

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 5

---

## **Effet des Sulfates sur la Résistance à la Compression non Confinée**

- 5.1. *Introduction***
- 5.2. *Résistance à la compression des sols traités sans sulfates***
- 5.3. *Résistance à la compression des sols traités avec sulfates***
- 5.4. *Mécanismes de stabilisation et d'altération de la résistance***
- 5.5. *Conclusion***

## 5.1 Introduction

L'utilisation des remblais dans le domaine de la construction (routes, plateformes aéroportuaires, plateformes des bâtiments...etc.) nécessite plus souvent une amélioration chimique (par des additifs minéraux) de leur résistance en vue d'augmenter la capacité portante et de minimiser, ou voire éliminer, les tassements et la compressibilité des sols à utiliser en tant que matériau de construction. Cependant, ces sols améliorés souffrent d'un grand problème qui est lié à la formation de nouvelles phases minérales extrêmement expansives comme l'ettringite favorisée par la présence des sulfates. Ce minéral d'ettringite peut intervenir plus souvent à très long terme pour détériorer la résistance des sols améliorés et par conséquent la stabilité de l'ouvrage. Dans ce chapitre, nous allons analyser, interpréter et comparer les résultats des effets apportés par l'utilisation de différents teneurs en sulfate monovalent (sulfate de sodium anhydre,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et divalent (sulfate de calcium hydraté,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) sur la résistance à la compression non confinée de deux sols argileux traités avec l'addition de différentes proportions de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison en fonction de la période de cure. De plus, des essais de diffraction par des rayons X (DRX) et de microscopie électronique à balayage (MEB) ont été effectués afin de faire une investigation concernant les différents changements apportés par les additifs et les sulfates utilisés sur la minéralogie et la microstructure des deux sols stabilisés.

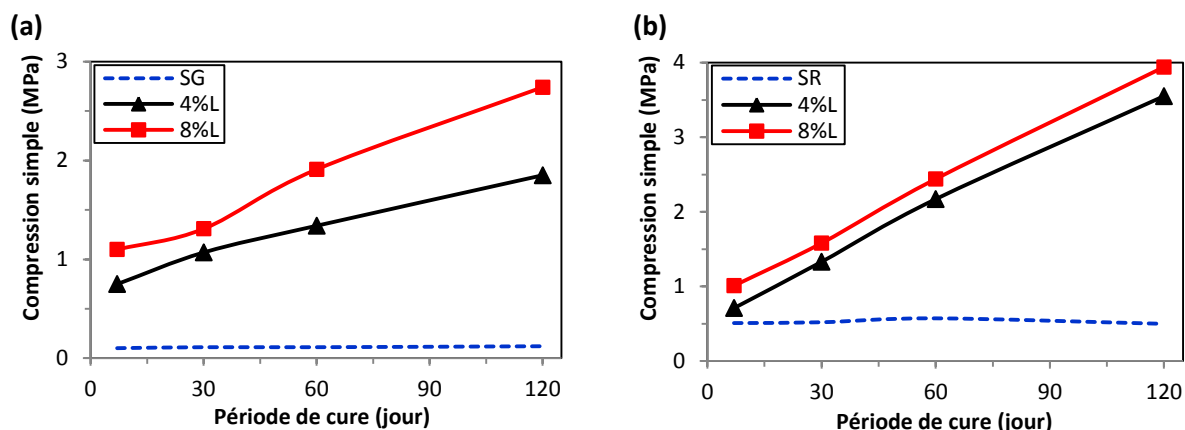
## 5.2 Résistance à la compression des sols traités sans sulfates

Les résultats de l'effet apporté par l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sur la résistance à la compression non confinée, la minéralogie et la microstructure des deux sols argileux stabilisés sans présence des sulfates sont présentés dans les Figures 5.1–5.8.

### 5.2.1 Effet de la chaux

Les résultats de l'effet apporté par l'addition de la chaux sur la résistance à la compression non confinée des deux sols argileux étudiés sont présentés sur la Figure 5.1. L'addition de la chaux en tant qu'additif fait augmenter la résistance à la compression des échantillons de deux sols argileux stabilisés. Ces résultats sont en parfaite concordance avec ceux obtenus par plusieurs chercheurs (Hossain et al., 2007; Ola, 1977; Rahman, 1986; George et al., 1992; Gay and Schad, 2000; Kavak et al., 2007; Manasseh and Olufemi, 2008; Harichane et al., 2012; Ouhadi et al., 2014). L'augmentation dans les valeurs de la résistance à la compression est attribuée à la réaction de la chaux avec les particules du sol argileux qui se traduit par la

formation d'agents cimentaires (C-S-H et C-A-H) dont le rôle est de faire cimenter les particules du sol traité entre elles (Croft, 1964; Harichane et al., 2012).



**Fig. 5.1** — Effet de différents pourcentages de chaux sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): SG, (b): SR.

D'ailleurs, des essais de diffraction par des rayons X (DRX) et de microscopie électronique à balayage (MEB) ont été effectués sur des échantillons de deux sols argileux stabilisés avec 8% de chaux après 60 jours de cure. De plus, nous avons effectué certains essais sur, seulement, les échantillons des deux sols conservés pour 60 jours de cure parce qu'ils correspondent au temps de cure qui, pour lequel les éprouvettes des deux sols stabilisés sont complètement altérées en présence des sulfates (les échantillons analysés sont seulement ceux qui contiennent 4% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). Ces essais (DRX et MEB) permettent de voir l'évolution et de suivre les changements éventuels de la minéralogie ainsi que la macro ou la microstructure apportés par les additifs additionnés aux deux sols traités. Les résultats obtenus relèvent qu'il y a un changement radical dans la minéralogie et de la microstructure des deux sols argileux stabilisés. En effet, des composés de C-S-H et C-A-H ont été observés dans les courbes diffractométriques de DRX (Figs. 5.2(h) et 5.3(h)) et également des modifications microstructurales ont été révélées par des images de MEB (Fig. 5.4).

En général, la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux additionnée et de la période de cure à savoir que les échantillons du SR développent des valeurs de résistance bien plus grandes que celles développées par le SG. Par exemple, le SG traité avec 8% de chaux fait développer une résistance à la compression de l'ordre de 2.7 MPa après 120 jours de cure qui est 27 fois plus grande que celle du sol non traité.

