

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

جامعة يحي فارس – المدية –

Université Yahia Farès – Médéa –

Faculté de la Technologie

Département de Génie Civil



**THESE**

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT LMD**

**En : Génie Civil**

**Spécialité : Ingénierie de Constructions et Risques Géotechniques**

**Par : GADOURI Hamid**

**Thème**

**Influence de la présence des sulfates sur le traitement des  
sols argileux par des ajouts minéraux**

Soutenue publiquement le : 24 / 05 / 2017

Devant le jury composé de:

|                         |                           |                           |                       |
|-------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------|
| DEBIEB Farid            | Professeur                | Université de Médéa       | Président             |
| BAHAR Ramdhan           | Professeur                | Université de Bab Ezzouar | Examineur             |
| KHEMISSA Mohamed        | Professeur                | Université de M'Sila      | Examineur             |
| ZITOUNI Zein El-Abidine | Maitre de Conférences (A) | Université de Blida       | Examineur             |
| HARICHANE Khelifa       | Maitre de Conférences (A) | Université de Chlef       | Directeur de thèse    |
| GHRICI Mohamed          | Professeur                | Université de Chlef       | Co-Directeur de thèse |

# Chapitre 2

---

---

## **Synthèse Bibliographique des Travaux Effectués sur L'Amélioration Chimique des Sols**

- 2.1. *Introduction***
- 2.2. *Effet des ajouts cimentaires sur la plasticité***
- 2.3. *Effet des ajouts cimentaires sur les caractéristiques du compactage***
- 2.4. *Effet des ajouts cimentaires sur la résistance à la compression non confinée***
- 2.5. *Effet des ajouts cimentaires sur la résistance au cisaillement***
- 2.6. *Effet des ajouts cimentaires sur la compressibilité***
- 2.7. *Effet des ajouts cimentaires sur le gonflement***
- 2.8. *Conclusion***

## 2.1 Introduction

La technique d'amélioration fait appel à l'utilisation de différents ajouts minéraux ou cimentaires, ces ajouts peuvent être d'origine naturelle (pouzzolane naturelle), artificielle (chaux, ciment...etc.) ou déchets minéraux (fumée de silice, cendres volantes...etc.). Ils possèdent des caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques différentes. L'addition de ces produits aux sols médiocres améliore considérablement leurs propriétés géotechniques, mais malgré ça, le problème reste encore posé, car, après traitement, le sol stabilisé peut être altéré par certains éléments chimiques nommés «éléments perturbateurs» à savoir les sulfates, les chlorures, les fertilisants, la matière organique ... etc. La microstructure et la nature minéralogique du sol traité peuvent aussi influencer négativement sur le processus d'amélioration.

Dans ce présent chapitre, nous allons présenter en détail, les travaux de recherches réalisés sur la stabilisation chimiques des sols par différents types d'ajouts. L'objectif principal est d'établir une synthèse bibliographique sur l'effet des liants hydrauliques (le ciment et la chaux) et les matériaux pouzzolaniques (les cendres volantes, le laitier, la fumé de silice, la pouzzolane naturelle...etc.) sur le traitement des sols avec ou sans présence des éléments perturbateurs (les sulfates, les nitrates, les chlorures, les phosphates, la matière organique...etc.) responsables de l'échec ou la réussite d'un traitement.

## 2.2 Effet des ajouts cimentaires sur la plasticité

### 2.2.1 Effet de la chaux

En absence des sulfates, l'addition de la chaux provoque une amélioration de la consistance liée à une réduction significative de l'indice de plasticité qui se traduit par une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnent ou non d'une augmentation de la limite de liquidité. Ainsi, la surface spécifique est réduite immédiatement après l'incorporation de la chaux à l'issue de la floculation des argiles (Ola, 1977; Kamon, 1992; Attoh-Okine, 1995; Indraratna, 1996, Osula, 1996; Narasimha Rao and Rajasekaran, 1996; Guney et al., 2007; Kavak and Kyarah, 2007; Yong and Ouhadi, 2007; Manasseh and Olufemi, 2008, Al-Mukhtar et al., 2012; Celik and Nalbantoglu, 2013; Khemissa and Mahamedi, 2014).

Kinuthia et al. (1999) ont montré que la limite de liquidité d'une kaolinite augmente de 60 à 73% pour l'addition de 3% de chaux et elle reste constante jusqu'à 14%, mais elle diminue graduellement au-delà de cette teneur en chaux (Fig. 2.1). Cependant, la limite de plasticité continue à augmenter quelque soit la teneur en chaux. Cependant, l'indice de plasticité du sol

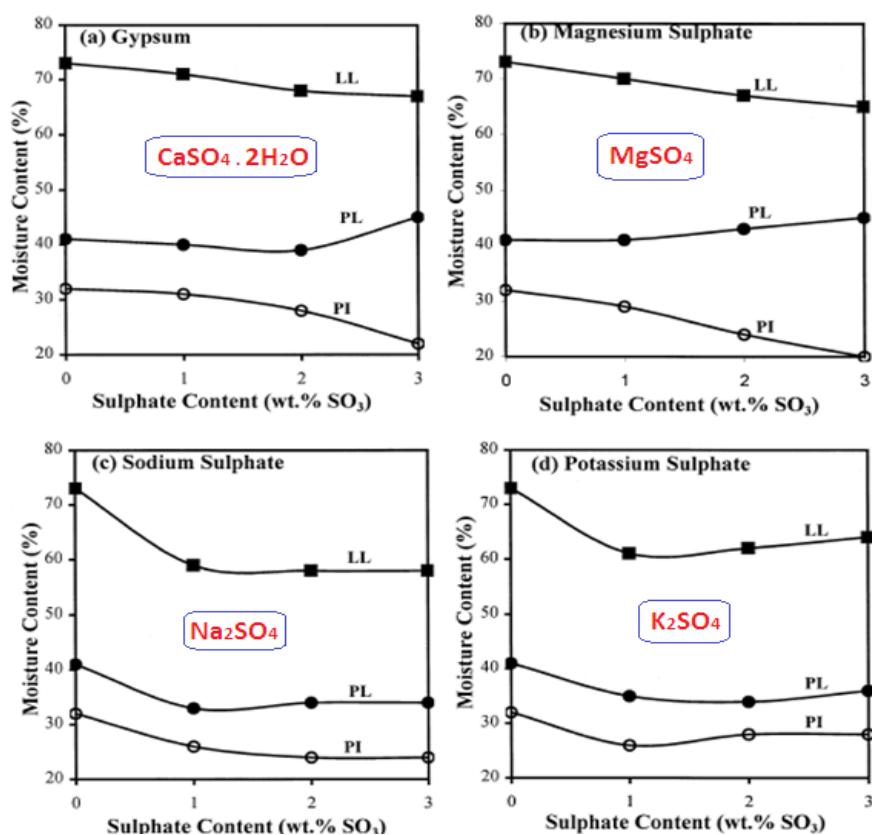
reste toujours en diminution malgré l'augmentation de la teneur en chaux. La réduction de l'indice de plasticité est accompagnée plus souvent par l'augmentation de la limite de plasticité plutôt que la diminution de la limite de liquidité (George et al., 1992; Al-Mukhtar et al., 2010). D'ailleurs, Sakr et al. (2009) ont indiqué que la stabilisation d'un sol argileux très organique par différents pourcentages de chaux provoque une augmentation de la limite de liquidité avec l'âge de cure (7, 15, 30 et 60 jours) qui est probablement lié au remplacement des ions de  $\text{Na}^+$  qui se présentent dans le sol par des ions de  $\text{Ca}^{2+}$  apportés par l'addition de la chaux. Un comportement inverse a été observé par Indraratna (1996) et Jha and Sivapullaiah (2015) où la limite de liquidité des sols stabilisés diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux additionnée.

D'après Locat et al. (1990), l'augmentation de la limite de plasticité s'accompagne ou non d'une augmentation de la limite de liquidité. Cette évolution provoque un déplacement du domaine de plasticité vers des teneurs en eau plus importantes. Le taux du décalage de l'indice de plasticité est lié à la quantité de chaux utilisée. L'évolution de la consistance favorise la granulation du sol lors du malaxage. Différents facteurs influencent la granulation (floculation) du sol à savoir la nature du sol, la teneur en eau et le dosage en chaux. Ce phénomène est expliqué par l'augmentation des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  dans le sol. En effet, suite à des échanges cationiques qui se produisent alors entre les ions absorbés à la surface des particules argileuses et les cations apportés, la capacité d'échange cationique (CEC) est donc modifiée. La modification de la CEC et l'augmentation de la concentration en électrolytes ont pour effet de réduire la taille de la double couche des particules argileuses et ainsi de réduire les forces de répulsion entre elles. Celles-ci ont alors tendance à s'agréger, c'est le processus de floculation.

Afès et al. (2000) ont reporté que la limite de plasticité d'une argile stabilisée par 6% de chaux augmente de 24% jusqu'à 32.4 et 34% après une cure de 7 et 30 jours, respectivement. Le même comportement a été observé par plusieurs chercheurs (Attoh-Okine, 1995; Bell, 1996; Okagbue and Yakubu, 2000; Yong and Ouhadi, 2007). Cela peut être expliqué par l'utilisation de la chaux qui conduit à la floculation des particules d'argiles en causant une augmentation immédiate de la limite de plasticité du sol stabilisé. De plus, l'augmentation de la limite de plasticité provoque une réduction des propriétés plastiques du sol stabilisé. Cela peut être lié à l'altération du film d'eau entourant les minéraux argileux dans le sol (Osula, 1991).

En présence des sulfates, Kinuthia et al. (1999) ont étudié l'influence des sulfates monovalents ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et  $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) et divalents ( $\text{CaSO}_4$  et  $\text{MgSO}_4$ ) sur les paramètres de consistance d'une kaolinite traitée à 6% de chaux (Fig. 2.1). Ils ont constaté que toutes les

limites d'Atterberg varient en fonction du type et de la concentration en sulfate utilisé. De plus, les sulfates divalents présentent une variation cadencée tandis que les sulfates monovalents montrent une variation perturbée. En effet, pour des fortes concentrations, les sulfates divalents diminuent fortement la plasticité du sol stabilisé plus que les sulfates monovalents. Cependant, la réduction de la plasticité du sol stabilisé dépend de la concentration du sulfate utilisé et du type de cations qui s'attachent à l'anion sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ). Un comportement similaire a été observé par Celik and Nalbantoglu (2013) où ils ont constaté que l'indice de plasticité d'un sol argileux traité avec 5% de chaux diminue de 32% à 15% en présence de 2000 ppm de sulfate de sodium alors qu'il augmente jusqu'à 34 et 38% en présence de 5000 et 10000 ppm de sulfate de sodium, respectivement.



**Fig. 2.1** — Effet des sulfates monovalents et divalents sur les limites d'Atterberg d'une kaolinite traitée à 6% chaux, (Kinuthia et al., 1999).

Sivapullaiah et al. (2000) ont étudié l'effet apporté par les différentes concentrations (0.5, 1 et 3%) d'un sulfate monovalent ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et divalent ( $\text{CaSO}_4$ ) sur la limite de liquidité d'un sol montmorillonitique traitée à 6% de chaux éteinte. Les résultats obtenus ont montré que la limite de liquidité augmente avec l'augmentation de la concentration en sulfate à savoir que le sulfate de sodium a une influence considérable par rapport au sulfate de calcium (Tableau 2.1). Il s'avère que le taux d'augmentation de la limite de liquidité dépend de la concentration en sulfate utilisé et du type de cation associé à l'anion sulfate. Par contre, Kinuthia et al.

(1999) ont constaté que la limite de liquidité d'une kaolinite traitée avec 6% de chaux en présence des mêmes concentrations en sulfate monovalent ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) décroît initialement pour une faible concentration (1%. $\text{SO}_3$ ) puis elle augmente avec son augmentation (2 et 3%. $\text{SO}_3$ ). Contrairement au sulfate divalent ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), la limite de liquidité diminue avec leur augmentation. Cela mis en évidence l'effet de la nature des minéraux argileux qui se présentent dans les sols du fait que les sols montmorillonitiques possèdent généralement une capacité d'échange cationique (CEC) bien plus élevée que celle des sols kaoliniques.

**Tableau 2.1** — Effet du sulfate de sodium et de calcium sur la limite de liquidité d'une montmorillonite traitée à 6% chaux, (Sivapullaiah et al., 2000).

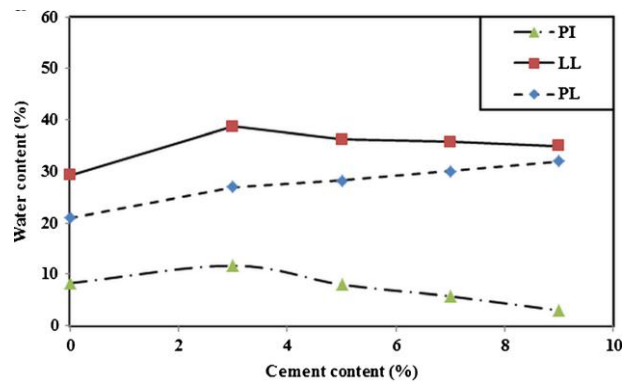
| Nature du sol et nom du sulfate utilisé                         | Concentration (%) | Limite de liquidité (%) |
|---|-------------------|-------------------------|
| <b>Sol naturel (Montmorillonite)</b>                            | 0.0               | 68.0                    |
| <b>Sulfate monovalent (<math>\text{Na}_2\text{SO}_4</math>)</b> | 0.5               | 78.6                    |
|   | 1.0               | 78.9                    |
|   | 3.0               | 82.7                    |
| <b>Sulfate divalent (<math>\text{CaSO}_4</math>)</b>            | 0.5               | 70.0                    |
|   | 1.0               | 73.0                    |
|   | 3.0               | 76.0                    |

Yilmaz and Civelekoglu (2009) ont étudié l'effet de différents pourcentages de gypse (0, 2.5, 5, 7.5 et 10%) sur les limites d'Atterberg d'une bentonite montmorillonitique très plastique. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'effet positif apporté par le calcium provenant de l'addition du gypse sur la plasticité de la bentonite où ils ont observé une diminution de son indice de plasticité de 186.9% à 139.5 et 120.8% pour l'addition de 2.5 et 10% de gypse, respectivement.

### 2.2.2 Effet du ciment

Le ciment est généralement utilisé seul ou en combinaison avec d'autres additifs comme la chaux pour les sols possédant une faible plasticité à savoir les sables, les limons, ...etc. En effet, Asgari et al. (2015) ont utilisé différentes proportions de ciment (0-9%) dans le traitement d'un sol peu plastique (IP=9%). Les résultats obtenus ont montré que la limite de liquidité et l'indice de plasticité augmentent jusqu'à un optimum qui correspond à 3% de ciment puis ils diminuent avec l'augmentation de la teneur en ciment. Cependant, la limite de plasticité augmente avec l'augmentation de la quantité du ciment utilisé (Fig. 2.2).

Plusieurs auteurs s'accordent que l'addition du ciment provoque une réduction dans l'indice de plasticité. L'incorporation du ciment réduit la plasticité des sols. Ces résultats ont été confirmés par plusieurs chercheurs (Basha et al., 2003; Degirmenci et al., 2007).

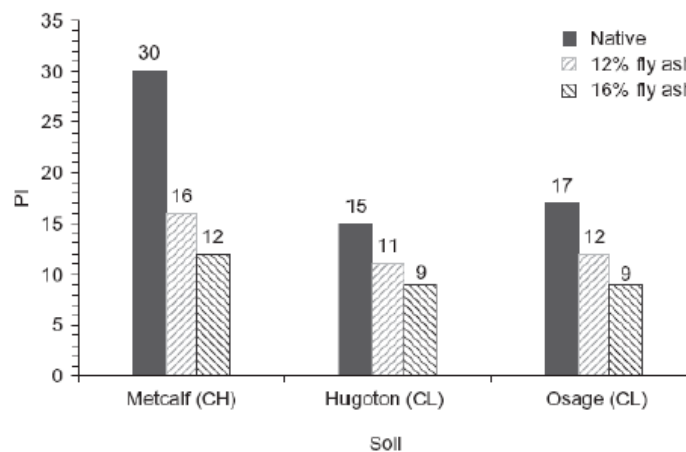


**Fig. 2.2** — Effet du ciment sur les limites d'Atterberg d'un sol peu plastique, (Asgari et al., 2015).

En effet, la modification de la structure des particules argileuses par l'addition du ciment et également la dissolution de la silice et de l'alumine présents dans le sol est causée par un fort pH qui est à l'origine de l'hydratation du ciment. Les matières dissoutes vont être absorbées à la surface des particules d'argile ce qui conduit à réduire les forces de répulsion et par conséquent la floculation des particules (Okagbue and Ocholor, 2007). De plus, Osula (1996) a conclu que cette réaction mène à la formation de particules grossières, par conséquent, la réduction des particules fines mène à une réduction dans la surface spécifique et par conséquent la réduction de la plasticité.

