais hydriques et mécaniques qui caractérisent plus précisément le comportement gonflant d'un sol.

---

### 1.8.1 Paramètres du gonflement

Les paramètres mécaniques à déterminer pour caractériser les sols sensibles au retrait-gonflement ne sont pas les mêmes selon que l'objectif choisi est d'empêcher le phénomène, ou de s'assurer qu'il se produira de façon progressive ou périodique, ou de construire l'ouvrage après achèvement du processus.

Dans la pratique trois paramètres mécaniques sont adoptés pour caractériser les propriétés des sols gonflants : *la pression de gonflement*, *le gonflement libre* et *le potentiel de gonflement* [SER96]. Cependant, bien que très largement utilisés, ces paramètres ne sont pas des caractéristiques intrinsèques du matériau gonflant. Ils dépendent de l'état initial du matériau et des conditions dans lesquelles se déroule le gonflement. Ainsi certains auteurs ([SRI86]; [ALO87], [HAB93], ont remarqué que la pression de gonflement dépend du chemin de contraintes. [SER96], ont donné les définitions suivantes :

1. La *pression de gonflement* d'un élément de sol, dont l'état physique initial est connu, peut être définie comme la pression sous laquelle l'imbibition du milieu ne provoque pas de déformations de gonflement ni d'effondrement. Autrement dit, elle correspond à l'état de contrainte à exercer pour maintenir le volume de sol constant pendant l'imbibition, sans distorsion.
2. Le *gonflement libre* d'un élément de sol, dont l'état physique initial est connu, est la déformation maximale que provoque l'imbibition d'un sol soumis à un état de contraintes nulles ou quasi-nulles.
3. Le *potentiel de gonflement* est défini par une relation entre contraintes et déformations de gonflement, cette déformation étant la valeur maximum obtenue au bout d'un temps infini sous contrainte totale constante. Le taux de gonflement est souvent exprimé par le rapport entre la variation de hauteur enregistrée lors de l'humidification et la hauteur initiale ( $\Delta h/h_0$ ).

Cependant, il n'existe pas de procédure universelle de détermination de ces paramètres et différentes procédures d'essais appliquées à un même matériau conduisent en particulier, à des pressions de gonflement différentes [SRI86].

---

### 1.8.2 Caractérisation au laboratoire

[ALR99] a regroupé les méthodes disponibles, pour estimer le potentiel de gonflement, en trois catégories : méthodes empiriques, méthodes de consolidation et méthodes de succion. Cependant, on peut aussi regrouper ces méthodes en méthodes directes et méthodes indirectes.

---

#### 1.8.2.1 Caractérisations indirectes

La caractérisation indirecte de l'aptitude au gonflement est le plus souvent réalisée à partir de relations empiriques qui prennent appui sur des paramètres

géotechniques et physicochimiques classiques tels que la teneur en eau naturelle, la densité sèche, les limites d'Atterberg, le pourcentage des argiles (sens granulométrique : taille des particules < 2 µm), le pourcentage et la nature des minéraux argileux, la valeur de bleu de méthylène, l'activité des sols fins, la surface spécifique, la capacité d'échange de cations, etc.

**Tableau.1.6.** Classification du potentiel de gonflement des sols argileux selon différents auteurs

Altmeyer (1955) <sup>1</sup>	Chen (1975) <sup>1</sup>	Ranganatham et Satyanarayana (1965) <sup>1</sup>	Chassagneux et al (1995)	Potentiel de gonflement	
$W_f (%) > 12$	$W_L (%) < 30$	$0 < I_r (%) < 20$	$I_p (%) < 12$	$V_B < 2,5$	Faible
$10 < W_f < 12$	30 - 40	$20 < I_r < 30$	$12 < I_p < 25$	$2,5 \leq V_B < 6$	Moyen
$W_f < 10$	40 - 60	$30 < I_r < 60$	$25 < I_p < 40$	$6 \leq V_B < 8$	Fort
	> 60	$I_r > 60$	$I_p \geq 40$	$V_B \geq 8$	Très fort