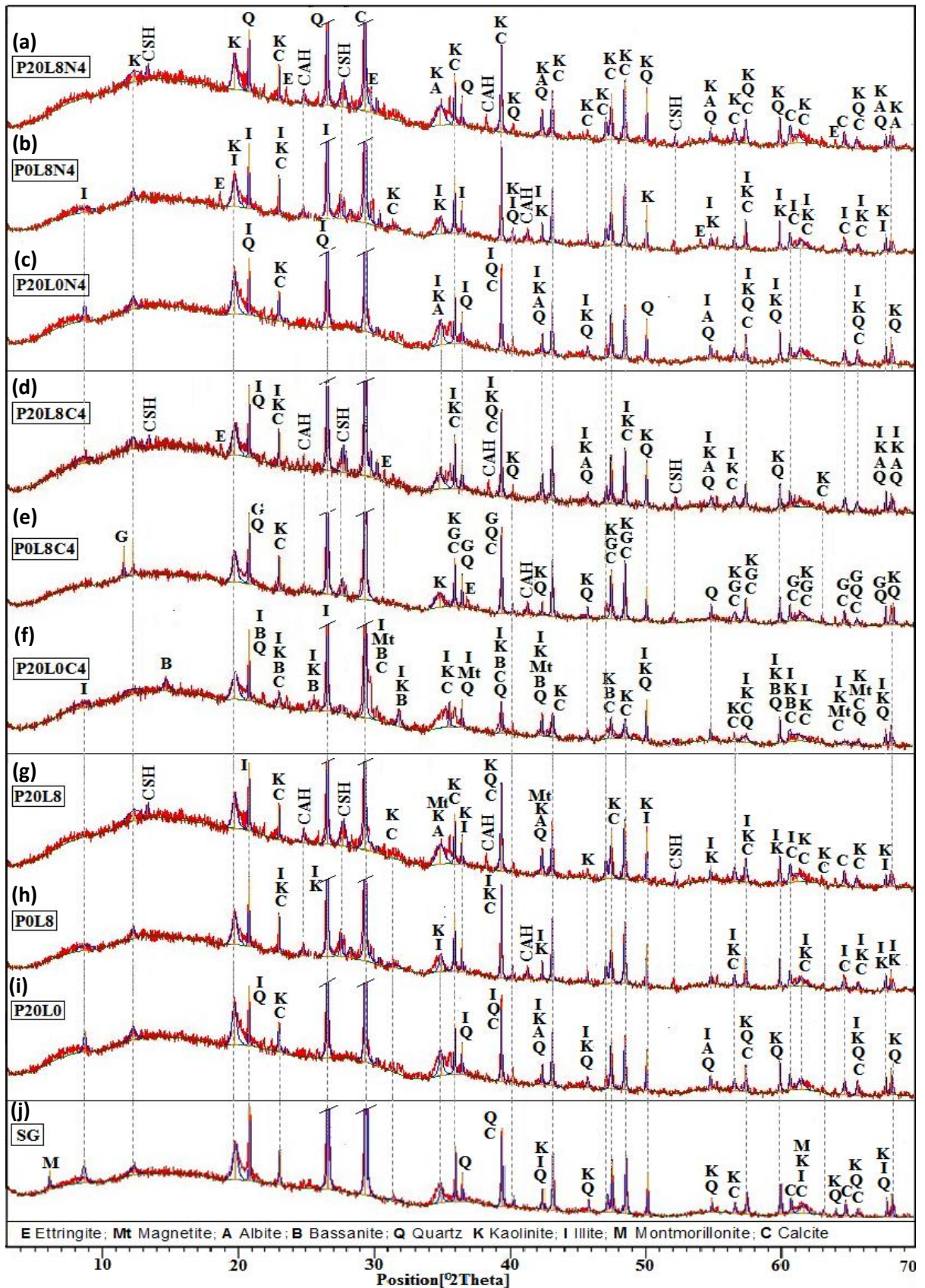
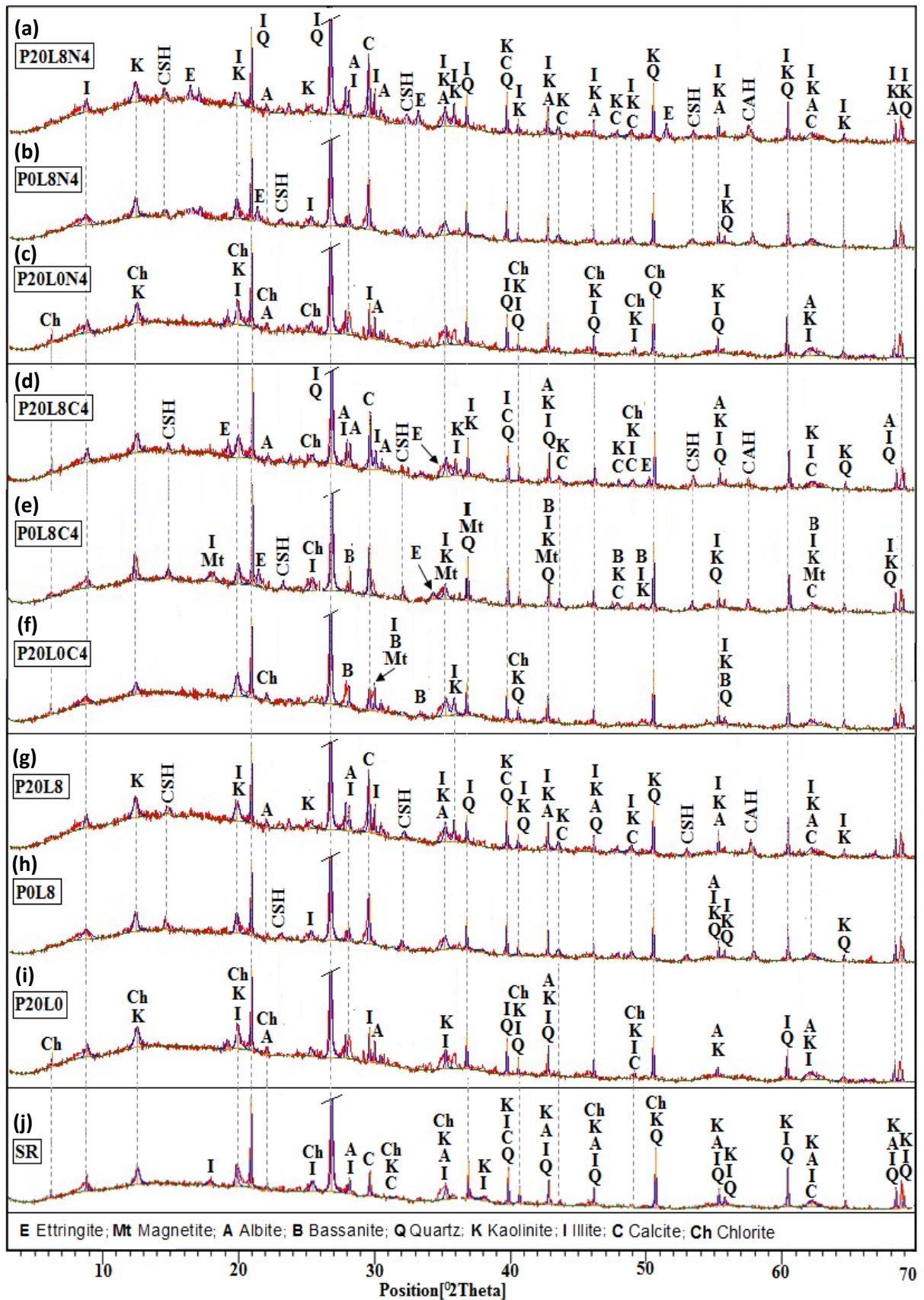