### 2.2.3 Effet des cendres volantes

Parsons and Kneebone (2005) ont étudié l'amélioration produite par l'utilisation de 12 et 16% de cendres volantes de classe C et leur degré d'influence sur l'indice de plasticité des trois types de sols (Fig. 2.3). Il est clair que l'addition des cendres volantes fait provoquer une diminution de l'indice de plasticité de tous les sols traités avec des degrés variables. Le degré de réduction dépend non seulement de la nature du sol mais aussi de la teneur en cendres volantes utilisées.



**Fig. 2.3** — Effet des cendres volantes sur l'indice de plasticité d'un sol moyennement plastique, (Parsons and Kneebone, 2005).

D'ailleurs, Koliass et al. (2005) ont démontré que l'utilisation de 5, 10 et 20% de cendres volantes fait déplacer le sol traité du domaine plastique vers le domaine non plastique après 1 jour de cure.

#### 2.2.4 Effet de la pouzzolane artificielle (Sarooj)

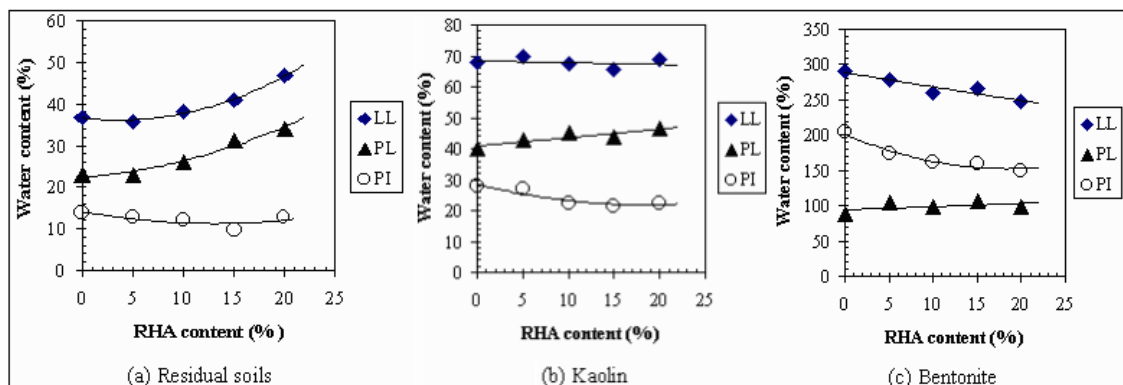
La pouzzolane artificielle ou «le Sarooj» est un ajout cimentaire obtenu par la calcination d'argile mélangée avec de la chaux et de l'eau. Il est peut être utilisé comme un agent de cimentation dans la stabilisation chimique des sols. Le Tableau 2.2 illustre l'effet du Sarooj sur les limites d'Atterberg du sol traité (Al-Rawas et al., 2005). Les résultats obtenus ont montré que la limite de liquidité a augmenté de 50 à 61% en présence de 3% du sarooj puis elle s'est stabilisée à 54% environ malgré l'augmentation du dosage en Sarooj. D'autre part, la limite de plasticité a diminué préalablement puis elle augmente lorsque la teneur en Sarooj est supérieure à 6%.

**Tableau 2.2** — Effet de la pouzzolane artificielle sur les limites d'Atterberg, (Al-Rawas et al., 2005).

| Sarooj (%) | 0  | 3  | 6  | 9  | 10 |
|------------|----|----|----|----|----|
| WL (%)     | 50 | 61 | 54 | 55 | 53 |
| WP (%)     | 30 | 28 | 19 | 40 | 39 |
| IP (%)     | 20 | 33 | 35 | 15 | 14 |

#### 2.2.5 Effet de la cendre de l'écorce de riz (RHA)

Basha et al. (2003) ont constaté que l'utilisation de 20% de la cendre de l'écorce de riz (RHA) comme additif fait diminuer l'indice de plasticité de la Kaolinite et de la bentonite de l'ordre de 30% et de 25%, respectivement (Fig. 2.4b et c). Tandis que pour la même teneur en RHA, l'indice de plasticité du sol résiduel reste constant (13%) et comparable au sol non traité (Fig. 2.4a). Cela implique que le RHA n'est peut être utilisé que pour les sols présentant un indice de plasticité élevé.



**Fig. 2.4** — Effet de l'utilisation de la cendre de l'écorce de riz (RHA) comme additif sur les limites d'Atterberg de trois types de sols, (Basha et al., 2003).



### 2.2.6 Effet de la combinaison chaux/ciment

Al-Rawas et al. (2005) ont étudié l'effet de la combinaison de la chaux avec du ciment sur un sol gonflant (contenant principalement 43% de montmorillonite et d'autres minéraux argileux). Les résultats obtenus ont mis en évidence la réduction remarquable de l'indice de plasticité de 20 à 8% si une fois les combinaisons de 3% chaux + 3% ciment et 5% chaux + 3% ciment sont utilisées.

### 2.2.7 Effet de la combinaison chaux/fumée de silice

Bagherpour and Choobbasti (2003) ont étudié la combinaison d'un ciment avec la fumée de silice et la chaux avec la fumée de silice. Ils ont trouvé que l'addition de la fumée de silice n'a pas d'influence sur l'indice de plasticité du mélange «sol-chaux-fumée de silice», car l'adhésion entre la chaux et la fumée de silice était incomplète. Par contre, la fumée de silice influe sur l'indice de plasticité du mélange «sol-ciment-fumée de silice», elle diminue l'indice de plasticité par l'adhésion entre le ciment et la fumée de silice.

### 2.2.8 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes

En absence des sulfates, Ansary et al. (2006) ont étudié deux sols (A et B) de plasticité faible par la combinaison de la chaux et de cendres volantes. Les résultats obtenus ont montré que la limite de liquidité et de plasticité augmentent pour le sol -B- quelque soit le dosage chaux/cendres volantes, tandis que la limite de liquidité du sol -A- diminue alors que sa limite de plasticité augmente avec l'augmentation du dosage en cendres volantes (Tableau 2.3).

**Tableau 2.3** — Effet de la combinaison chaux/cendres volantes sur la plasticité de deux sols (A et B) de plasticité faible à moyenne, (Ansary et al., 2006).

| Propriétés           | Sols non traités |         | 3% de chaux mélangée avec |         |                         |         |                         |         |
|----------------------|------------------|---------|---------------------------|---------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|
|                      |                  |         | 6% de cendres volantes    |         | 12% de cendres volantes |         | 18% de cendres volantes |         |
|                      | Sol -A-          | Sol -B- | Sol -A-                   | Sol -B- | Sol -A-                 | Sol -B- | Sol -A-                 | Sol -B- |
| <b>W<sub>L</sub></b> | 43.7             | 25.5    | 42.5                      | 31.2    | 41                      | 32.3    | 41.5                    | 33.7    |
| <b>W<sub>P</sub></b> | 30.4             | 23.5    | 32.9                      | 28.9    | 37.1                    | 33.5    | 38.1                    | 35.8    |

En présence des sulfates, le même comportement a été observé par Sivapullaiah and Jha (2014) où l'argile (très plastique et fortement expansive) a été traitée avec plusieurs combinaisons de chaux et de cendres volantes et à titre d'exemple l'indice de plasticité diminue de 40.4 à 5,9% avec un traitement combiné de 10% CV et de 6% de chaux (Tableau 2.4). Cela peut être dû à la diminution de la teneur en argile et la modification de son classement en raison de la taille plus grossière des particules et de la plus faible limite de liquidité de cendres volantes par rapport au sol. Cependant, pour la même combinaison

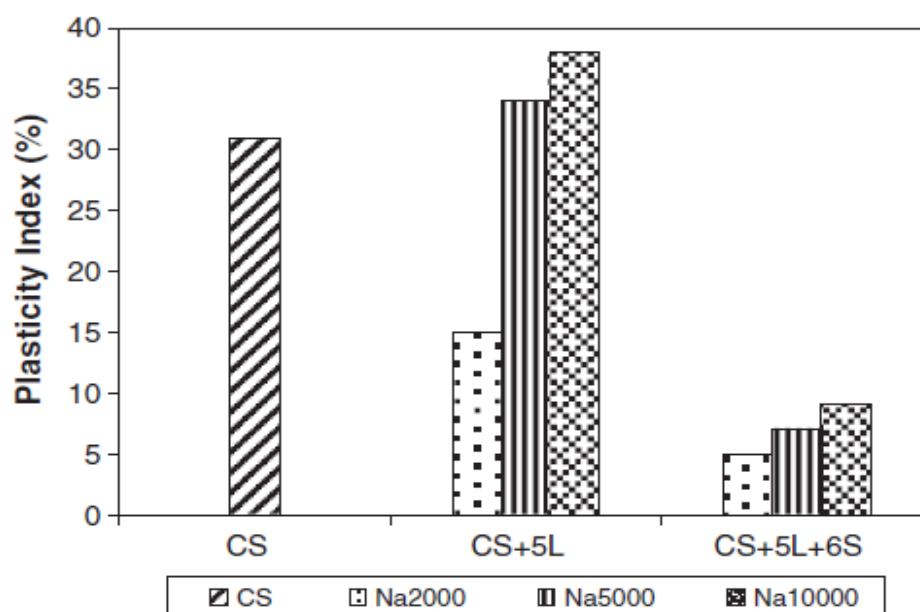
(10%CV et de 6% de chaux), l'indice de plasticité diminue encore plus jusqu'à 1,4% en présence seulement de 1% de gypse. Cela peut être dû à la diminution supplémentaire de la double couche diffuse et de l'augmentation de la viscosité des fluides de pores par l'absorption de plus d'ions calcium présents dans le gypse.

**Tableau 2.4** — Effet de la combinaison de la chaux et de cendres volantes sur les limites d'Atterberg d'une argile gonflante en présence de 1% de gypse, (Sivapullaiah and Jha, 2014).

| Teneurs en eau | Argile non traitée | Argile traitée avec des combinaisons de Chaux/CV sans |            |            | Argile traitée avec des combinaisons de Chaux/CV avec |            |            |
|----------------|--------------------|---|------------|------------|---|------------|------------|
|                |                    | 10%FA+ 2%L  | 10%FA+ 4%L | 10%FA+ 6%L | 10%FA+ 2%L  | 10%FA+ 4%L | 10%FA+ 6%L |
| <b>WL (%)</b>  | 72.10              | 60.00   | 58.30      | 55.20      | 59.50   | 56.80      | 54.20      |
| <b>WP (%)</b>  | 31.70              | 47.00   | 47.70      | 49.30      | 48.30   | 51.70      | 52.80      |
| <b>IP (%)</b>  | 40.40              | 13.00   | 10.60      | 5.90       | 11.20   | 5.10       | 1.40       |

### 2.2.9 Effet de la combinaison chaux/laitier

Celik and Nalbantoglu (2013) ont constaté que l'indice de plasticité d'un sol argileux traité avec la combinaison de 5% de chaux et 6% de laitier (*GGBS*) diminue de 32% jusqu'à 5, 7.5 et 10% en présence de 2000, 5000 et 10000 ppm du sulfate de sodium, respectivement. De plus, le traitement combiné chaux/laitier en présence d'un sulfate de sodium améliore significativement la plasticité des sols fins mieux que l'utilisation de la chaux seule à savoir que pour les deux types de traitement, l'indice de plasticité augmente avec l'augmentation de la concentration en sulfate de sodium (Fig. 2.5).



**Fig. 2.5** — Effet de différentes teneurs du sulfate de sodium sur l'indice de plasticité d'un sol argileux fin traité à 5% de chaux seule et en combinaison avec 6% de laitier, (Celik and Nalbantoglu, 2013).

## 2.3 Effet des ajouts cimentaires sur les caractéristiques du compactage

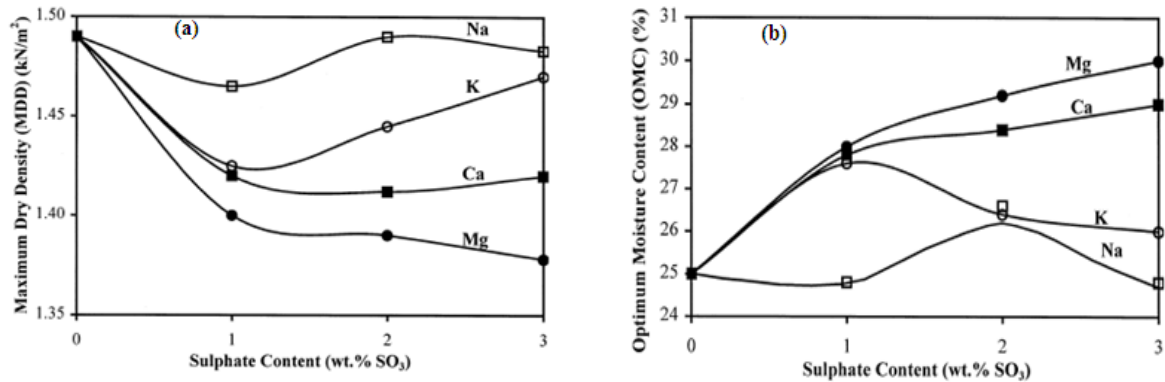
### 2.3.1 Effet de la chaux

En absence des sulfates, les caractéristiques de compactage contrôlent le comportement mécanique des sols tels que la perméabilité, la rigidité, la résistance, le tassement et la stabilité vis-à-vis du gonflement. Généralement, la densité obtenue après compactage dépend de la teneur en eau du sol. En effet, la densité sèche augmente avec la teneur en eau jusqu'à un optimum, puis elle décroît avec l'augmentation de la teneur en eau. Sur le chantier, il est important de connaître cet optimum pour obtenir des sols suffisamment denses. D'après Attoh-Okine (1995), l'addition de la chaux comme additif dans un traitement d'une laterite (riche en kaolinite, en oxyde de fer et d'aluminium) fait augmenter sa teneur en eau optimale et réduire sa densité sèche maximale. Les mêmes résultats ont été obtenus par plusieurs chercheurs (Ola, 1977; Rahman, 1986; George et al., 1992; Indraratna, 1996; Kinuthia et al., 1999; Gay and Schad, 2000; Kavak and Akyarli, 2007; Hossain et al., 2007; Manasseh and Olufmi, 2008; Ghobadi et al., 2014; Asgari et al., 2015; Jha and Sivapullaiah, 2015). D'une part, Les modifications apportées par l'utilisation de la chaux sont dues à la formation immédiate des produits de cimentation (Yong and Ouhadi, 2007). D'autre part, Harichane et al. (2011c) ont indiqué que les modifications apportées sur les paramètres de compactage des sols argileux stabilisés par l'utilisation de la chaux peuvent être expliquées par:

- L'effet de la chaux qui entraîne l'agrégation des particules par le procédé complexe d'échange cationique aboutissant à une modification de la granulométrie du sol et provoquant par conséquent les particules du sol à occuper de plus grands espaces ;
- La faible densité spécifique de la chaux par rapport à celle des sols naturels testés conduit à diminuer la densité sèche maximale des sols stabilisés ;
- L'effet des réactions pouzzolaniques qui se produisent entre les particules d'argile (principalement l'alumine et la silice) et le calcium (apporté par la chaux) dans les sols sont responsables de l'augmentation de la teneur en eau optimale vu que ce processus augmente l'affinité du sol à l'eau.