BRE(1980) <sup>1</sup>		Holtz & Gibbs (1956)		Holtz et al (1973) <sup>1</sup>		Potentiel de gonflement		
$I_p (%)$	% < 2 µm	(%) < 0.001 mm	$I_p (%)$	$W_r (%)$	$W_L (%)$	$I_p (%)$	$W_r (%)$	Potentiel de gonflement
< 18	< 30	< 17	< 20	> 13	20 à 35	< 18	> 15	faible
18 à 22	30 à 60	12 à 27	12 à 34	8 à 18	35 à 50	15 à 25	10 à 15	moyen
22 à 35	60 à 95	18 à 37	23 à 45	6 à 12	50 à 70	25 à 35	7 à 12	fort
> 35	> 95	> 27	> 32	< 10				très fort

d'après Gromyko, (1974, [GRO74])								
Limites d'Atterberg			Granulométrie		Gonflement			Potentiel de gonflement
$W_L (%)$	$I_p (%)$	$W_r (%)$	$I_r (%)^a$	% < 1 µm	% < 75 µm	Taux de gonflement (TD1) * (%)	Tau de gonflement (S)** (%)	Potentiel de gonflement
< 30	< 18	> 15	0 à 20	< 15	< 30	< 10	< 1,5	faible
30 à 40	15 à 28	10 à 16	20 à 30	13 à 23	30 à 60	10 à 20	1,5 à 5	Moyen
40 à 60	25 à 41	7 à 12	30 à 60	20 à 33	60 à 95	20 à 35	5 à 25	Fort
> 60	> 35	< 11	> 60	> 28	> 95	> 35	> 25	Très fort

$V_B$  : Valeur de bleu de méthylène ; <sup>1</sup> cité par [VIN06]

(TD1) \* : taux de gonflement d'un échantillon séché à l'air, serti latéralement, mis en présence d'eau sous une charge de 6,9 kPa.

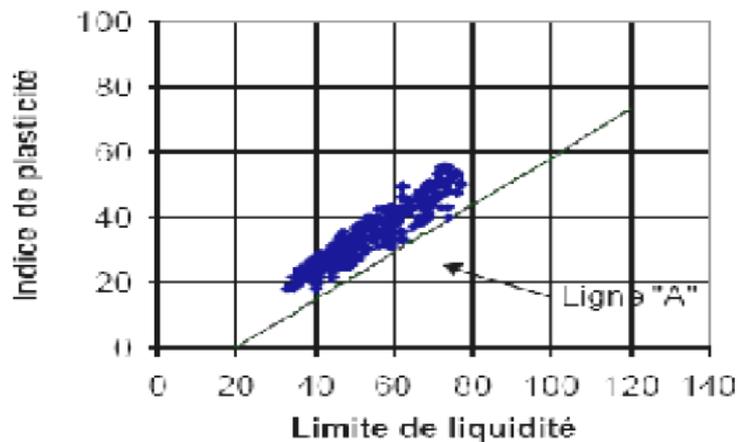
S\*\* : taux de gonflement d'un échantillon, serti latéralement, mis en présence d'eau sous une surcharge de 6.9 kPa (1 psi). Compacté préalablement à la teneur en eau optimale et à la densité maximale selon AASHTO. S est estimé en fonction de l'indice de plasticité  $I_p$  des sols contenant entre 8 % et 65 % d'argile, par la relation  $S = 21,6 \cdot 10^6 \cdot (I_p)^{2.44}$ .

<sup>a</sup> : pour les sols naturels compactés à l'optimum et sous une charge de 6,9 kPa, le taux de gonflement est déterminé à partir d'une relation donnée par  $S = 41,13 \cdot 10^{-5} (I_r)^{2.67}$  (Ranganatham et Satyanarayana, 1965, ( d'après [PAR80]).

Ainsi, après avoir déterminé les paramètres géotechniques d'un matériau, l'emploi de formules empiriques permet d'estimer rapidement le potentiel de gonflement du terrain, c'est-à-dire de qualifier ce potentiel de faible, de moyen ou d'élevé.

Les limites d'Atterberg, la limite de retrait, la teneur en eau, la densité sèche sont des facteurs très pertinents pour estimer la sensibilité au gonflement des argiles.