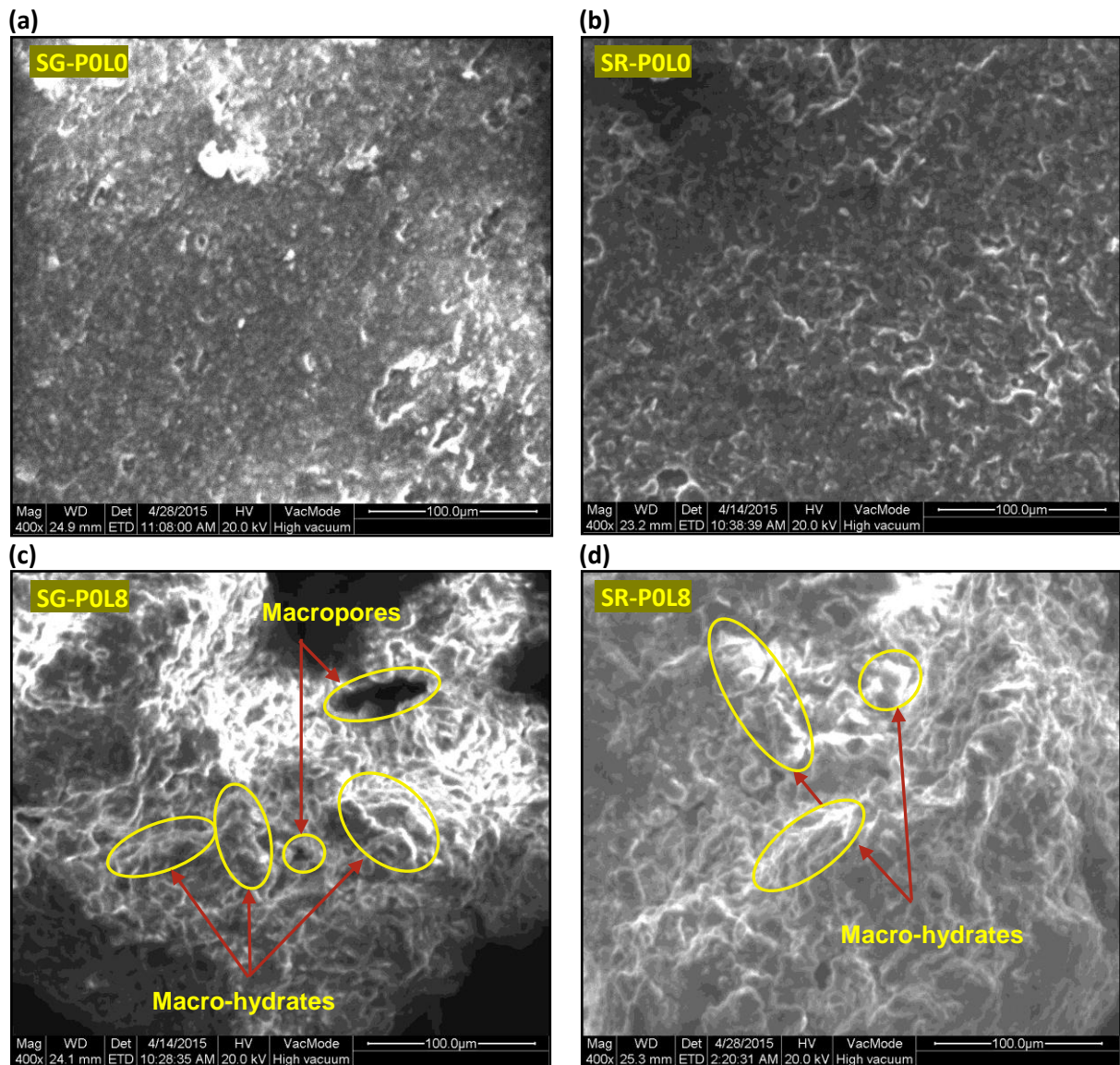