En présence des sulfates, les résultats dégagés par Kinuthia et al. (1999) ont montré que les caractéristiques de compactages de la kaolinite traité à 6% de chaux sont négativement influées par la présence des sulfates tout en diminuant la densité sèche maximale (quelque soit la concentration et le type de cations sulfates) et en augmentant la teneur en eau optimale. En effet, les sulfates divalents influencent considérablement sur les caractéristiques de compactage que les sulfates monovalents. La Figure 2.6 indique que les sulfates divalents

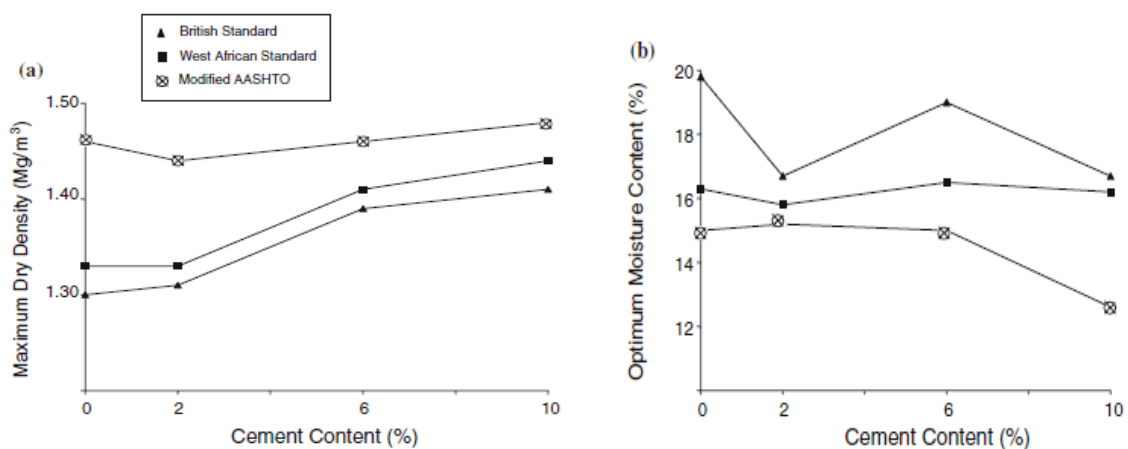
présentent une variation cadencée alors que les monovalents ont une variation perturbée. Le même comportement a été observé par Sivapullaiah and Jha (2014).



**Fig. 2.6** — Effet des sulfates monovalents et divalents sur les paramètres de compactage d'une kaolinite traité à 6% de chaux, (a): la densité sèche maximale, (b): la teneur en eau optimale, (Kinuthia et al., 1999).

### 2.3.2 Effet du ciment

Gay and Schad (2000) ont montré que l'addition du ciment dans un sol argileux de forte plasticité augmente la teneur en eau optimale et réduit la densité sèche maximale. Un comportement similaire a été observé par Asgari et al. (2015). Selon Okagbue and Ochulor (2007), l'addition de 0, 2, 6 et 10% de ciment au sol induit une augmentation de la densité sèche maximale et une réduction considérable de la teneur en eau optimale (Fig. 2.7). L'augmentation de la densité sèche peut être attribuée par la nature du sol étudié «sol graveleux bien gradué», la présence des composants du gravier et l'indice de vide élevé permet un compactage plus efficace. L'addition du ciment améliore et modifie les caractéristiques du sol, menant encore à un compactage performant avec une augmentation de la densité sèche.

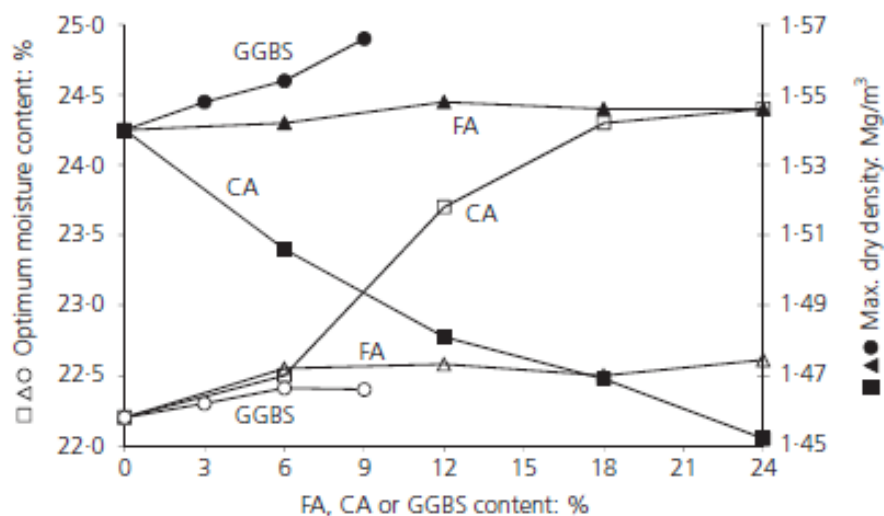


**Fig. 2.7** — Variation des caractéristiques de compactages en fonction de la teneur du ciment additionnée, (a): densité sèche maximale, (b): teneur en eau optimale, (Okagbue and Ochulor, 2007).

L'agglomération du ciment autour des grains de sol induit une augmentation de la taille des particules fines, peut aussi avoir une légère réduction de la teneur en eau optimale. C'est parce que l'addition du ciment affecte la distribution des particules du sol en augmentant la taille des particules fines et par conséquent la réduction de la force d'attraction de l'eau. De plus, Osula (1996) a suggéré que les réactions pouzzolaniques qui se développent dans le mélange sol/ciment prennent lieu après une heure de malaxage. En outre, la chaux fortement réactive produite dans l'hydratation du ciment devient plus efficace avec le temps qu'avec le contenu de ciment.

### 2.3.3 Effet des cendres volantes

Prabakar et al. (2004) ont constaté que l'addition des cendres volantes influe à la fois sur la porosité et l'indice des vides des sols argileux. Pour tous les échantillons étudiés, la densité sèche diminue avec l'augmentation des cendres volantes. Cette réduction est liée à la faible densité spécifique des cendres volantes par rapport au poids du sol. La réduction est de l'ordre de 15 à 20% où la teneur en eau optimale a augmenté avec l'augmentation progressive de la teneur en cendres volantes. Cependant, McCarthy et al. (2012) ont constaté que le taux de diminution de la densité sèche maximale ou de l'augmentation de la teneur en eau optimale dépend de la finesse des cendres volantes additionnées. A savoir que la teneur en eau optimale de l'argile traitée (elle a été prétraitée avec 3% de chaux) augmente de 22,3% jusqu'à 24,3% pour l'addition de 24% de CV (cendres volantes grossière) alors qu'elle augmente seulement jusqu'à 22,6% pour une même teneur en FA (cendres volantes fine). Le même comportement a été observé pour la densité sèche maximale, soit une diminution de 15,4 à 14,5 KN/m<sup>3</sup> pour 24% de CV et elle reste presque constante pour une même teneur en FA (Fig. 2.8).



**Fig. 2.8** — Variation des caractéristiques de compactage d'une argile traitée avec différents pourcentages de cendres volantes et de GGBS, (McCarthy et al., 2012).

### **2.3.4 Effet de la combinaison ciment/cendres volantes**

Kolias et al. (2005) ont étudié l'effet de 5, 10 et 20% des cendres volantes de type C combinée avec 2 et 4% de ciment sur trois sols argileux. Ils ont constaté que la densité sèche maximale diminue et la teneur en eau optimale augmente avec l'augmentation du dosage en cendres volantes. Ces résultats sont en concordance avec ceux obtenus par Basha et al. (2003). De plus, Bell (1993) a démontré que l'influence de la combinaison ciment/cendres volantes sur le comportement mécanique de trois types d'argiles à savoir: la kaolinite, la montmorillonite et le quartz est presque le même malgré la grande différence qui existe entre ces trois espèces d'argiles. En général, Il s'agit d'une diminution de leur densité sèche maximale et une augmentation de leur teneur en eau optimale.

### **2.3.5 Effet du de la combinaison ciment/phospho-gypse**

Selon Degirmenci et al. (2007) si une fois le ciment et le phospho-gypse sont combinés pour traiter un sol mou, les caractéristiques de compactage de ce sol seront influencées positivement. A savoir, une augmentation de la densité sèche et une diminution de la teneur en eau ont été constatées. Cette augmentation de la densité sèche est généralement acceptée comme un indicateur d'amélioration de la portance du sol.

### **2.3.6 Effet de la combinaison chaux/pouzzolane naturelle**

Harichane et al. (2011a) ont étudié l'effet de la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur les caractéristiques de compactage de deux sols mous argileux. Les résultats obtenus ont montré que la combinaison pouzzolane naturelle-chaux a fait augmenter la densité sèche maximale du sol gris argileux et a diminué celle du sol rouge argileux. La même combinaison a diminué la teneur en eau optimale du sol gris argileux et a augmenté celle du sol rouge argileux. Le comportement qui semble très différent entre ces deux sols peut être lié à l'une des raisons suivantes:

- la chaux entraîne l'agrégation des particules par le procédé complexe d'échange cationique aboutissant à une modification de la granulométrie du sol et provoquant par conséquent les particules du sol à occuper de plus grands espaces ;
- la densité spécifique de la chaux est généralement plus faible que celle des sols naturels testés ;
- les réactions pouzzolaniques entre les particules d'argile et la chaux dans les sols sont responsables de l'augmentation de la teneur en eau optimale vu que ce processus augmente l'affinité du sol à l'eau.

### 2.3.7 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes

Sivapullaiah and Jha (2014) ont étudié l'effet de plusieurs combinaisons de chaux et de cendres volantes sur les caractéristiques de compactage d'une argile très plastique et fortement gonflante en présence de 1% de gypse (Tableau 2.5). Les résultats obtenus ont montré que la  $\gamma_{dmax}$  diminue avec l'augmentation de la  $W_{OPN}$  après l'addition de différents dosages en chaux dans les mélanges de sol-cendres volantes. Cependant, la tendance de la  $\gamma_{dmax}$  à la diminution est notifiée marginale au delà de 4% de chaux. Ceci est dû à la floculation des particules d'argile en résistant à l'effet de l'effort de compactage. La réduction progressive de la  $\gamma_{dmax}$  avec l'augmentation de la teneur en chaux reflète l'amélioration de la floculation et la cimentation des particules. Ainsi, la tendance de la  $W_{OPN}$  à l'augmentation peut être la cause de l'amélioration de la capacité de rétention d'eau dans les floes, qui peut accueillir des molécules d'eau. Des observations similaires ont été signalées par plusieurs chercheurs (Bell, 1996; George et al., 1992; Kumar et al., 2007).

**Tableau 2.5** — Effet de la combinaison de la chaux et de cendres volantes sur les caractéristiques de compactages d'une argile gonflante en présence de 1% de gypse, (Sivapullaiah and Jha, 2014).

| Teneurs en eau                       | Argile non traitée | Argile traitée avec des combinaisons de Chaux/CV sans |               |               | Argile traitée avec des combinaisons de Chaux/CV avec |               |               |
|--------------------------------------|--------------------|---|---------------|---------------|---|---------------|---------------|
|                                      |                    | 10%FA+<br>2%L   | 10%FA+<br>4%L | 10%FA+<br>6%L | 10%FA+<br>2%L   | 10%FA+<br>4%L | 10%FA+<br>6%L |
| $W_{OPN}$ (%)                        | 32.50              | 31.80   | 35.20         | 34.00         | 34.00   | 36.00         | 37.00         |
| $\gamma_{dmax}$ (KN/m <sup>3</sup> ) | 13.40              | 13.40   | 12.83         | 12.80         | 13.05   | 12.80         | 12.48         |

D'ailleurs, plus de réduction de la  $\gamma_{dmax}$  et plus d'augmentation de  $W_{OPN}$  sont observés avec l'addition seulement de 1% de gypse dans les mélanges de chaux-sol-cendres volantes. Cela peut être dû à une meilleure liaison des particules en présence du gypse. Cependant, l'augmentation de la  $W_{OPN}$  peut être attribuée à une plus grande capacité de rétention d'eau dans les floes et l'exigence de l'eau supplémentaire pour l'hydratation du gypse avec des mélanges de chaux-sol-cendres volantes. McCarthy et al. (2012) ont rapporté le même comportement pour un sol riche en sulfate et stabilisé par l'addition de la chaux et des cendres volantes.

## 2.4 Effet des ajouts cimentaires sur la résistance à la compression non confinée

### 2.4.1 Effet de la chaux

En absence des sulfates, plusieurs chercheurs (Ingles and Metcalf, 1972; Al-Rawi, 1981; Lees et al., 1982; Bell, 1988; Locat et al., 1990; Rao and Venkataswamy, 2002; Le Borgne, 2010;

Al-Mukhtar et al., 2012) ont indiqué que l'effet de l'addition de la chaux sur la résistance d'un sol dépend de nombreux facteurs:

- le type du sol ;
- le temps et la méthode de cure ;
- la teneur en eau et la densité sèche ;
- le temps séparant le malaxage du compactage du sol.

D'après Wang (2002), la résistance à la compression non confinée est l'une des essais qui permet de faire une bonne évaluation de la capacité portante des sols traités du fait que la résistance est directement liée à la densité du sol. A savoir que la densité dépend de sa part de l'énergie du compactage et de la teneur en eau. C'est pour cette raison qu'on prépare les éprouvettes de sol en fonction du couple (OMC et MDD).

George et al. (1992) ont trouvé que la résistance mécanique de deux sols de plasticité moyenne augmente avec le dosage en chaux. Les mêmes résultats ont été obtenus par plusieurs chercheurs (Attoh-Okine, 1995; Ola, 1977; Bell, 1996; Ghobadi et al., 2014; Jha and Sivapullaiah, 2015). D'ailleurs, Bell (1996) a démontré que l'augmentation des résistances mécaniques dépend non seulement du dosage en chaux utilisé mais aussi de la nature des minéraux argileux du sol traité et de la période de cure. En effet, après 21 jours de cure, les sols contenant du quartz présentent une résistance 5 fois plus grande que ceux possédant d'autres minéraux. Par conséquent, la résistance de la montmorillonite diminue à partir de 4% de chaux pour toutes les périodes de cure.

De plus, Al-Mukhtar et al. (2010) ont étudié l'effet de différents pourcentages de chaux sur la résistance à la compression non confinée d'une bentonite très plastique. Pour 20% de chaux, la résistance à la compression non confinée a augmenté de 0.21 à 3.6 MPa après une cure de 90 jours. Le même comportement a été observé par Manasseh and Olufmi (2008) et Aldaood et al. (2014a, b). Selon Al-Mukhtar et al. (2012), la résistance à la compression non confinée à court et à long terme d'une argile (smectites) augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux et de la période de cure (Tableau 2.6).

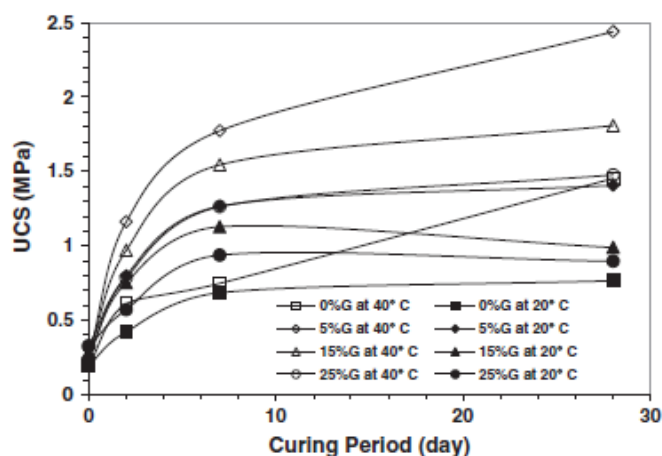
**Tableau 2.6** — Effet de la teneur en chaux et de la période de cure sur la résistance à la compression non confinée d'une argile de la famille des smectites, (Al-Mukhtar et al., 2012).

| Dosage en chaux (%) | Résistance à la compression non confinée (MPa, $\pm$ 0.1MPa) |                |
|---------------------|--|----------------|
|                     | Après 7 jours  | Après 90 jours |
| 0%                  | 0.3 sans cure  | 0.3 sans cure  |
| 1%                  | 0.4  | 0.4            |
| 4%                  | 1.2  | 1.8            |
| 10%                 | 1.6  | 2.4            |



En présence des sulfates, Dermatas and Meng (2003) ont reporté qu'avec 5% de sulfate de sodium deca-hydraté, la résistance à la compression non confinée d'un sable contenant 30% de kaolinite traité avec 10% de chaux diminue de 607.1 KPa jusqu'à 552.8 KPa après 28 jours de cure. Cependant, Yilmaz and Civelekoglu (2009) ont indiqué que la stabilisation d'une bentonite naturelle très plastique (montmorillonite-Na est le constituant principal) avec l'addition du gypse comme additif présente un effet positif sur la résistance à la compression non confinée. Ils ont trouvé que la résistance augmente de 58 à 77.5 KPa pour 5% de gypse puis elle se stabilise presque à 80 KPa pour 7.5 et 10% de gypse.