Une identification primaire, à partir des résultats de ces essais géotechniques, peut présenter un intérêt considérable. La littérature contient un nombre important d'approches empiriques qui permettent d'appréhender le potentiel de gonflement des sols. La plupart d'entre eux s'appuient sur les limites d'Atterberg  $w_L$ ,  $w_P$  et  $w_s$  déterminées en laboratoire, où  $w_L$  est la limite de liquidité,  $w_P$  est la limite de plasticité,  $w_s$  est la limite de retrait. Le Tableau 1.6 récapitule un grand nombre de ces approches. Cependant [SEE62] ont souligné que ces analyses sont le plus souvent fondées sur un nombre de données expérimentales assez faible et fournissent des corrélations approximatives entre les caractéristiques géotechniques citées et le gonflement.



**Fig.1.38.**Caractérisation des sols gonflants (d'après [VIJ73] dans Parcevaux, 1980, [PAR80])

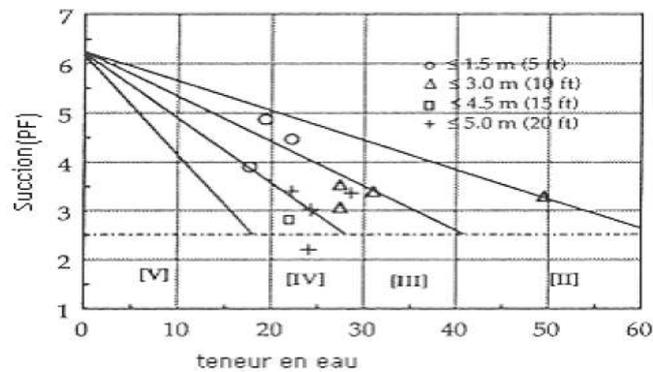
[VIJ73] ont constaté que la ligne « A » définie par Casagrande (1948) dans le diagramme de plasticité, d'équation :  $I_p = 0,73 (W_L - 20)$  sépare les sols gonflants (au-dessus de la ligne « A ») des sols non gonflants (en dessous de la ligne « A ») comme indiqué sur la Fig.1.39 Cependant une argile se situant au dessus de la ligne « A » n'est pas nécessairement gonflante, puisque des sols mous peuvent parfois y être classés.

Par ailleurs, [MCK92] a proposé une classification des sols gonflants (Tableau 1.7, et Figure 1.39) en se basant sur la pente de la courbe de rétention d'eau ( $\Delta S/\Delta w$ ) et l'index de compression de succion  $C_h$  qui peut être estimé par une simple relation :

$$C_h = - 0,027 (\Delta S/\Delta w) - 0,39 \dots \dots \dots [1.10]$$

**Tableau 1.7** : Paramètres hydriques et potentiel de gonflement (d'après [MCK92])

Catégorie	$\Delta S/\Delta w$	$C_h$	Potentiel de gonflement
I	$>6$	-0,227	Très fort
II	$-10 < \Delta S/\Delta w < -6$	$-0,227 < C_h < -0,120$	Fort
III	$-13 < \Delta S/\Delta w < -10$	$-0,120 < C_h < -0,040$	Moyen
IV	$-20 < \Delta S/\Delta w < -13$	$> -0,040$	Faible
V	$< -20$	Non gonflant	Non gonflant



**Fig.1.39.** Classification des sols gonflants (d'après [MCK92]).

[KOM69] ont travaillé plus particulièrement sur des sols non remaniés provenant d'Israël, car la méthode de compactage est un facteur très influent sur les paramètres de gonflement. Les nombreux essais ont montré qu'une corrélation linéaire simple était possible entre le gonflement libre et l'indice de plasticité (avec une erreur  $\pm 25\%$ ).

$$\begin{aligned} \varepsilon_g &= 6,7 + 2,4 I_p && \text{pour les marnes} \\ \varepsilon_g &= 0,9 + 2,1 I_p && \text{pour l'argile} \end{aligned}$$

En conclusion, ces méthodes restent le plus souvent approximatives et différencient seulement les sols à fort potentiel de gonflement des sols à faible potentiel de gonflement. Il faut aussi remarquer que ces différentes méthodes ne permettent pas d'obtenir de résultats toujours compatibles entre eux comme il a été démontré par différents auteurs comme ([SNE84], d'après [BUL01]). Ainsi, il est difficile de classer les sols gonflants uniquement à partir de la valeur d'un indice tirée d'une mesure indirecte de reconnaissance.