Fig. 5.2 — Courbes diffractométriques issus de diffraction par des rayons X (DRX) montrant les changements dans la minéralogie du SG stabilisé avec 8%L, 20%PN et 20%PN+8%L en présence ou non de 4% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  après 60 jours de cure.



**Fig. 5.3** — Courbes diffractométriques issues de diffraction par des rayons X (DRX) montrant les changements dans la minéralogie du SR stabilisé avec 8%L, 20%PN et 20%PN+8%L en présence ou non de 4% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  après 60 jours de cure.

En revanche, pour la même teneur en chaux et la même période de cure, le SR fait développer une résistance à la compression de l'ordre de 3.9 MPa qui est seulement 8 fois plus grande que celle du sol non traité. En outre, Asgari et al. (2015) ont rapporté que la résistance à la compression du sol obtenu à partir du Nord-Ouest de la ville d'Arak augmente avec la période de cure et de la teneur en chaux jusqu'à 3% alors qu'elle diminue au-delà de cette teneur. De plus, un comportement similaire a été observé par McCarthy et al. (2012).

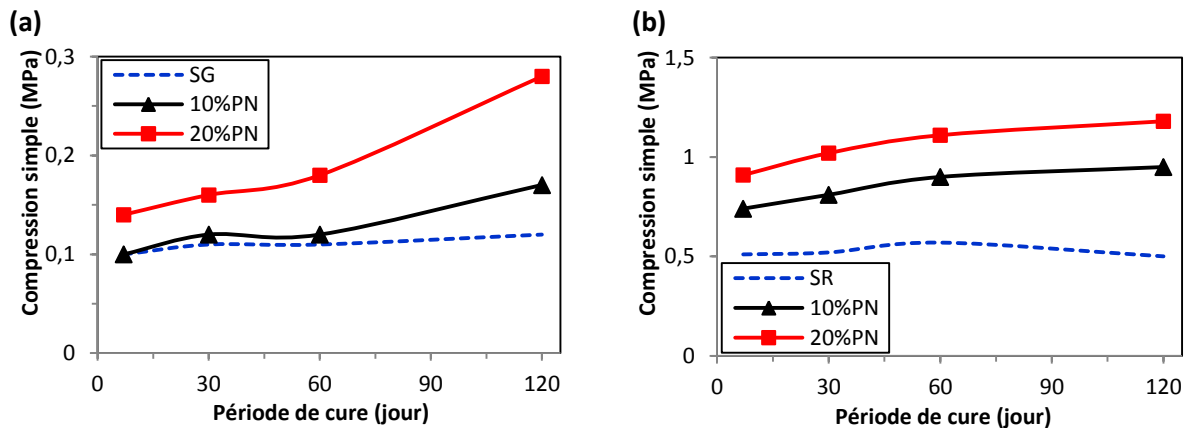


**Fig. 5.4** — Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure des deux sols argileux non traités et traités avec 8% de chaux en absence des sulfates après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR, (c): SG traité avec 8%L, (d): SR traité avec 8%L.

### 5.2.2 Effet de la PN

La Figure 5.5 présente les résultats de l'effet apporté par l'utilisation de la pouzzolane naturelle en tant que stabilisant sur la résistance à la compression non confinée des deux sols argileux étudiés. En général, la résistance à la compression des échantillons des deux sols

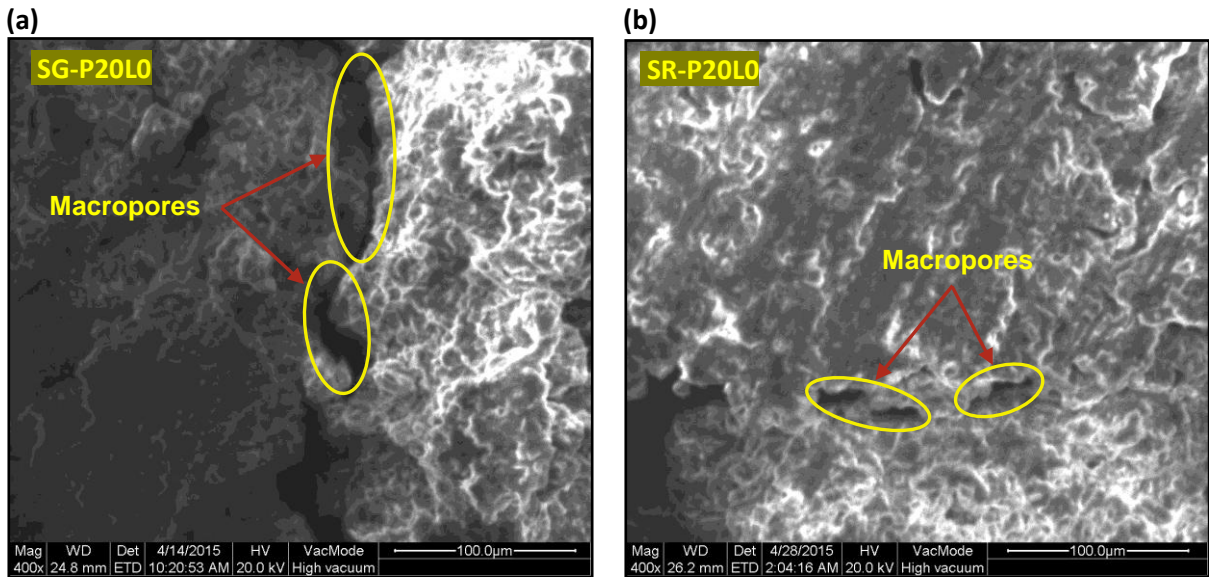
argileux traités augmente avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle additionnée et de la période de cure où les échantillons du SR développent des valeurs de résistance bien plus grandes que celles développées par le SG. Malgré cette augmentation, il n'y a pas d'influence notable sur la résistance à la compression lorsque la pouzzolane naturelle est utilisée seule en raison de sa faible réactivité avec les particules d'argile. Par conséquent, il n'est donc pas préférable d'utiliser la pouzzolane naturelle seule dans la stabilisation des sols argileux.