Aldaood et al. (2014a) ont reporté que l'utilisation de différents pourcentages de gypse seul ou combinée avec 6% de chaux dans la stabilisation d'un sol peu plastique fait augmenter considérablement sa résistance à la compression non confinée avec l'augmentation de la température et de la période de cure (Fig. 2.9). L'augmentation de la résistance est liée aux grains fins de gypse qui font améliorer la compacité par le remplissage des vides des échantillons traités et par conséquent l'augmentation de la résistance à la compression non confinée. Le même comportement a été observé par Segui et al. (2013).

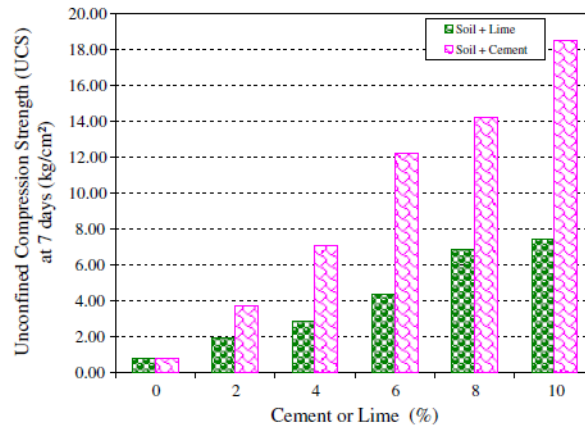


**Fig. 2.9** — Effet apporté par l'utilisation de gypse comme additif sur la résistance à la compression non confinée d'un sol peu plastique traité à la chaux, (Aldaood et al., 2014a).

#### 2.4.2 Effet du ciment

En absence des sulfates, les résultats obtenus par Okagbue and Ochulor (2007) ont indiqué que la résistance à la compression non confinée augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment. L'augmentation de la résistance est attribuée aux composantes actives du ciment portland. Par l'hydratation, ces composés actifs (silicate tricalcique, silicate dicalcique et l'aluminate tricalcique) se cristallisent et font lier ensemble les particules du sol, de ce fait en les transformant en masse dure. Les résultats obtenus suggèrent que l'efficacité du ciment dans l'amélioration de la résistance du sol peut également être attribuée à la

composition du sol. Le même comportement a été observé par Bahar et al. (2004) et Ouhadi et al. (2014) où la résistance à la compression non confinée du sol argileux augmente considérablement avec l'augmentation de la teneur en additifs utilisés. Cependant, l'utilisation du ciment a fait augmenter la résistance à la compression non confinée mieux que l'utilisation de la chaux (Fig. 2.10).



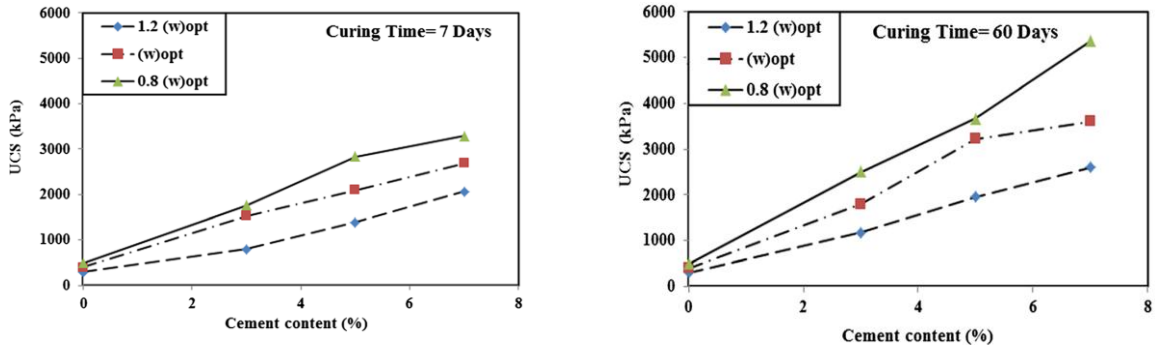
**Fig. 2.10** — Effet de l'utilisation du ciment (CEM II) et de la chaux comme additifs sur la résistance à la compression non confinée d'un sol argileux peu plastique, (Ouhadi et al., 2014).

Kenai et al. (2006) ont étudié la résistance à la compression non confinée à l'état sec ou immergée dans l'eau pendant 2 à 28 jours. Les essais ont été faits sur une argile sableuse avec l'addition de 0 à 20% du ciment portland (CEM I, 32.5). Les résultats obtenus ont montré que l'augmentation du dosage en ciment fait augmenter la résistance à la compression non confinée. Ceci est dû à l'hydratation suffisante du ciment dans les pores de la matrice et la rigidité élevée de sa structure par la formation d'un grand volume de composés cimentaires dans le sol traité.

D'ailleurs, Asgari et al. (2015) ont trouvé que la résistance à la compression non confinée des échantillons de sol préparés à différentes teneur en eau augmente avec l'augmentation de la teneur du ciment utilisé et de la période de cure. L'effet de la teneur en eau avec laquelle les échantillons du sol ont été préparés joue un rôle capital du fait que la résistance à la compression non confinée augmente avec la diminution de la teneur en eau adoptée (Fig. 2.11).

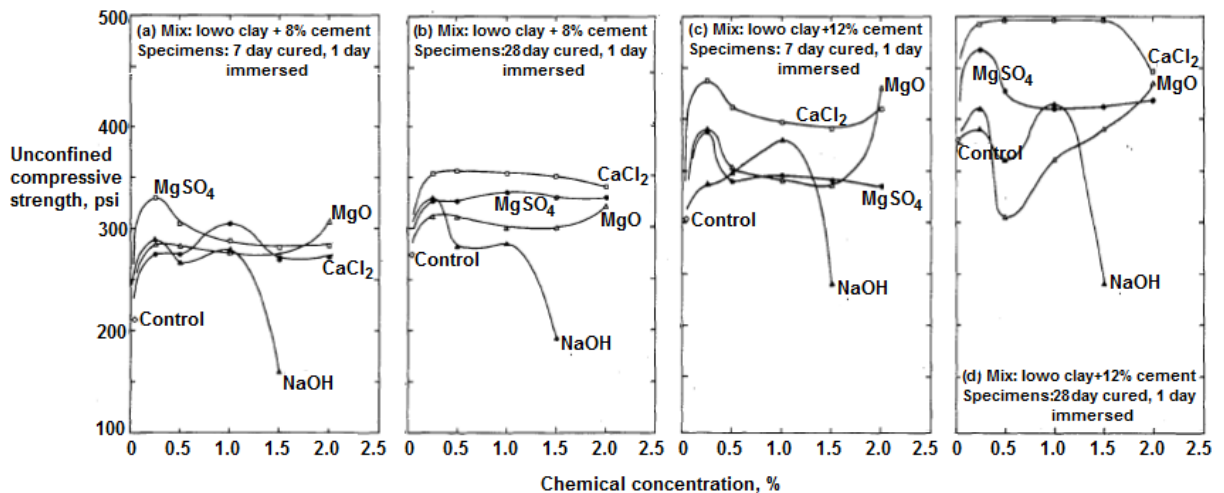
En présence des sulfates, l'étude réalisée par Laguros (1962) a indiqué que la RCS du sol témoin augmente avec l'augmentation de la teneur en ciment utilisé et de la période de cure. Cependant, quelque soit le temps de cure et le dosage en ciment utilisé, la RCS de l'argile traitée est optimale lorsque la concentration en  $MgSO_4$ ,  $MgO$ ,  $CaCl_2$  et  $NaOH$  est faible. Alors que, généralement, pour des fortes concentrations en mêmes composés chimiques, la RCS semble fortement perturbée à titre d'exemple la présence de  $NaOH$  fait perturber la RCS

du sol traité à savoir que les résistances fournies sont bien plus petites que celles du sol témoin lorsque la concentration en NaOH est forte (1.5%NaOH).



**Fig. 2.11** — Effet de l'utilisation du ciment sur la résistance à la compression non confinée d'un sol peu plastique préparé à différentes teneur en eau après 7 et 60 jours de cure, (Asgari et al., 2015).

Par contre pour le cas d'un traitement avec 5% de ciment en présence de différentes concentrations en MgSO<sub>4</sub>, la RCS présente une variation cadencée où elle diminue au jeune âge et semble être constante à long terme. De plus, pour 12% de ciment en présence des mêmes concentrations en MgSO<sub>4</sub>, la RCS semble être perturbée (Fig. 2.12). Ces résultats ont montré que les deux composés chimiques MgSO<sub>4</sub> et CaCl<sub>2</sub> ont importé un effet bénéfique pour le gain de la résistance de l'argile traitée qui dépend aussi bien de plusieurs facteurs à savoir : le type et la concentration en élément chimique, le dosage en ciment utilisé et de la période de cure.

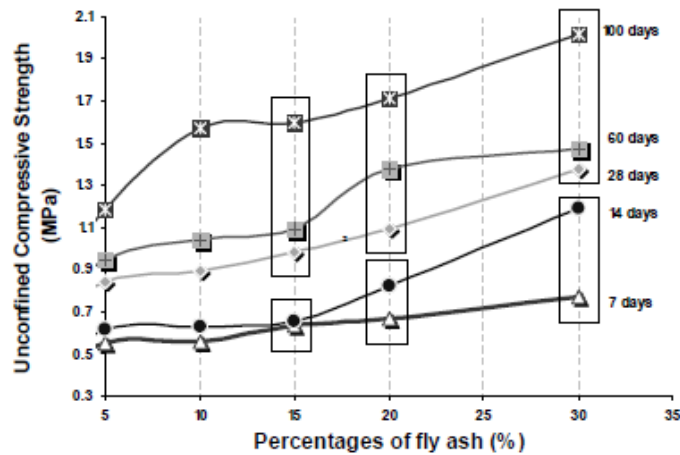


**Fig. 2.12** — Effet de certains types de composés chimiques sur la résistance à la compression non confinée de l'argile d'Iowa après 7 et 28 jours de cure, (Laguros, 1962).

### 2.4.3 Effet des cendres volantes

Silitonga et al. (2010) ont observé que la résistance à la compression non confinée d'un sédiment marin utilisé dans une chaussée routière augmente avec le dosage en cendres

volantes utilisé. De plus, une augmentation de 400% de la résistance à la compression après 100 jours de cure a été enregistrée (Fig. 2.13).

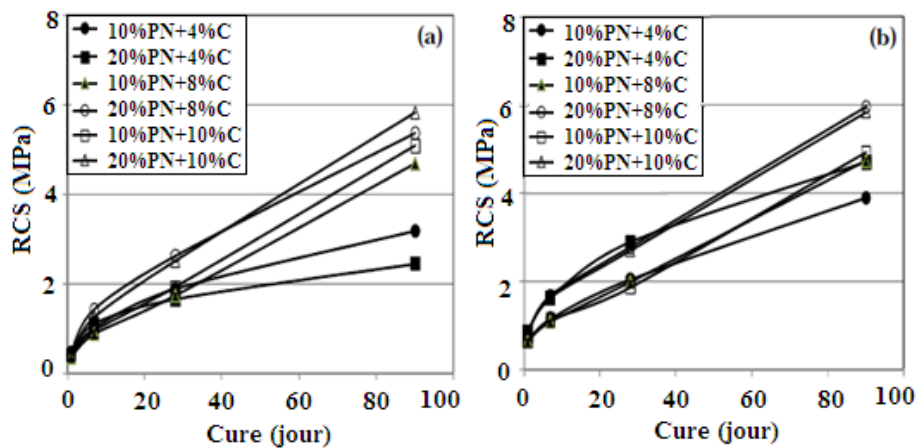


**Fig. 2.13** — Effet de différents pourcentages de cendres volantes sur la résistance à la compression non confinée d'un sédiment marin après différentes périodes de cure, (Silitonga et al., 2011).

D'ailleurs, Bin-Shafique et al. (2010) ont trouvé que l'addition de 20% des cendres volantes a augmenté la résistance à la compression non confinée de 210 à 800KPa pour un sol de faible plasticité et de 180 à 560KPa pour un sol fortement expansif. Cela met en évidence l'effet de la susceptibilité d'un sol au gonflement sur les propriétés mécaniques des sols traités avec l'utilisation des cendres volantes. De plus, Jaturapitakkul et al., (1999) ont démontré que la résistance à la compression non confinée diminue avec l'augmentation de la taille des particules (finesse) des cendres volantes.

#### 2.4.4 Effet de la combinaison chaux/pouzzolane naturelle

Harichane et al. (2011a) ont étudié l'effet de la combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle sur la résistance de deux sols mous argileux (Fig. 2.14).



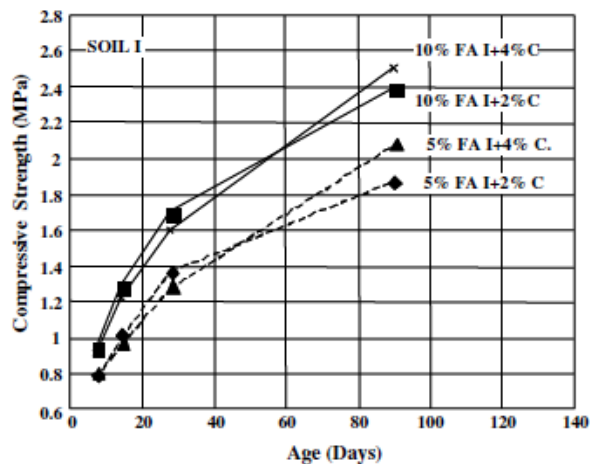
**Fig. 2.14** — Effet de la combinaison chaux-pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression simple, (a): sol argileux gris et (b): sols argileux rouges, (Harichane et al., 2011a).

Les résultats obtenus ont montré que les résistances ont été améliorées considérablement pour les deux sols argileux traités, la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la période de cure et de la teneur en ajouts additionnés. Cette augmentation de la résistance à la compression est attribuée à la réaction de la chaux avec les particules du sol argileux ce qui se traduit par la formation d'agents de cimentation liant ainsi les particules du sol entre elles.

#### 2.4.5 Effet de la combinaison ciment/cendres volantes

Hossain et al. (2007) ont constaté que la résistance à la compression simple de deux sols argileux augmente avec l'augmentation du dosage en cendres volcaniques et l'âge de cure. La combinaison "ciment- cendres volcaniques" produit plus de résistance que la combinaison "chaux- cendres volcaniques". Ils ont indiqué aussi que le type du sol a une grande influence sur les propriétés mécaniques.

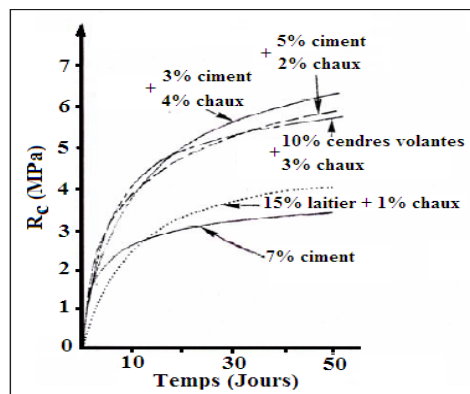
Kolias et al. (2005) ont étudié l'effet des cendres volantes (5, 10 et 20%) combinées avec du ciment (2-4%) sur trois sols argileux. Ils ont démontré que leur résistance à la compression simple après traitement a été considérablement améliorée (Fig. 2.15). Plus le rapport « ciment-cendres volantes » augmente, plus la résistance augmente.