De plus, il faut souligner que les relations sont en général déterminées à partir d'échantillons remaniés dont le comportement n'est pas identique à celui d'échantillons naturels. Par conséquent, ces méthodes indirectes de caractérisation du gonflement sont certes très utiles en tant qu'indicatrices du potentiel de gonflement lors d'études statistiques sur des sols très différents, mais en aucun cas elles ne peuvent remplacer les mesures expérimentales

directes du gonflement lorsqu'on s'intéresse à un sol particulier comme l'a remarqué [PAR80].

### 1.8.2.2 Modèles d'estimation du gonflement - Méthodes indirectes

Les méthodes indirectes consistent à établir une corrélation entre le taux de gonflement ou la pression de gonflement et quelques paramètres géotechniques faciles à obtenir au laboratoire.

Ainsi, après avoir déterminé les paramètres géotechniques du sol, l'emploi de formules empiriques permet d'estimer rapidement le potentiel de gonflement du sol, c'est-à-dire d'estimer ou de quantifier le gonflement et (ou) la pression de gonflement qui peuvent se développer en cas de variations des conditions hydriques et (ou) mécaniques.

De nombreux auteurs ont tenté de relier la pression de gonflement  $\sigma_g$ , ou le potentiel de gonflement  $\varepsilon_g$ , aux paramètres classiques de mécanique des sols (teneur en eau initiale  $w_i$ , densité sèche initiale  $\gamma_{d0}$ , limite de liquidité  $w_L$ , indice de plasticité  $I_p$ , limite de retrait  $w_s$ , pourcentage des particules d'argiles  $< 2 \mu m$ , ) qui semblent être les facteurs les plus influents sur le gonflement des argiles. Plusieurs relations empiriques ont été proposées.

Quelques exemples sont donnés dans le Tableau 1.8

**Tableau.1.8.** Modèles d'estimation du taux de gonflement ( $\varepsilon_g$ ) et de la pression de gonflement ( $\sigma_g$ ).

Modèles empiriques	Expression mathématique
<b>Taux de gonflement (<math>\varepsilon_g</math>)</b>	
Nayak et Christensen* (1971)	$\varepsilon_g = 0,0229(I_p)^{1,45} \frac{C_2}{w_0} + 6,38$
Vijayvergiya et Ghazzaly (1973) [VIJ73]	$\lg(\varepsilon_g) = \frac{1}{19,5} (6,242 \gamma_d + 0,65 w_i - 130,5)$ $\lg(\varepsilon_g) = \frac{1}{12} (0,4 w_i - w_0 + 5,5)$
Brackley (1975) [BRA75]	$\varepsilon_g = (5,3 - \frac{147e_0}{I_p} - \lg(p)) (0,525I_p + 4,1 - 0,85w_0)$
Johnson et Snethen (1978) [JOH78]	$\log(\varepsilon_g) = 0,485 + 0,036 w_i - 0,0833w_0$
Weston (1980) [WES80]	$\varepsilon_g = 4,11.10^{-4} (w_{11})^{4,17} (p)^{-0,386} (w_0)^{2,33}$ ; ou $w_{11} = w_i (\frac{\% < 40 \mu m}{100})$
Yilmaz (2006) [YIL06]	$\varepsilon_g = 0,155w_i - 0,00763CEC - 2,04$
<b>Pression de gonflement (<math>\sigma_g</math>)</b>	
Nayak et Christensen*(1971)	$\sigma_g = 0,035817(I_p)^{1,12} (\frac{C_2}{w_0})^2 + 3,7912$ ; méthode à volume constant
Vijayvergiya et Ghazzaly (1973) [VIJ73]	$\lg(\sigma_g) = \frac{1}{19,5} (6,242 \gamma_d + 0,65 w_i - 139,5)$ $\lg(\sigma_g) = \frac{1}{12} (0,44 w_i - w_0 - 0,4)$ $\sigma_{g(t/m^2)}$ , méthode à volume constant
Brackley (1975) [BRA75]	$\lg(\sigma_g) = (5,3 - \frac{147e_0}{I_p})$ ; $\sigma_g$ en kPa