**Fig. 5.5** — Effet de différents pourcentages de pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): SG, (b): SR.

D'ailleurs, des essais de diffraction par des rayons X (DRX) et de microscopie électronique à balayage (MEB) ont été effectués sur des échantillons de deux sols argileux stabilisés avec 20% de pouzzolane naturelle après 60 jours de cure. Les résultats obtenus indiquent qu'il n'y a pas un changement dans la minéralogie des deux sols argileux stabilisés. C'est-à-dire la formation des composés de C-S-H et C-A-H n'a pas été observée (Figs. 5.2(i) et 5.3(i)). Cependant, un changement extrêmement remarquable dans la microstructure des deux sols argileux stabilisés a été révélé par les images de MEB. Nous assistons à l'apparition des macropores variant de 50 à 100 $\mu$ m pour le SG et de 10 à 20 $\mu$ m pour le SR. Ce comportement peut être attribué à la forte teneur et à la grande finesse de la pouzzolane naturelle additionnée en causant des retraites important qui se traduisent par des macropores tout en faisant affaiblir la macrostructure du sol stabilisé et par conséquent sa résistance à la compression (Fig. 5.6). Par comparaison, les différences dans les valeurs de la résistance à la compression entre la chaux et la pouzzolane naturelle sont plus prononcées avec le SR qu'avec le SG. Ce comportement est probablement due à la différence dans la composition minéralogique et ainsi dans l'indice de plasticité qui existe entre les deux sols argileux étudiés. Ces résultats sont en parfaite concordance avec ceux qui ont été trouvés par Harichane et al. (2012).

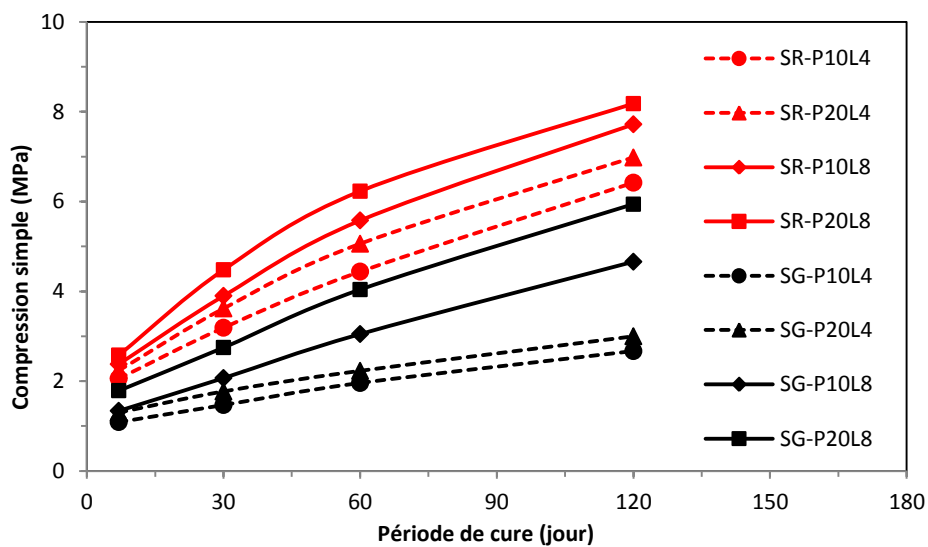




**Fig. 5.6** — Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure des deux sols argileux traités avec 20% de pouzzolane naturelle en absence des sulfates après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR.

### 5.2.3 Effet combiné de la Chaux-PN

Les changements dans la résistance à la compression apportés par l'utilisation de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en tant que stabilisant sur les deux sols argileux étudiés sont illustrés dans la Figure 5.7. En général, les meilleurs résultats de la résistance à la compression sont obtenus lorsque la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est utilisée. En effet, pour les deux sols argileux traités, la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux-pouzzolane naturelle et de la période de cure.



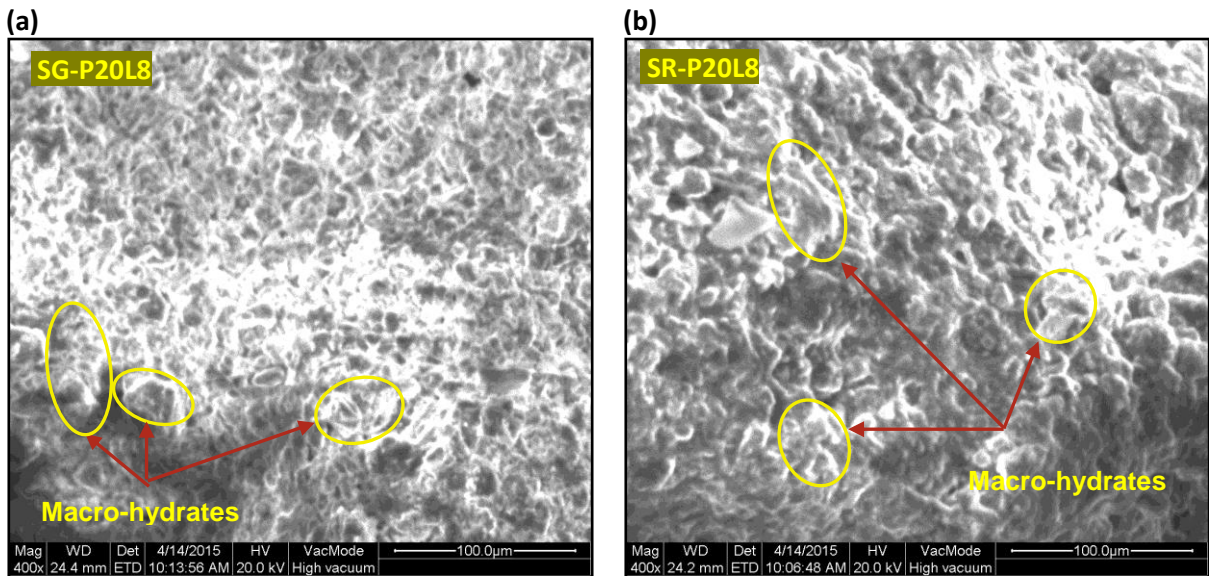
**Fig. 5.7** — Effet de différents pourcentages de chaux-pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression non confinée des deux sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure.