**Fig. 2.15** — Effet de différentes combinaisons des ajouts minéraux sur la résistance à la compression simple d'un sol, (Kolias et al., 2005).

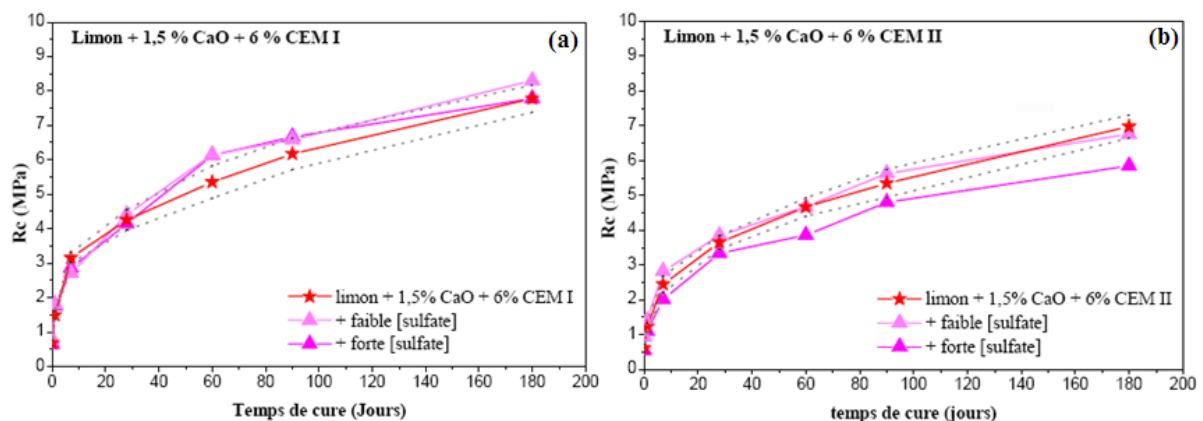
#### 2.4.6 Effet de la combinaison chaux/ciment et chaux/laitier

La Figure 2.16 représente la résistance à la compression simple en fonction du temps d'un sol amélioré avec différentes combinaisons d'ajouts minéraux en absence des sulfates. Le traitement seul à 7% de ciment a donné la résistance la plus faible. En effet, le sol traité avec les combinaisons «chaux/laitier», «chaux/cendres volantes» et «chaux/ciment» ont présenté des résistances plus fortes. L'augmentation de résistance à la compression simple d'un sol traité va aussi dépendre du type de liant hydraulique utilisé (Fontaine, 1984).



**Fig. 2.16** — Effet de différentes combinaisons des ajouts minéraux sur la résistance à la compression simple d'un sol, (Fontaine, 1984).

En présence des sulfates, Le Borgne (2010) a étudié l'effet de la combinaison de 1.5% de chaux avec 6% de ciment (CEM I ou CEM II) en présence d'un sulfate incorporé sous forme de gypse sur la résistance à la compression simple d'un sol limoneux (Fig. 2.17). En absence du gypse, le CEM I améliore la résistance à la compression plus que le CEM II. Si le sulfate est présent, les deux types de traitement influent d'une manière différente l'un par rapport à l'autre. Le traitement chaux-CEM I, en présence d'une faible ou d'une forte concentration du sulfate augmente faiblement la résistance à la compression simple. Tandis que, si on remplace le CEM I par le CEM II pour le même traitement, la résistance à la compression diminue. Donc, l'effet sur le traitement d'un sol dépend non seulement de la concentration en sulfate mais aussi du type du liant. Ces résultats s'accordent avec ceux qui ont été obtenus par Cuisinier et al., (2011).



**Fig. 2.17** — Effet du sulfate et du type du liant sur la résistance à la compression simple d'un sol limoneux traité par combinaison chaux-ciment, (Le Borgne, 2010).

D'ailleurs, Wild et al. (1998) ont fait traiter une kaolinite par la substitution progressive de la chaux éteinte par le laitier (GGBS) en présence du sulfate  $SO_3$  (1, 2 et 3%) à différentes périodes de cures. Les résultats obtenus ont montré qu'en absence de sulfate, la résistance à la

compression simple augmente faiblement avec la substitution partielle de la chaux par le laitier jusqu'à un optimum de 2000 KN/m<sup>2</sup> qui correspond au rapport « 5%GGBS/1%chaux». Alors qu'en présence de sulfate, la résistance à la compression simple augmente fortement dès que la substitution partielle de la chaux par le laitier jusqu'à le même optimum quelle que soit la concentration en sulfate. Si la chaux est entièrement absente, le traitement n'aura pas de sens car, la résistance à la compression devient 4 fois plus petite que celle d'une kaolinite non traitée malgré la présence du sulfate. La période de cure joue un rôle très important dans l'amélioration des performances mécaniques.

#### 2.4.7 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes

Le tableau 2.7 présente l'effet apporté par l'addition de 10% de cendres volantes mélangé avec six combinaisons de chaux-sol sur la résistance à la compression non confinée d'une argile très plastique et fortement gonflante en présence de 1% de gypse (Sivapullaiah and Jha, 2014). Ils ont constaté qu'avec 2 et 4% de chaux dans le mélange de sol-cendres volantes, l'augmentation de la RCS ne se prononce pas, même après 28 jours de cure. Ceci montre que la teneur en silice réactive des cendres volantes est non significative. Cependant, l'augmentation significative de la résistance est observée avec l'addition de 6% de la chaux au mélange sol-cendres volantes. Des comportements similaires de variation de la RCS se présentent juste après l'addition du gypse aux mélanges de sol-cendres volantes jusqu'à 4% de chaux. Cependant, la résistance des mélanges en présence du gypse est légèrement considérable que son absence. Cela peut être dû à la disponibilité du calcium supplémentaire venant du gypse additionné en produisant une grande quantité de composés pouzzolaniques par dissolution de la silice du sol dans un pH plus élevé.

**Tableau 2.7** — Effet de la combinaison de la chaux et de cendres volantes sur la résistance à la compression d'une argile gonflante en présence de 1% de gypse, (Sivapullaiah and Jha, 2014).

| Propriété étudié                  | Combinaison       | Période de cure (jours) |        |         |         |         |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------------|--------|---------|---------|---------|
|                                   |                   | 0                       | 7      | 14      | 28      | 90      |
| Résistance à la compression (KPa) | 10%FA+2%L+0%Gypse | 352.75                  | 260.50 | 415.09  | 482.50  | -       |
|                                   | 10%FA+4%L+0%Gypse | 274.85                  | 387.50 | 423.69  | 352.50  | -       |
|                                   | 10%FA+6%L+0%Gypse | 270.00                  | 549.00 | 684.15  | 1091.18 | 1981.70 |
|                                   | 10%FA+2%L+1%Gypse | 280.00                  | 224.00 | 290.00  | 329.00  | -       |
|                                   | 10%FA+4%L+1%Gypse | 317.50                  | 380.00 | 496.50  | 495.00  | -       |
|                                   | 10%FA+6%L+1%Gypse | 309.12                  | 721.00 | 1055.00 | 1017.23 | 1928.63 |

D'ailleurs, il est à constater que la RCS obtenue à 7 et 14 jours de cure avec du gypse est plus grande et presque égale à la RCS obtenue à 14 et 28 jours de cure sans présence du gypse, respectivement. Il est maintenant clair que le gypse accélère la résistance initiale des

mélanges. Cela peut être attribué à la formation d'ettringite dans les vides de la matrice du sol à un pH plus élevé et, par conséquent, la formation de cristaux de structure étendue à l'intérieur de la matrice du sol (Little et al., 2009). Il est à noter que pour 90 jours de cure, la RCS du mélange de 10%CV+6%Chaux+sol avec ou sans gypse est presque deux fois plus grande que celle du même mélange après 28 jours de cure.

## 2.5 Effet des ajouts cimentaires sur la résistance au cisaillement

### 2.5.1 Effet de la chaux

En absence des sulfates, Osula (1991) a reporté que les paramètres de cisaillement ( $C$  et  $\phi$ ) d'un sol de forte plasticité (Latérite) traité à différentes quantités de chaux ont été fortement modifiés. En effet, une augmentation légère marquée pour l'angle de frottement interne laquelle est accompagnée par une forte réduction de la cohésion. Ces modifications sont dues à l'action de chaux à court terme qui provoque la floculation des particules du sol stabilisé.

De plus, Muntohar and Hantoro (2000) ont montré que pour une teneur de 10 % de chaux, l'angle de frottement interne et la cohésion se sont devenus respectivement 1.7 et 1.3 fois plus grand que celui du sol non traité. L'augmentation de l'angle de frottement interne est due à la floculation des particules des sols par l'action de chaux à court terme, tandis que celle de la cohésion est attribuée à la formation des nouveaux produits de cimentation (C-S-H et C-A-H) suite à la réaction pouzzolanique de chaux qui intervient à plus long terme. Ces produits font augmenter la cohésion des particules du sol stabilisé.

D'ailleurs, Sivapullaiah et al. (2000, 2006) ont observé que la nature minéralogique du sol traité fait influencer d'une façon significative sur les paramètres de cisaillement. En effet, l'effet apporté par l'utilisation de 6% de chaux comme additif sur les angles de frottement interne effectifs ( $\phi'$ ) et les cohésions effectives ( $C'$ ) de deux sols argileux, à savoir une montmorillonite très plastique (IP=47.5%) et une kaolinite peu plastique (IP=22%) était fortement différent. Il s'est avéré que la période de cure joue également un rôle très important dans l'évolution des paramètres de cisaillement (Tableau 2.8).

**Tableau 2.8** — Variation des paramètres de cisaillement effectifs ( $C'$  et  $\phi'$ ) de deux sols argileux (montmorillonite et kaolinite) stabilisés avec 6% de chaux à différentes période de cure.

| Nature du sol et paramètres de cisaillement |             | Avant traitement | Après traitement pour différentes périodes de cure |                |         |
|---|-------------|------------------|--|----------------|---------|
|   |             |                  | 7 jours  | 3 mois         | 12 mois |
| Montmorillonite                             | $C'$ (KPa)  | 0                | 73   | 243            | 263     |
| Sivapullaiah et al., (2000)                 | $\phi'$ (°) | 27               | 43   | 41             | 41      |
| Kaolinite                                   | $C'$ (KPa)  | 0                | 30   | 120 KPa à 30 j | 172     |
| Sivapullaiah et al., (2006)                 | $\phi'$ (°) | 27               | 34.5   | 35.3° à 30 j   | 35.3    |



Plusieurs travaux de recherches ont été effectués dont le but d'étudier l'effet de l'utilisation de la chaux comme stabilisant sur la résistance au cisaillement de différents types de sols (Osula, 1991; Gay and Schad, 2000; Muntohar and Hantoro, 2000; Bagherpour and Choobbasti, 2003). Les résultats obtenus ont montré que l'addition de la chaux comme additif améliore considérablement la résistance au cisaillement des sols stabilisés particulièrement avec la période de cure. Sivapullaiah et al. (2000) ont reporté que l'augmentation de la résistance au cisaillement est attribuée à l'amélioration de la cohésion suite aux réactions pouzzolaniques qui font lier les particules des sols stabilisés par cimentation.

En présence des sulfates, une variation remarquable des paramètres de cisaillement d'une montmorillonite traité à 6% de chaux en fonction de la concentration en sulfate monovalent ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et divalent ( $\text{CaSO}_4$ ) a été reporté par Sivapullaiah et al. (2000) (Tableau 2.9). Cette variation dépend non seulement de la concentration des sulfates utilisés mais aussi de la période de cure et du type des cations ( $\text{Na}^+$  ou  $\text{Ca}^{2+}$ ) associés à l'anion  $\text{SO}_4^{-2}$ . Au jeune âge, l'angle de frottement interne effectif diminue avec l'augmentation de la concentration en sulfate monovalent ou divalent, mais avec la présence de 1% de  $\text{CaSO}_4$ , l'angle de frottement interne devient plus grand par rapport à celui du sol traité sans  $\text{CaSO}_4$ .

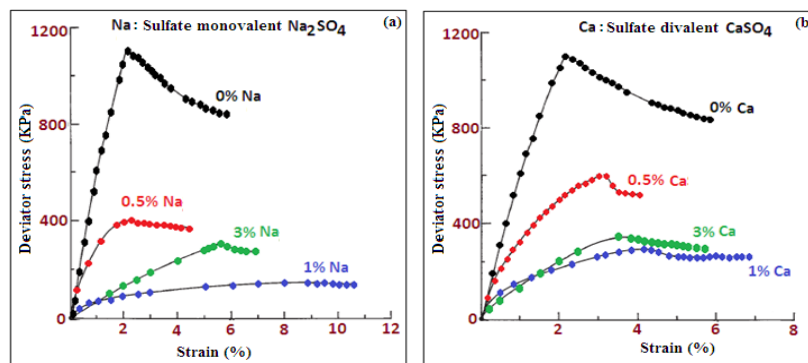
**Tableau 2.9** — Effet des sulfates sur les paramètres de cisaillement effectifs ( $C'$  et  $\phi'$ ) d'une montmorillonite traité à 6% de chaux à différentes périodes de cure, (Sivapullaiah et al., 2000).

| Type du sulfate utilisé   | Teneur en sulfate (%) | Paramètres de cisaillement | Période de cure |        |         |
|---|-----------------------|----------------------------|-----------------|--------|---------|
|   |                       |                            | 7 jours         | 3 mois | 12 mois |
| Sol traité sans sulfate   | 0                     | $C'$ (KPa)                 | 73              | 243    | 263     |
|   |                       | $\phi'$ (°)                | 43              | 41     | 41      |
| Sol traité avec sulfate monovalent ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) | 0.5                   | $C'$ (KPa)                 | 33              | 104    | 103     |
|   | 1                     |                            | 47              | 168    | 1       |
|   | 3                     |                            | 77              | 120    | 88      |
|   | 0.5                   | $\phi'$ (°)                | 41              | 35     | 29      |
|   | 1                     |                            | 42              | 44     | 44      |
|   | 3                     |                            | 33              | 31     | 32      |
| Sol traité avec sulfate divalent ( $\text{CaSO}_4$ )            | 0.5                   | $C'$ (KPa)                 | 180             | 104    | 80      |
|   | 1                     |                            | 120             | 102    | 110     |
|   | 3                     |                            | 110             | 96     | 80      |
|   | 0.5                   | $\phi'$ (°)                | 39              | 39     | 31      |
|   | 1                     |                            | 37              | 36     | 44      |
|   | 3                     |                            | 47              | 42     | 35      |

Cependant, après 7 jours de cure, la cohésion effective du sol traité initialement diminue en présence d'une faible concentration en sulfate monovalent (1%), puis elle augmente pour des fortes concentrations. Par contre, pour la même période de cure, l'effet apporté sur la cohésion a été inversé pour le cas d'un traitement en présence d'un sulfate divalent. Tandis que la variation des paramètres de cisaillement à très long terme n'est pas claire du fait qu'il y ait

une variation fortement perturbée avec la variation de la concentration des deux sulfates utilisés. D'après ces résultats, il s'avère que le sulfate monovalent généralement se comporte contrairement au sulfate divalent quelque soit les concentrations adoptées.

Après une année de cure, Sivapullaiah et al. (2000) ont démontré que la résistance au cisaillement de la montmorillonite diminue significativement de 1100 KPa jusqu'à 600 et 300 KPa en présence de 0.5 et 1% de  $\text{CaSO}_4$ , respectivement. Cependant, après la même période de cure, la résistance au cisaillement du même type de sol diminue considérablement jusqu'à 400 et 100 KPa en présence de 0.5 et 1% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , respectivement. Ces résultats indiquent que l'altération de la résistance au cisaillement est très importante avec le sulfate de sodium que le sulfate de calcium où la résistance s'est altérée très tôt (à 2% de déformation) avec la présence d'une faible concentration en sulfate de sodium que sulfate de calcium. En général, la dégradation des performances mécaniques (résistance) dépend non seulement de la concentration en sulfate utilisé mais aussi du type de cations associés à l'anion  $\text{SO}_4^{-2}$  (Fig. 2.18).