\*cités par [ZEI87]

$I_p$  : indice de plasticité,  $C_2$  : %  $< 2\mu m$ ,  $w_0$  : teneur en eau,  $\gamma_d$  : poids volumique sec ( $kN.m^{-3}$ ),

$\sigma_g$  : contrainte normale (kPa),  $e_0$  : indice de vide, CEC : capacité d'échange cationique (meq/100g).

---

### 1.8.2.3 Essais de caractérisation directe du gonflement au laboratoire

Il existe une multitude de procédures d'essais de gonflement (synthèse de [SER96]); Cependant, trois techniques sont le plus souvent citées dans la littérature : l'essai de gonflement libre, l'essai de gonflement à différentes charges constantes et l'essai de gonflement à volume constant.

---

#### 1.8.2.3. a Méthode à gonflement libre (ou méthode d'hydratation sous chargement nul)

Après montage d'une éprouvette dans une cellule œdométrique, celle-ci est soumise au processus d'imbibition sous une charge correspondant au poids du piston. Les déformations verticales sont mesurées, la déformation maximale rapportée à la hauteur initiale correspond au potentiel de gonflement. Une fois le phénomène de gonflement stabilisé, le chargement s'effectue de manière progressive par paliers, selon un taux de chargement choisi. La pression de gonflement correspond à la charge qu'il est nécessaire d'appliquer pour ramener l'éprouvette à sa hauteur initiale (Fig.1.40, méthode 1).

---

#### 1.8.2.3.b Méthode sous charge constante (Essais en parallèle ou méthodes d'hydratation sous charge constante)

Cette méthode consiste à placer plusieurs éprouvettes, au moins quatre selon la norme AFNOR XP 94-091 (1995), d'un même matériau dans des cellules œdométrique. Chaque éprouvette à l'état naturel, fait l'objet d'un chargement jusqu'à une contrainte axiale choisie en fonction d'un taux d'accroissement des charges préalablement défini. La pression verticale à appliquer doit être différente pour chacun des échantillons (Fig.1.40, méthode 2). Le gonflement ou le tassement de chaque éprouvette est obtenu en procédant à son imbibition sous contrainte, jusqu'à stabilisation des déformations. La courbe  $\Delta h/h_i$ , fonction de la pression appliquée, est tracée. Une interpolation linéaire est réalisée entre les différents points pour estimer la pression pour laquelle le gonflement est nul. Elle correspond à la pression de gonflement. Les normes AFNOR et ASTM (méthode B) diffèrent cependant, sur le mode d'application de la charge verticale. Dans la norme AFNOR une stabilisation des déformations est nécessaire avant de débiter l'imbibition, alors que dans la procédure ASTM (méthode B), la charge appliquée est suivie de l'imbibition 5 mn après.

---

#### 1.8.2.3.c Méthode à volume constant (ou méthodes d'hydratation à gonflement empêché)

Le principe de cette méthode est de procéder à l'imbibition d'une éprouvette, tout en maintenant son volume constant (Fig.1.40, méthode 3). Au cours de cet essai, contrairement à la procédure du gonflement libre, la structure du sol est supposée ne pas trop évoluer. Cet essai ne fait pas

l'objet d'une norme AFNOR. Selon la norme ASTM (méthode C), l'échantillon est soumis, avant l'humidification, à une pression verticale voisine des conditions in situ ou d'une pression de gonflement estimée. Les déformations verticales sont empêchées en augmentant progressivement la charge appliquée. La pression nécessaire pour maintenir le volume constant est la pression de gonflement.