Par exemple, la résistance à la compression du SG stabilisé avec la combinaison de 20%PN+4%L passe de 0.1 MPa vers 1.3 et 3 MPa après 7 et 120 jours de cure, respectivement (Fig. 5.7). Pour un sol de classe similaire, McCarthy et al. (2012) ont révélé que la résistance à la compression du sol traité avec la combinaison de 18% de cendres volantes (FA) et de 3% de chaux passe de 0.4 MPa à 1 et 1.8 MPa après 7 et 90 jours de cure, respectivement. De plus, un comportement similaire pour un sol de même classe a été observé par Kumar et al. (2007). En revanche, Pour le cas du SR stabilisé avec la même combinaison 20%PN+4%L, la résistance à la compression augmente de 0.5 MPa jusqu'à 2.2 et 7 MPa après 7 et 120 jours de cure, respectivement (Fig. 5.7). Pour un sol de même classe, McCarthy et al. (2012) ont rapporté que la résistance à la compression du sol traité avec la combinaison de 18%FA+3%L passe de 0.4 MPa à 1.1 et 2.1 MPa au bout de 7 et 90 jours de cure, respectivement.

En effet, les teneurs croissantes de chaux-pouzzolane naturelle font développer des valeurs élevées de résistance à la compression. Il est à observer que pour 120 jours de cure, les échantillons des SG et SR stabilisés avec la combinaison de 20%PN+8%L montrent des augmentations respectives de l'ordre de 59 et 16 fois par rapport aux échantillons des deux sols non traités. D'ailleurs, Hossain et al. (2007) ont observé que les échantillons des sols naturels traités avec la combinaison de 10% de cendres volantes et de 4% de chaux représentent des augmentations respectives de l'ordre de 21 et 10 fois par rapport aux deux sols naturels non traités. Par comparaison, le traitement combiné de chaux-pouzzolane naturelle fait produire des résistances à la compression bien plus élevées que le traitement seul avec la pouzzolane naturelle ou la chaux. Par conséquent, il est déconseillé d'utiliser la pouzzolane naturelle seule en tant que additif dans la stabilisation des sols argileux. Toutefois, la résistance à la compression des deux sols argileux traités à la chaux peut être améliorée considérablement par l'addition entre 10 et 20% de pouzzolane naturelle. Les mêmes observations ont été rapportées par plusieurs chercheurs (Fontaine, 1984; Koliass et al., 2005; Kumar et al., 2007; McCarthy et al., 2014).

En effet, des essais de diffraction par des rayons X (DRX) et de microscopie électronique à balayage (MEB) ont été effectués sur des échantillons de deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de 20%PN+8%L après 60 jours de cure. Les résultats obtenus montrent qu'il y a un changement remarquable dans la minéralogie et la microstructure des deux sols argileux stabilisés. En effet, des composés de C-S-H et C-A-H ont été observés dans les courbes diffractométriques de DRX (Figs. 5.2(g) et 5.3(g)) et également des modifications microstructurales ont été révélées par des images de MEB (Fig. 5.8). Les images de MEB

effectuées sur les échantillons des deux sols traités avec la combinaison de 20%PN+8%L montrent la formation de grandes quantités de macro-hydrates par rapport aux échantillons des mêmes sols traités avec la chaux toute seule. Ceci explique les grandes différences dans les valeurs de la résistance à la compression entre ces deux types de traitement grâce à la grande quantité de silice apportées par l'addition de la pouzzolane naturelle.



**Fig. 5.8** — Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure des deux sols argileux traités avec la combinaison de 20%PN+8%L en absence des sulfates après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR.

Le traitement efficace obtenu suite à l'utilisation de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est attribué aux propriétés pouzzolaniques du mélange Sol-Chaux-PN où l'apport de silice apporté par la pouzzolane naturelle contribue dans les réactions pouzzolaniques pour former plus de composés cimentaires responsable sur la cimentation des particules des deux sols les uns aux autres et par conséquent la résistance à la compression (Harichane et al., 2011b). Il est à conclure que les pouzzolanes naturelles riches en silice réactive peuvent être utilisées avec des teneurs de 10 et 20% en tant que substituant pour les sols présentant des faibles teneurs en silice réactive. La pouzzolane naturelle peut être donc considérée comme une source de silice pour les réactions pouzzolaniques.

### 5.3 Résistance à la compression des sols traités avec sulfates

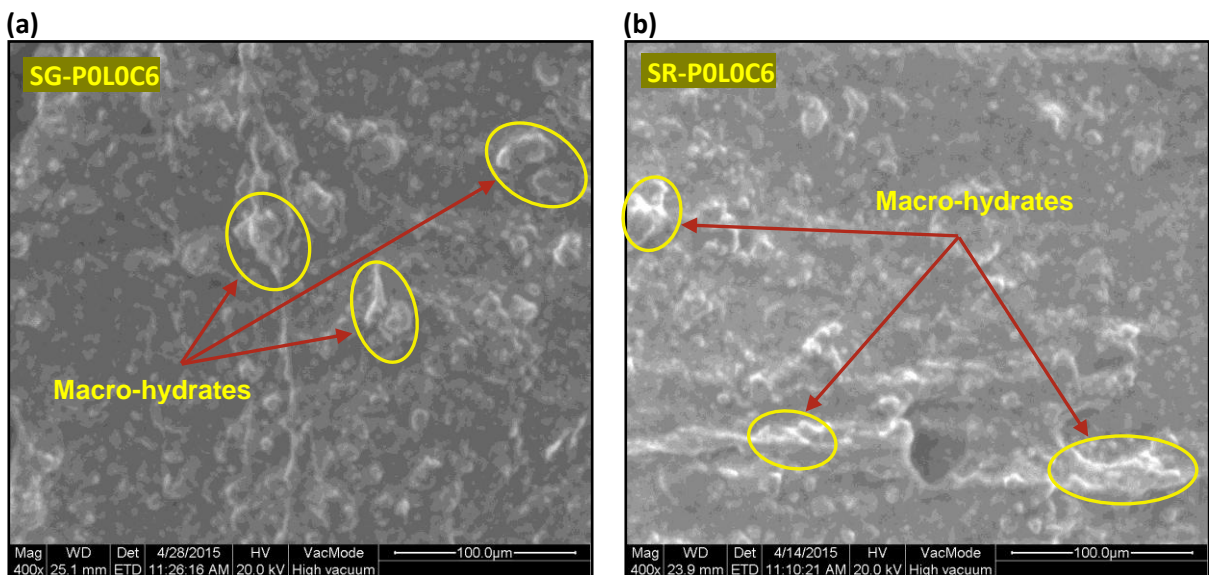
#### 5.3.1 Effet du $\text{CaSO}_4$ sur la compression simple

Les résultats de l'effet apporté par le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sur la résistance à la compression non confinée, la minéralogie et la microstructure des deux sols argileux stabilisés avec l'addition

de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont présentés dans les Figures 5.9–5.13.