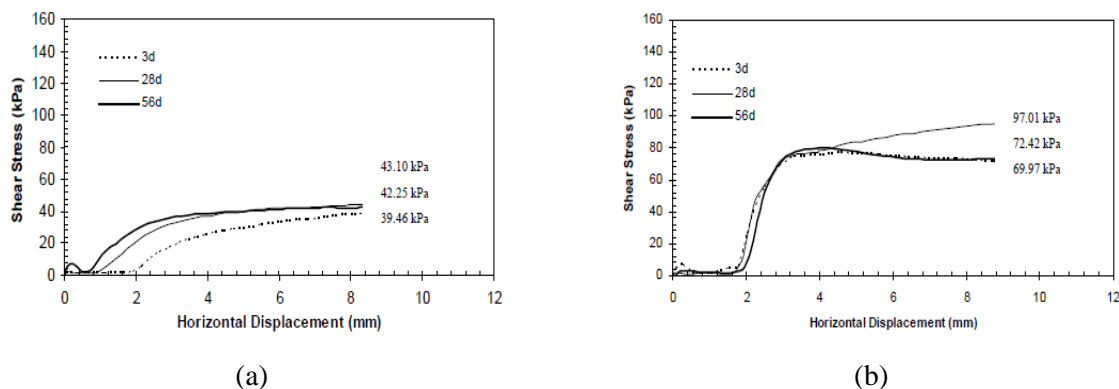
**Fig. 2.18** — Effet des sulfates sur la résistance au cisaillement d'une montmorillonite traitée avec 6% de chaux après une année de cure (pression de confinement: PC = 100 KPa), (Sivapullaiah et al., 2000).

### 2.5.2 Effet du ciment

En absence des sulfates, Ho and Chan (2011) ont étudié l'effet apporté par l'utilisation de 10% de ciment sur la résistance au cisaillement d'une argile organique très plastique pour différentes périodes de cure. La Figure 2.19 montre que la résistance au cisaillement développée par l'échantillon traité après 28 jours de cure est deux fois plus grande que celle du sol non traité. Cela peut être expliqué par la formation des phases cimentaires qui font lier les particules du sol stabilisé entre eux.

Gay and Schad (2000) ont montré que les caractéristiques de cisaillement d'un sol instable traité avec différents teneurs de ciment ont été améliorées d'une façon considérable particulièrement avec la cure. Pour 8% de ciment et après 28 jours de cure, l'angle de

frottement interne est 5 fois plus grand que celui du sol non traité. Cependant, pour les mêmes conditions précédentes, la cohésion est 7.5 fois plus grande que celle du sol non traité. Cela explique l'effet bénéfique apporté par l'utilisation du ciment pour la stabilisation des sols instables.



**Fig. 2.19** — Variation de la résistance au cisaillement d'une argile organique très plastique traitée au ciment après différentes périodes de cure, (a): sol non traité, (b): sol traité avec 10% de ciment, (Ho and Chan, 2011).

Laguros, (1962) a constaté qu'en présence des sulfates et après 7 jours de cure, la cohésion et l'angle de frottement interne d'un sol limoneux traité avec l'addition de 12% de ciment portland augmente de 10 à 20 KPa et de 15 à 37°, respectivement. Cependant, pour une même période de cure avec la présence de 2% de  $\text{CaSO}_4$ , la valeur de la cohésion est devenue 3 fois plus grande par rapport au sol traité. Tandis que, l'angle de frottement interne a diminué seulement de 4° par rapport au sol traité. Ces résultats montrent que le sulfate de calcium importe un effet bénéfique pour un sol limoneux traité au ciment (Tableau 2.10). L'augmentation de la cohésion peut s'expliquer par la diminution de l'indice des vides du sol traité sous l'effet du compactage en présence des particules fines du  $\text{CaSO}_4$  et par conséquent l'augmentation de la compacité et donc sa cohésion.

**Tableau 2.10** — Effet de 2% de  $\text{CaSO}_4$  sur les paramètres de cisaillement d'un sol limoneux traité avec 12% de ciment portland, (Laguros, 1962).

| Désignation  | Cohésion (KPa)<br>après 7 jours | Angle de frottement<br>interne (°) après 7 jours |
|--|---------------------------------|--|
| Limon d'Iowa non traité                              | 10                              | 15   |
| Limon d'Iowa + 12% de ciment                         | 20                              | 37   |
| Limon d'Iowa + 12% de ciment + 2% de $\text{CaSO}_4$ | 60                              | 33   |

### 2.5.3 Effet des cendres volantes

Sezer et al. (2006) ont constaté que l'utilisation de 5, 10, 15 et 20% de cendres volantes comme additif fait améliorer considérablement les caractéristiques de cisaillement du sol

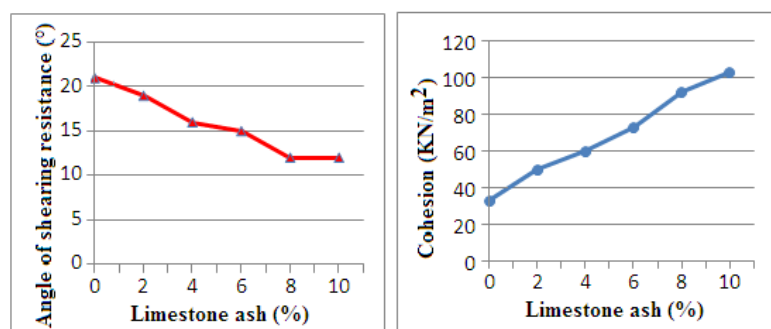
instable traité. Ainsi pour un dosage de 20% de cendres volantes et après une cure de 28 jours, la cohésion est devenue 3.8 fois plus grande que celle du sol non traité. De plus, Senol et al. (2006) ont reporté que l'augmentation ou la diminution des paramètres de cisaillement dépendent non seulement de la teneur en cendres volantes utilisée mais aussi de la nature du sol stabilisé (Tableau 2.11).

**Tableau 2.11** — Effet des cendres volantes sur les caractéristiques de cisaillement, (Senol et al., 2006).

| Sample N° | % Fly ash | Cohesion (Kg/cm <sup>2</sup> ) |        |        | Angle of internal friction |        |        |
|-----------|-----------|--------------------------------|--------|--------|----------------------------|--------|--------|
|           |           | Soil-A                         | Soil-B | Soil-C | Soil-A                     | Soil-B | Soil-C |
| 1         | 0         | 0.250                          | 0.185  | 0.530  | 30°15'                     | 25°32' | 17°10' |
| 2         | 9.0       | 0.250                          | 0.280  | 0.523  | 31°36'                     | 24°13' | 20°26' |
| 3         | 20.0      | 0.270                          | 0.300  | 0.475  | 33°1'                      | 25°12' | 21°58' |
| 4         | 28.0      | 0.310                          | 0.300  | 0.500  | 35°56'                     | 28°18' | 23°15' |
| 5         | 35.5      | 0.340                          | 0.330  | 0.480  | 34°12'                     | 29°38' | 26°17' |
| 6         | 41.2      | 0.370                          | 0.370  | 0.440  | 32°6'                      | 29°53' | 27°22' |
| 7         | 46.0      | 0.395                          | 0.380  | 0.395  | 28°38'                     | 30°38' | 27°56' |
| 8         | 100.0     | -                              | 0.150  | -      | -                          | 29°21' | -      |

#### 2.5.4 Effet de la combinaison chaux/cendres de calcaire

Okagbue and Yakubu (2000) ont étudié l'effet des cendres de calcaire «*Limestone Ash*» comme un substituant de la chaux pour l'amélioration des caractéristique de cisaillement d'un sol. Les résultats obtenus ont montré que l'angle de frottement interne diminue et la cohésion augmente avec le dosage en cendres de calcaire (Fig. 2.20). Ces deux propriétés sont responsables de l'amélioration de la résistance au cisaillement des sols améliorés.



**Fig. 2.20** — Effet des cendres de calcaire sur les paramètres de cisaillement, (Okagbue and Yakubu, 2000).

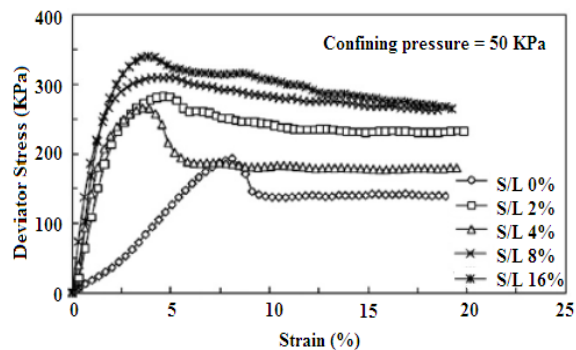
#### 2.5.5 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes

D'ailleurs, Sezer et al. (2000) ont rapporté que la combinaison des cendres volantes et de la chaux avec une teneur élevée fait augmenter l'angle de frottement interne du sol traité du fait

que les cendres volantes ont un angle de frottement interne bien plus élevé que celui du sol. En outre, la floculation des particules augmente la valeur de l'angle de frottement interne, alors que la cimentation des particules fait augmenter la valeur de la cohésion.

### 2.5.6 Effet de la combinaison chaux/cendres de vase calcinée

Lin et al. (2007) ont effectué une étude pour mettre en évidence l'effet du traitement combiné de la chaux et de la cendre de vase calcinée d'un sol sur la résistance au cisaillement à différentes périodes de cure.



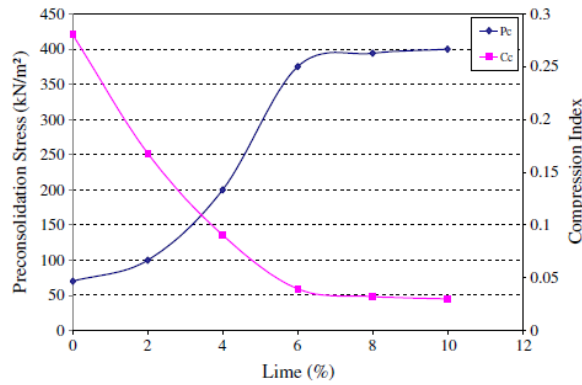
**Fig. 2.21** — Effet de la combinaison de chaux-cendres de vase calcinée sur la résistance au cisaillement d'un sol, (Lin et al., 2007).

Ils ont constaté que le pic de la résistance au cisaillement augmente avec le dosage combiné en « chaux-cendres de vase calcinée ». Cette amélioration est attribuée à l'augmentation de la cohésion du sol par l'intervention des réactions pouzzolanique qui donnent lieu à la formation des composés cimentaires (Fig. 2.21).

## 2.6 Effet des ajouts cimentaires sur la compressibilité

### 2.6.1 Effet de la chaux

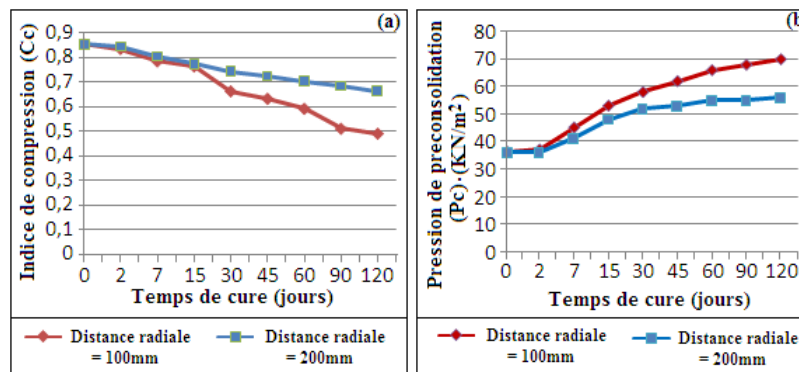
En absence des sulfates, Ouhadi et al. (2014) ont étudié l'effet de l'addition de différents teneurs en chaux (0, 2, 4, 6, 8 et 10%) sur les caractéristiques de compressibilité d'un sol argileux peu plastique (Fig. 2.22). Les résultats obtenus montrent que l'addition de 2% de chaux fait réduire l'indice de compression de l'ordre de 40%. De plus, l'indice de compression continue à diminuer jusqu'à 88% en présence de 6% de chaux. La réduction considérable de ce paramètre est attribuée aux réactions pouzzolaniques développées par l'interaction de la chaux avec les particules argileuses du sol traité tout en produisant de nouveaux composés cimentaires (CSH et CAH) résistants aux charges extérieures. En outre, la pression de préconsolidation augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de chaux utilisée.



**Fig. 2.22** — Effet de différentes teneur en chaux sur l'indice de compression et la pression de préconsolidation d'un sol argileux peu plastique, (Ouhadi et al., 2014).

Nalbantoglu and Tuncer (2001) ont étudié l'effet de différentes teneur en chaux (0 à 7 %) sur les caractéristiques de compressibilité d'un sol argileux gonflant de Chypre. Les résultats ont indiqué une augmentation de la contrainte verticale effective et une diminution des caractéristiques de compressibilité des sols traités avec l'augmentation de la teneur en chaux. Un comportement similaire a été observé par Indraratna (1996) où il a observé que l'indice des vides diminue avec l'augmentation du dosage en chaux. Ce changement est attribué à l'agrégation et la cimentation des particules des sols provoqués par l'action de chaux. D'après Rao and Shivananda (2005), l'indice de compression d'un sol argileux très plastique ( $I_p=46\%$ ) diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux utilisée. Un comportement similaire a été observé par Jha and Sivapullaiah (2015) où ils ont constaté que l'indice de compression diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux utilisée et de la période de cure.

Si les sulfates sont présents et pour une cure de 60 jours, la Figure 2.23 montre que l'indice de compression d'une argile marine traitée à la chaux en présence de 0.2% de sulfate de calcium et 1.8% de chlorure de calcium diminue de 0.85 à 0.49 tandis que, la pression de préconsolidation augmente de 36 à 70  $\text{KN/m}^2$  (Rajasekaran and Narasimha Rao, 2002).



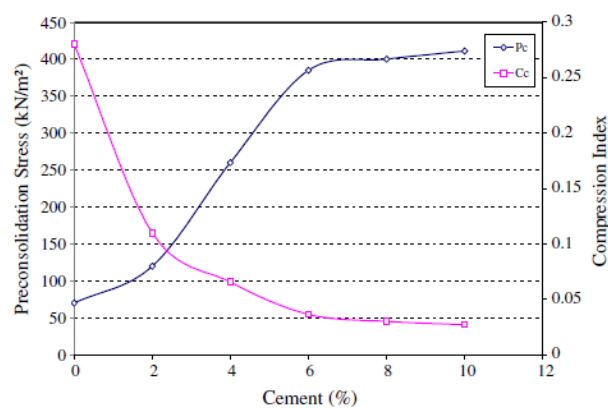
**Fig. 2.23** — Effet du sulfate de calcium et du chlorure de calcium sur les paramètres de compressibilité d'une argile marine traitée à la chaux, (a): indice de compression, (b): pression de préconsolidation, (Rajasekaran and Narasimha Rao, 2002).

Un comportement similaire a été constaté par Broms (1987). L'effet bénéfique apporté par la présence du sulfate de calcium est due à la diffusion effective des ions de calcium  $\text{Ca}^{2+}$  à l'intérieur de la matrice argileuse qui viennent de remplacer les ions de sodium  $\text{Na}^+$ .

Rajasekaran et Narasimha Rao (2002) ont constaté que le chlorure de calcium fait augmenter la pression de préconsolidation de 36 à 82  $\text{KN/m}^2$  et réduire l'indice de compression de 0.85 à 0.42. Cependant, après 10 jours de cure, le sulfate de sodium ne produit qu'une faible diminution de l'indice de compression (de 0.7 à 0.8). Tandis que la pression de préconsolidation augmente de 36 à 48  $\text{KN/m}^2$  puis elle diminue jusqu'à 45  $\text{KN/m}^2$  en présence du sulfate de sodium. L'augmentation de la pression de préconsolidation est liée à la formation des phases cimentaires et également la formation d'une phase expansive (ettringite). Plusieurs travaux de recherches ont confirmé que l'ettringite peut se former dans un sol traité à la chaux en présence des sulfates (Hunter, 1988; Rollings et al., 1999; Yong and Ouhadi, 2007; Le Borgne, 2010; Aldaood et al., 2014a).