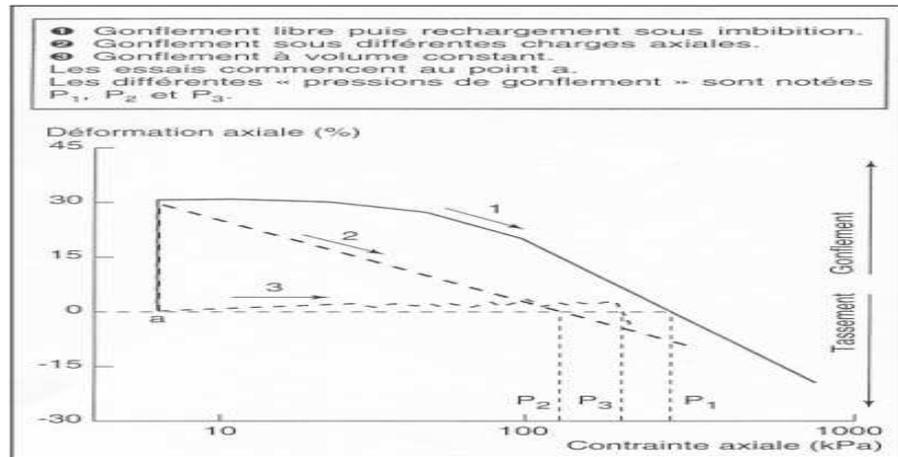


Fig.1.40. Différentes méthodes d'essais de gonflement (d'après [SRI86]).

## 1.9 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence la complexité du phénomène de gonflement, qui fait intervenir plusieurs mécanismes physiques, chimiques et mécaniques, d'interaction du matériau et de l'eau, à différentes échelles. La cohésion interfeuillet est un facteur prépondérant du processus de retrait-gonflement. Il est également avéré que la structure du matériau (arrangement des particules, fissuration, etc.) conditionne le processus de gonflement, d'une part, et que le processus de gonflement est lui-même accompagné, dans certains cas, de modifications structurales (réarrangement des particules, compensation de vides, etc.), d'autre part.

A l'échelle microscopique, le gonflement est d'autant plus fort que la surface spécifique de l'argile est grande, que la concentration en sel dans l'eau interstitielle est faible et que la valence des cations échangeables est faible. L'application du modèle de la double couche semble être satisfaisante quand la source du gonflement est la pression de répulsion osmotique, c'est-à-dire lorsqu'il s'agit de sols sursaturés en cations monovalents, en présence d'un soluté à faible concentration ionique. Dans le cas d'un sol argileux, où la texture et la structure ne sont pas homogènes, l'applicabilité de ce modèle est discutable.

En plus des facteurs intrinsèques, le processus de retrait-gonflement est influencée par les paramètres d'état que sont la teneur en eau, la densité, l'indice des vides et la succion. Ces différents facteurs montrent qu'il est difficile de corrélérer un comportement macroscopique à des observations

microscopiques. On a constaté que pour une teneur en eau donnée, le potentiel de gonflement augmente d'autant plus que la densité sèche est élevée, et que pour une densité sèche donnée, le potentiel de gonflement augmente lorsque la teneur en eau diminue. L'influence de la densité sèche et l'influence de la teneur en eau, sur le potentiel de gonflement, sont donc couplées.

Le taux et la pression de gonflement des sols augmentent lorsque la densité sèche initiale augmente et lorsque la teneur en eau initiale diminue.

L'analyse bibliographique a permis de constater que seules les analyses minéralogiques et chimiques ne permettaient pas d'interpréter toutes les manifestations macroscopiques du gonflement, l'arrangement des particules, c'est-à-dire la texture/structure a aussi une influence importante sur le gonflement.

Le processus de gonflement s'accompagne également de modifications structurales : une augmentation de la porosité en aille et en volume au cours de l'hydratation du matériau naturel par ouverture progressive de la porosité inter et intra-agrégat primaire est observée.

Les méthodes indirectes de caractérisation, basées sur l'identification géotechnique des matériaux, sont très utiles en tant qu'indicateurs du potentiel de gonflement des sols, mais ne peuvent pas remplacer les essais, en laboratoire, de détermination des paramètres de gonflement, que sont la pression de gonflement ou le taux de gonflement. Ces méthodes indirectes sont, en général, déterminées à partir d'échantillons remaniés dont le comportement n'est pas identique à celui du matériau à l'état naturel.