### 5.3.1.1 Cas du traitement à la chaux

Avant de présenter les résultats des deux sols argileux traités à la chaux, il est à noter que la présence seule du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  fait importer un effet bénéfique sur la résistance à la compression des deux sols argileux étudiés. En effet, les valeurs de la résistance à la compression développées par les échantillons des deux sols argileux perturbés seulement avec du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sont bien plus grandes que celles développées par ceux des sols non traités. D'ailleurs, Yilmaz and Civelekoglu (2009) ont observé que la résistance à la compression d'une bentonite stabilisée avec l'addition du gypse augmente de 58,7 KPa jusqu'à 73,1 et 79,6 KPa en présence de 2,5 et 7,5 du gypse, respectivement. L'augmentation des valeurs de la résistance à la compression des échantillons des deux sols argileux non traités avec l'augmentation de la teneur en gypse additionnée est probablement due à l'augmentation de la compacité grâce aux particules plus fine du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Aldood et al., 2014a). La formation de composés cimentaires dans les échantillons de deux sols argileux conservés pendant 60 jours de cure et perturbés seulement avec 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  a été clairement observée sur les images de MEB (Fig. 5.9).

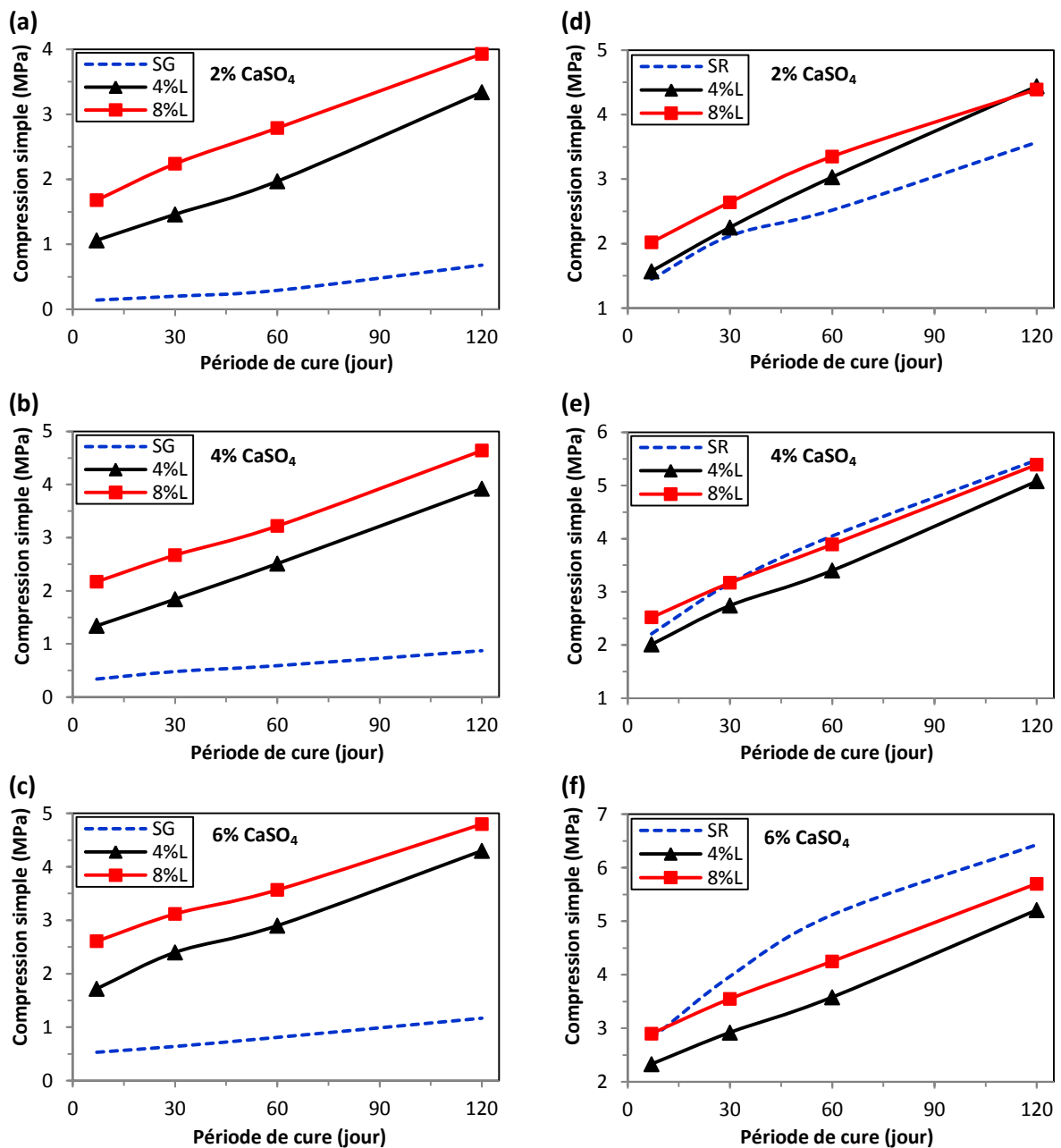


**Fig. 5.9** — Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure des deux sols argileux perturbé seulement avec 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR.

Les résultats de l'effet apporté par le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sur la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux sont présentés dans la Figure 5.10. L'utilisation de la chaux seule en présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  fait augmenter la résistance à la

compression des échantillons de deux sols argileux stabilisés. Il est admis que la présence du gypse fait accélérer les réactions chimiques entre le sol et la chaux pour former de l'ettringite par la réaction entre les ions sulfate et les composés de cimentation. D'après Segui et al. (2013), avec la combinaison de 2% de chaux avec 6% du liant hydraulique routier, le sol argileux traité a développé des valeurs de la résistance à la compression de 0.7 et 4.6 MPa au bout de 3 et 90 jours de cure, respectivement.

Pour une faible teneur de  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (2%), les deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux seule présente une augmentation acceptable de la résistance à la compression dont elle augmente aussi bien avec la période de cure (Fig. 10(a, d)).