### 2.6.2 Effet du ciment

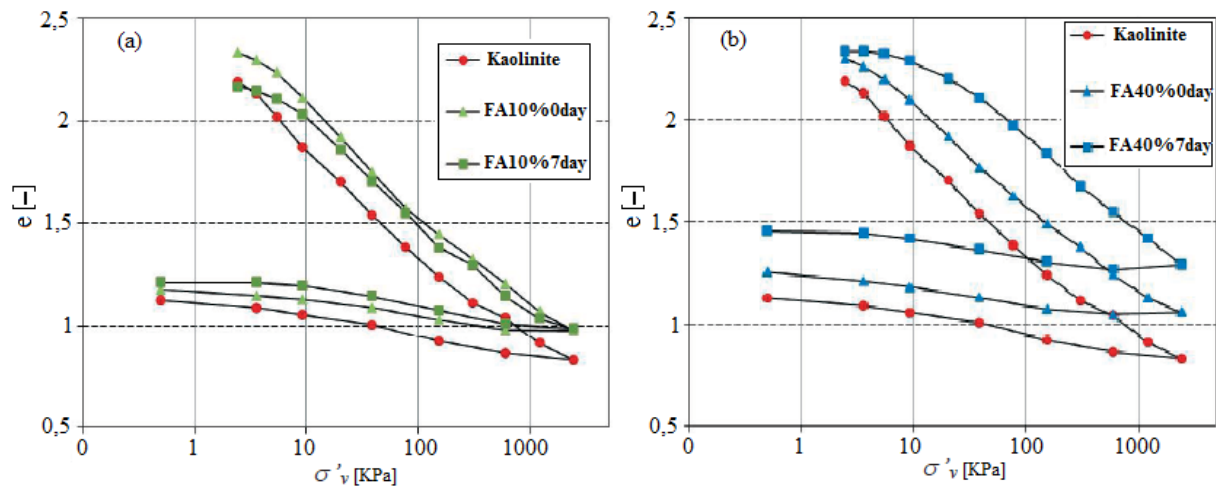
Ouhadi et al. (2014) ont étudié l'effet de l'addition de différents teneurs en ciment (0-10%) sur les caractéristiques de compressibilité d'un sol argileux peu plastique (Fig. 2.24). Les résultats obtenus montrent que l'indice de compression diminue avec l'augmentation du dosage en ciment utilisé. La réduction considérable de cet indice est liée aux réactions pouzzolaniques développées par l'utilisation du ciment permettant l'émergence de nouvelles phases cimentaires (CSH et CAH) qui résistent aux charges extérieures. Cependant, la pression de préconsolidation augmente significativement avec l'augmentation de la quantité de ciment utilisée. D'ailleurs, Ho and Chan (2011) ont montré que l'indice de compression d'un sol mou limoneux diminue avec l'augmentation du dosage en ciment additionné et de la période de cure. Un comportement similaire a été observé par Eskisar (2015).



**Fig. 2.24** — Effet de différents teneurs en ciment (CEM II) sur l'indice de compression et la pression de préconsolidation d'un sol argileux peu plastique, (Ouhadi et al., 2014).

### 2.6.3 Effet des cendres volantes

Knapik et al. (2014) ont effectué des tests œdométriques pour étudier l'effet de 10 et 40% de cendres volantes sur la compressibilité d'une kaolinite après 0 et 7 jours de cure. Les résultats obtenus sont tracés en termes de l'indice des vides «  $e$  » et de contrainte verticale «  $\sigma'_v$  » (Fig. 2.25). Il est noté que l'addition de cendres volantes conduit à augmenter l'indice des vides après 0 et 7 jours de cure. De plus, la compressibilité du sol traité diminue avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes. Un comportement similaire a été observé par Indraratna (1996). Ainsi, le rôle important du temps de cure peut être observé pour les mélanges de sol et de cendres volantes en quantité de 40% (Fig. 2.25b). La diminution de la compressibilité du sol traité avec la période de cure est probablement due aux effets des composés de cimentation (C-S-H et C-A-H) qui sont le résultat des réactions pouzzolaniques favorisées par un environnement fortement alcalin.



**Fig. 2.25** — Effet de différentes teneurs en cendres volantes sur la compressibilité d'une kaolinite, (Knapik et al., 2014).

### 2.6.4 Effet du laitier de haut fourneau

Indraratna (1996) a étudié l'effet de différents pourcentages (2, 5, 7 et 10%) de laitier (contenant 42 à 46% de CaO) sur la compressibilité d'une argile peu plastique après 28 jours de cure (Fig. 2.26). Ils ont démontré que l'argile traitée devient moins compressible avec l'augmentation de la teneur en laitier additionné. L'addition du laitier broyé à l'argile naturelle fait réduire également l'indice des vides des échantillons mélangés, sauf au niveau de 10% lorsque la phase d'hydratation devient significative. Cette réduction de l'indice des vides a des conséquences désirables pour la perméabilité qui en résulte.



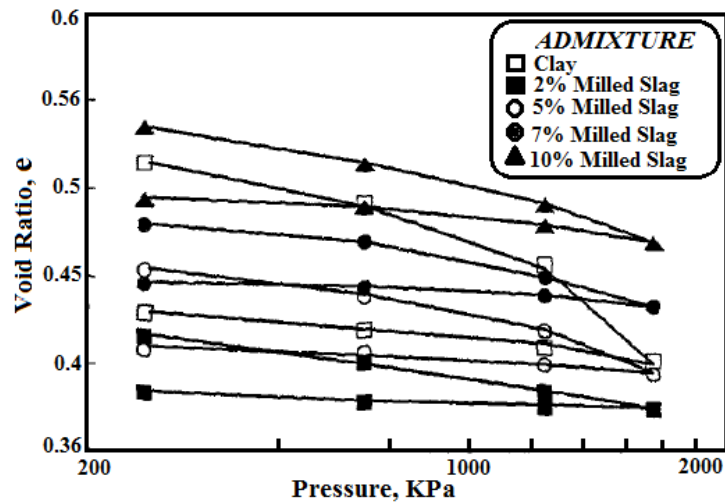


Fig. 2.26 — Effet de différents pourcentages du laitier sur la compressibilité d'une argile peu plastique après 28 jours de cure, (Indraratna, 1996).

### 2.6.5 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes

Knapik et al. (2014) ont étudié l'effet apporté par la combinaison de 10% de cendres volantes et de 1% de chaux sur la compressibilité d'une kaolinite après 0 et 7 jours de cure. Les résultats obtenus sont représentés en termes de l'indice des vides « e » et de contrainte verticale «  $\sigma'_v$  » (Fig. 2.27). Ils ont trouvé que l'addition de 10% de cendres volantes en combinaison avec 1% de chaux fait conduire à la diminution de la compressibilité du sol traité où sa réduction est considérablement importante après 7 jours de cure. Cela est probablement dû aux effets des composés cimentaires formés suite à des réactions pouzzolaniques favorisées par les ions calcium apportés par l'addition de la chaux. Un comportement similaire a été obtenu par Nalbantoglu and Tuncer (2001).

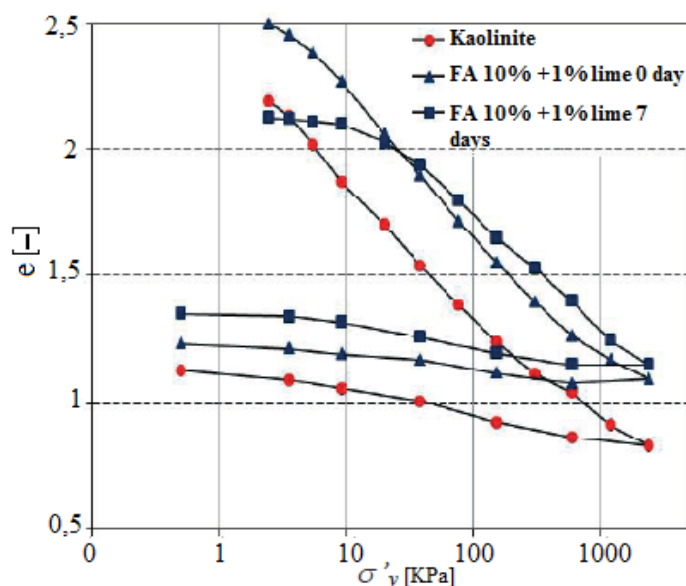


Fig. 2.27 — Effet de la combinaison de la chaux et des cendres volantes sur la compressibilité d'une kaolinite, (Knapik et al., 2014).

## 2.7 Effet des ajouts cimentaires sur le gonflement

### 2.7.1 Effet de la chaux

L'étude réalisée par Al-Mukhtar et al. (2012) sur une argile gonflante (famille des smectites) a révélé que l'addition de différents pourcentages de chaux en absence des sulfates fait diminuer considérablement sa pression de gonflement, particulièrement, à long terme (Tableau 2.12). La réduction de la pression de gonflement peut être attribuée à la cimentation des particules argileuses par la formation des hydrates cimentaires suite aux réactions pouzzolaniques qui se produisent entre le calcium apporté par la chaux et l'alumine et la silice contenant dans le sol après leur dissolution dans un pH élevé (Bell, 1996). De plus, Puppala et al. (2005) ont constaté que le gonflement d'une kaolinite traitée à la chaux diminue de 25% jusqu'à 23 et 20% en présence de 4 et 8% de chaux, respectivement. Un comportement similaire a été obtenu par Jha and Sivapullaiah (2015).

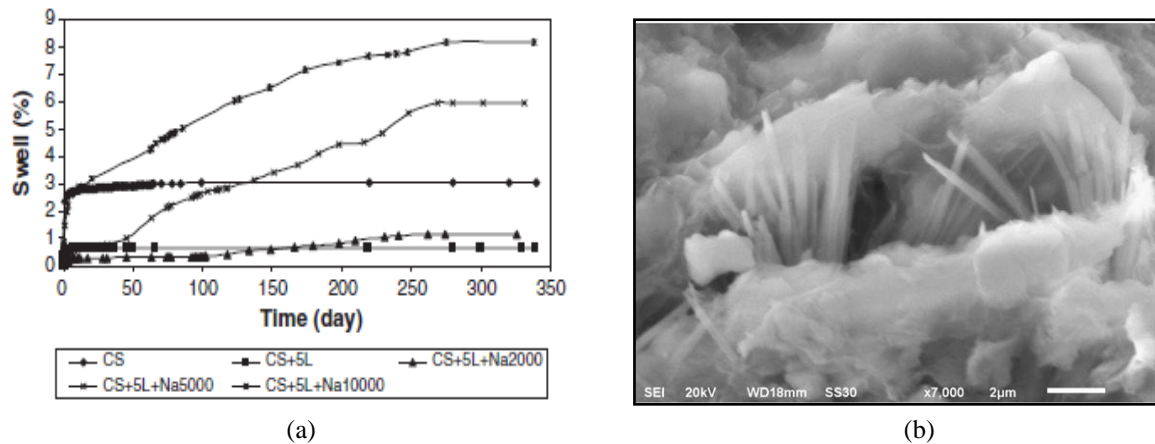
**Tableau 2.12** — Effet du dosage en chaux et de la période de cure sur la pression de gonflement d'une argile de la famille des smectites, (Al-Mukhtar et al., 2012).

| Dosage en chaux (%) | Pression de gonflement (KPa, $\pm$ 5KPa) |                |
|---------------------|--|----------------|
|                     | Après 7 jours                            | Après 90 jours |
| 0%                  | « 150 KPa sans cure »                    |                |
| 1%                  | 120                                      | 110            |
| 4%                  | 20                                       | 10             |
| 10%                 | 15                                       | 10             |

D'ailleurs, Afès and Didier (2000) ont étudié le potentiel de gonflement d'une argile traitée avec 3 et 6 % de chaux. Les résultats obtenus ont montré que le potentiel de gonflement diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur en chaux utilisée. Généralement, l'utilisation de la chaux comme additif peut réduire considérablement, ou voire de supprimer, le gonflement des sols argileux qui ont une grande aptitude à l'expansion à savoir la famille des smectites (montmorillonite).

En présence des sulfates, Yilmaz and Civelekoglu (2009) ont trouvé que le traitement d'une bentonite par l'addition du gypse fait diminuer son gonflement de 65% jusqu'à 30 et 18% en présence de 2.5 et 10% de gypse, respectivement. Kouloughli (2007) a rapporté que l'action des contaminants (ex: métaux lourds  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ , Cd, Mn, Ni) sur la composition chimique de la bentonite s'est traduite surtout par une augmentation de la teneur en  $\text{Ca}^{2+}$ . Cette augmentation, bien que très modeste, peut s'accompagner d'une dégradation des capacités de gonflement de la bentonite. Des variations dans les teneurs de Mg,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{CaCO}_3$  sont également apparues et peuvent être associés à un processus d'échange cationique entre la bentonite et les différents contaminants. De plus, Celik and Nalbantoglu (2013) ont

trouvé que pour une faible concentration de sulfate de sodium (2000 ppm), le gonflement d'un sol argileux traité avec l'addition de 5% de chaux diminue considérablement de 3% à 1% après une cure de 340 jours. Cependant, pour des fortes concentrations et pour une même période de cure, le gonflement augmente de 3% jusqu'à 6 et 9% en présence de 5000 et 10000 ppm, respectivement (Fig. 2.28a). Le gonflement marqué dans les éprouvettes de sol stabilisées à la chaux en présence de fortes concentrations en sulfate de sodium est due à la formation d'ettringite expansive (Fig. 2.28b).



**Fig. 2.28** — (a): Effet du sulfate de sodium sur le gonflement d'un sol argileux très plastique traité à 5% de chaux, (b): formation d'ettringite dans l'éprouvette de sol stabilisée à la chaux en présence de 10000 ppm de sulfate de sodium, (Celik and Nalbantoglu, 2013).

De plus, Harris et al. (2005) ont montré que le traitement à la chaux d'un sol diminue les gonflements volumiques (0 ppm + 6% lime). Mais si le gypse est ajouté en faible concentration avec la chaux le gonflement diminue considérablement (3K ppm + 6% lime), au contraire, si le dosage en gypse ajouté avec la chaux est important, la diminution du gonflement est très faible. Ces résultats confirment qu'un traitement à la chaux en présence d'un fort dosage en gypse empêche la diminution ou la suppression du gonflement. Alors, les échecs du traitement dépendent non seulement de la présence du gypse et sa concentration mais aussi du type du liant utilisé dans le traitement.

En général, les composés soufrés participant au phénomène de gonflement peuvent se présenter sous forme de gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) ou de pyrite ( $\text{FeS}_2$ ). Les sulfates solubles ou solubilisés sont en provenance de la dissolution de ces derniers. Ces composés soufrés peuvent se former sous certaines conditions et en créant des dommages extrêmement importants sur des ouvrages en terre traités à la chaux et/ou aux liants hydrauliques (Hunter, 1988; Ouhadi and Yong, 2008; Baryla et al., 2000). Les dommages créés peuvent être observés sous forme de fissures et des gonflements liés principalement à la formation de nouvelles phases expansives telles que l'ettringite et la thaumasite. Yong and Ouhadi (2007)

ont indiqué que la stabilisation de la marne (Palygorskite,  $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) avec l'addition de la chaux est l'exemple des réactions chimiques conduisant à la formation de nouvelles phases expansives (l'ettringite et/ou la thaumasite) suivant la chaîne des réactions chimiques suivantes:

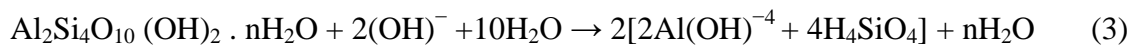
- Hydratation de la chaux vive au contact de l'eau (Eq. 1):



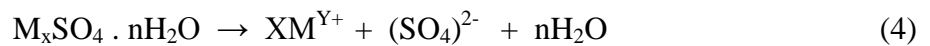
- Ionisation de la chaux éteinte et l'augmentation du pH à 12.5 (Eq. 2):



- Dissolution des minéraux argileux dans un pH supérieur à 10.5 (Eq. 3):

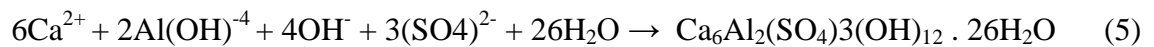


- Dissolution des sulfates dans les sols ou déjà solubles dans l'eau de nappe (Eq. 4) :

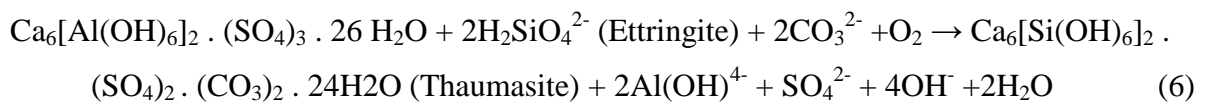


Tel que :  $x = 1$ ;  $y = 2$  ou  $x = 2$ ;  $y = 1$  (M: éléments chimiques mono et divalents).

- Formation d'ettringite (Eq. 5):



Les minéraux d'ettringite peuvent croître tant que la température reste au dessus de 15°C. En dessous, l'ettringite se transforme en thaumasite (Eq. 6). Ce changement s'effectue par substitution de l'aluminium par du silicium, et du sulfate par du carbonate (Le Borgne, 2010).



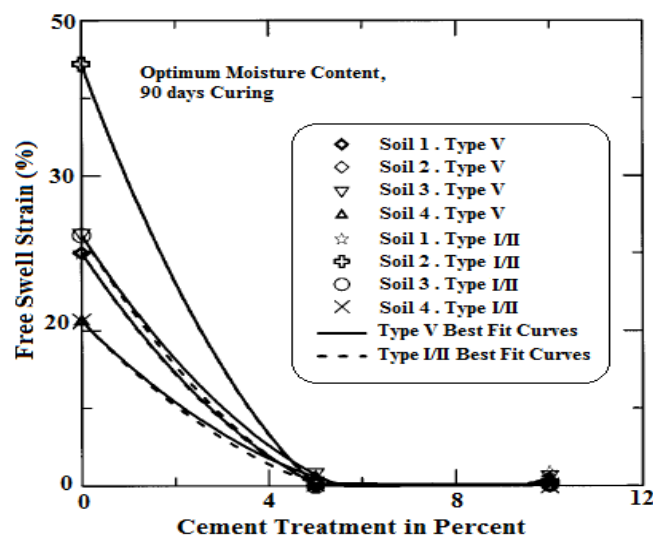
La formation d'ettringite ou de thaumasite va provoquer un gonflement qui peut être lié à la variation volumique globale ou de l'enveloppe qui accompagne la cristallisation de l'ettringite ou de la thaumasite. Le volume de l'enveloppe de ces derniers est plus grand que le volume de l'enveloppe des réactifs initiaux. La pression créée peut atteindre des valeurs supérieures à la résistance en traction des sols traités, à titre d'exemple 240MPa (Le Borgne, 2010).

### 2.7.2 Effet du ciment

Puppala et al. (2004) ont étudié l'efficacité des ciments résistants aux sulfates (types I/II et V) sur le potentiel de gonflement de quatre sols argileux très plastiques et riches en sulfates à savoir: Sol1, Sol2, Sol3 et Sol4 contenant respectivement des teneurs en sulfate soluble de 287, 1490, 5688 et 32122 ppm. Les résultats obtenus ont montré que les deux types de ciment

utilisés ont fait améliorer les propriétés physiques des sols traités en réduisant leur potentiel de gonflement libre (Fig. 2.29). En effet, pour 5% de ciment, le potentiel de gonflement est devenu nul après 90 jours de cure. De plus, Les résultats de DRX ont confirmé la diminution du potentiel de gonflement qui est attribué à trois mécanismes possibles à savoir:

- les faibles niveaux d'intensités de l'ettringite minérale observée sur les diagrammes expliquent clairement le faible gonflement des sols traités ;
- les oxydes de fer présentant dans les deux types de ciments utilisés produisent des types d'ettringite minérale de faible gonflement dans les sols traités ;
- la distribution des vides et la conductivité hydraulique des sols argileux traités diminuent avec l'utilisation de ces deux types de ciments comme additifs.



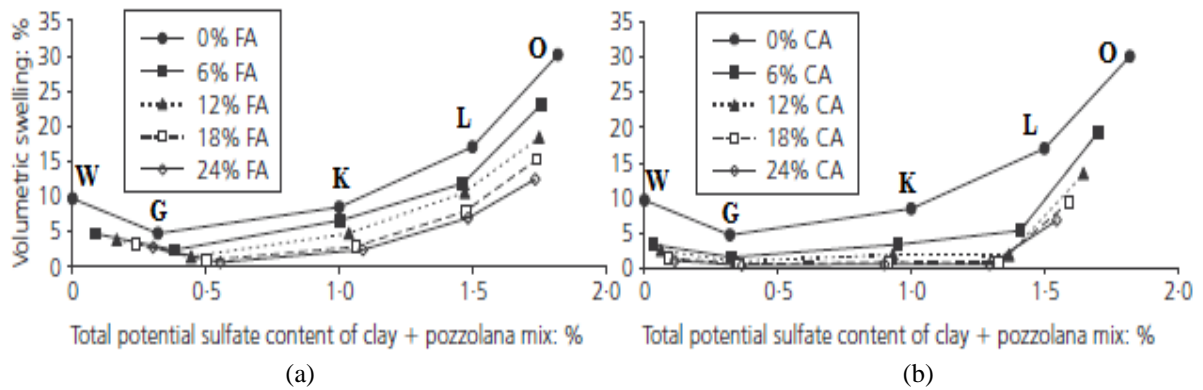
**Fig. 2.29** — Effet de différents dosages en ciment sur le potentiel de gonflement de quatre sols argileux très plastiques contenant différentes teneurs en sulfate soluble après 90 jours de cure, (Puppala et al., 2004).

### 2.7.3 Effet de la combinaison chaux/cendres volantes

McCarthy et al. 2012 ont étudié l'influence des cendres volantes sur le gonflement de cinq différentes argiles contenant de différentes proportions de sulfate total à savoir: Weald (0.0 g), Gault (0.3 g), Kimmeridge (0,9 g), Lias (1.1 g) et Oxford (3.4 g) (Fig. 2.30). Ces argiles ont été prétraitées par l'addition de 3% de chaux vive (en masse de sol sec) pendant un jour de cure et suivi par un traitement avec l'addition de 6, 12,18 et 24% deux cendres volantes possédant des caractéristiques différentes.

Les résultats obtenus ont montré que le gonflement des argiles testées augmente avec le contenu total de sulfate dans les mélanges stabilisés et diminue avec l'augmentation du dosage en cendres volantes et de leur finesse. Cependant, la diminution du gonflement avec l'augmentation de la teneur en CA additionnée est attribué à un phénomène essentiellement

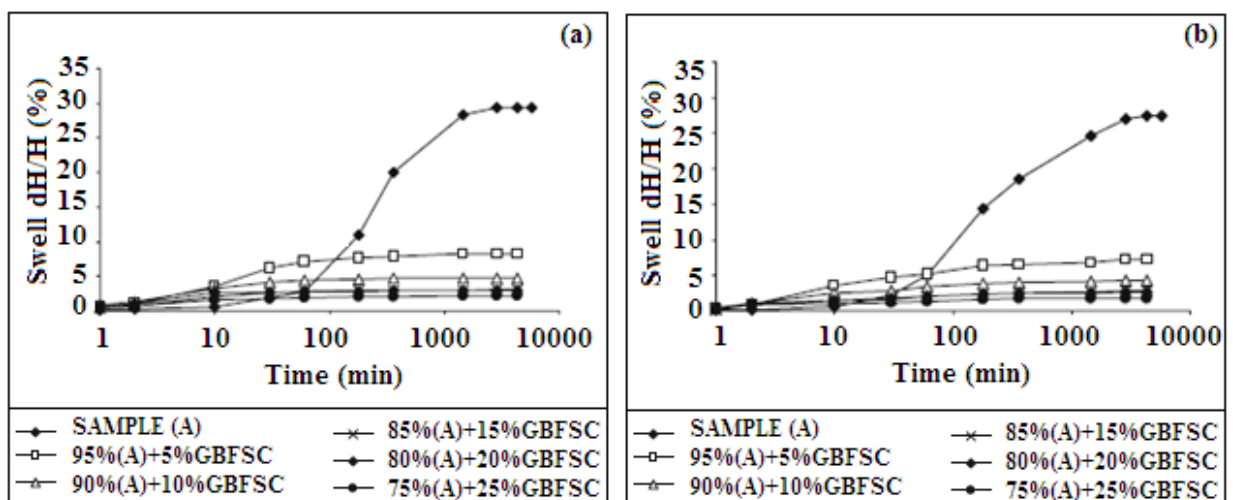
physique associé à une augmentation du volume des pores dans le système ce qui permet de recevoir des produits de sulfates hautement expansifs tout en augmentant la résistance au gonflement de la structure stabilisée.



**Fig. 2.30** — Gonflement des échantillons traités avec 3% de chaux (1 jour de cure) et différents pourcentages de FA (fine) et de CA (grossière) pour 3 jours de cure, suivis de 7 jours d'immersion dans l'eau à 40°C (argiles testées: Weald (W), Gault (G), Kimmeridge (K), Lias (L) et Oxford (O)), (McCarthy et al., 2012).

#### 2.7.4 Effet de la combinaison ciment/laitier

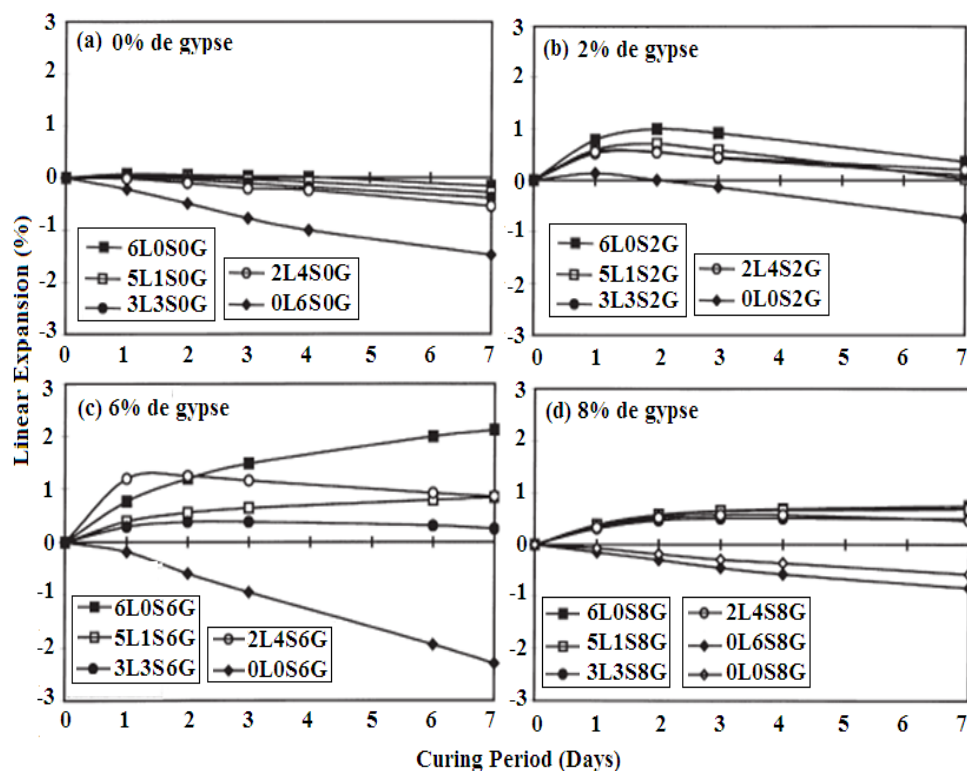
Cokca et al. (2010) ont testé le gonflement d'un sol argileux contenant 85% de kaolinite et 15% de bentonite-Na, le sol a été traité par la combinaison laitier-ciment portland (GBFSC) pour deux périodes de cure. Les résultats obtenus ont mis en évidence l'effet positif apporté par ce type de traitement sur le gonflement de cette argile, à savoir que celui-ci est quatre fois plus petit par rapport au sol non traité. En effet, plus le rapport GBFS/C est important, plus le gonflement diminue. Le temps de cure n'a pas un effet sur le gonflement (Fig. 2.31).



**Fig. 2.31** — Effet de la combinaison du laitier-ciment portland sur le gonflement d'un sol argileux pour deux périodes de cure, (a): 7 jours, (b): 28 jours, (Cokca et al., 2010).

### 2.7.5 Effet de la combinaison chaux/laitier

Wild et al. (1998) ont étudié l'effet de la substitution progressive de la chaux éteinte par le laitier (GGBS) en présence du gypse (0, 2, 6 et 8%) pendant 7 jours de cure (Fig. 2.32). Les résultats obtenus ont montré que le traitement au laitier seul provoque un retrait important de la kaolinite. Alors que, la stabilisation par la combinaison de la chaux et du laitier en absence du gypse n'induit ni un gonflement ni un retrait de celui-ci. La présence du gypse dans le traitement par la combinaison chaux-laitier engendre un gonflement du sol traité, mais ce gonflement diminue avec l'augmentation progressive du rapport «laitier/chaux». Le gypse seul provoque un retrait considérable du sol traité, ce retrait augmente progressivement avec le dosage en gypse jusqu'à un optimum qui correspond à 6% de gypse, puis il décroît. Donc l'expansion de la kaolinite traitée diminue si on substitue progressivement la chaux par le laitier (GGBS) malgré l'augmentation de la quantité des sulfates. L'expansion durant la cure augmente avec l'augmentation du dosage en chaux.



**Fig. 2.32** — Effet du gypse sur le gonflement linéaire d'une kaolinite traitée par la substitution progressive de la chaux par le laitier (GGBS), (Wild et al., 1998).

D'après Celik and Nalbantoglu (2013), le gonflement d'un sol argileux traité avec la combinaison de 5% de chaux et 6% de laitier (GGBS) en présence de différentes concentrations du sulfate de sodium (2000 ppm) est pratiquement nul. De plus, le traitement combiné chaux/laitier en présence d'un sulfate de sodium a fait éliminer significativement le

gonflement du sol stabilisé mieux que l'utilisation de la chaux seule à savoir que pour les deux types de traitement, le gonflement augmente avec l'augmentation de la concentration en sulfate de sodium.

## 2.8 Conclusion

À partir de la revue bibliographique effectuée, plusieurs travaux de recherche ont été entrepris dont le but d'étudier l'influence des éléments perturbateurs (principalement les sulfates) sur le traitement des sols fins en utilisant des ajouts cimentaires seuls ou combinés (ciment, chaux, laitier, pouzzolane naturelle, cendres volantes, fumée de silice... etc.). Cela nous a permis de comprendre d'une part le mécanisme de la perturbation d'un traitement à savoir que l'échec de traitement observé sur chantier dépend non seulement de la présence des éléments perturbateurs mais aussi:

- de la nature du sol ;
- de la nature du liant ;
- du dosage en liant ;
- de la nature chimique de l'élément potentiellement perturbateur ;
- des propriétés physiques de cet élément perturbateur ;
- de la concentration en élément perturbateur ;
- de la nature de l'eau en présence ;
- des conditions de cure (température, humidité).

Par conséquent, l'effet des sulfates sur le traitement des sols argileux par la combinaison chaux/pouzzolane n'a pas été étudié. Dans le chapitre suivant, une étude expérimentale sera entreprise en vue d'étudier l'effet d'un sulfate monovalent ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et divalent ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) sur le comportement physico-mécanique de deux sols argileux à savoir les limites d'Atterberg, la résistance à la compression non confinée et la résistance au cisaillement des sols fins argileux stabilisés en utilisant des additifs (chaux, pouzzolane naturelle et leur combinaison). L'analyse minéralogique et microstructurale des sols sélectionnés avant et après traitement sera aussi effectuée.