**Fig. 5.10** — Effet de différentes teneurs en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés à la chaux pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

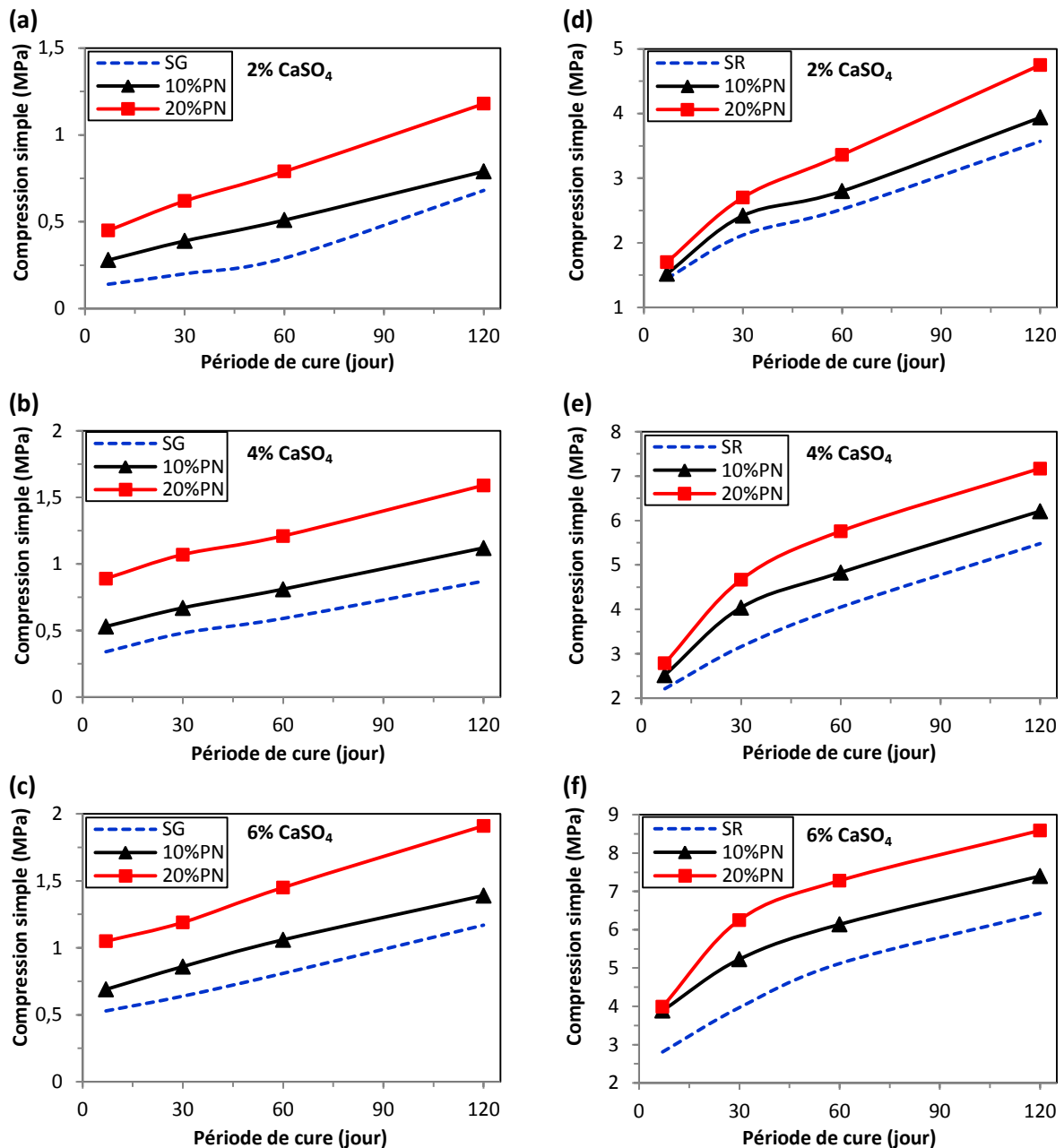
De plus, la résistance à la compression des mêmes sols argileux stabilisés augmente avec la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Hunter (1988) a indiqué que les ions d'hydroxyle  $\text{OH}^-$  retenus des réactions d'hydratation se combinent avec la chaux pour former des composés d'aluminium dont ils rentrent en réaction avec les sulfates pour former l'ettringite minérale. Cependant, il y a une légère différence entre les valeurs de la résistance à la compression des échantillons de deux sols argileux stabilisés à la chaux en présence de 4 et 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Ce comportement est attribué à la teneur excessive du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  dont il n'a pas réagi avec de la chaux ce qui est la cause de la légère augmentation de la résistance à la compression notamment à long terme. Les résultats de la minéralogie issus des essais de DRX effectués sur des échantillons de deux sols traités à la chaux en présence de 4% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  après 60 jours de cure sont présentés dans les Figures 5.2(e) et 5.3(e). Les analyses de DRX obtenues montrent la formation de nouveaux composés cimentaires (C-S-H et C-A-H) et de l'ettringite minérale.

### 5.3.1.2 Cas du traitement avec la PN

Les résultats de l'effet apporté par le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sur la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle sont présentés dans la Figure 5.11. L'utilisation de la pouzzolane naturelle seule en présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  fait augmenter considérablement la résistance à la compression des échantillons de deux sols argileux stabilisés à savoir que le SR développe des valeurs bien plus grandes que celles développées par le SG. Par exemple, avec 20% de pouzzolane naturelle et après 7 jours de cure, la résistance à la compression du SG augmente de 0.2 MPa jusqu'à seulement 0.5 et 1.1 MPa en présence de 2 et 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , respectivement (Fig. 10 c, g). Cependant, pour la même teneur en pouzzolane naturelle et la même période de cure, la résistance à la compression du SR augmente de 0.9 MPa jusqu'à 1.7 et 4 MPa en présence de 2 et 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , respectivement (Fig. 11c, g). En revanche, avec 20% de pouzzolane naturelle en tant qu'additif et au bout de 120 jours de cure, la résistance à la compression du SG augmente de 0.3 MPa jusqu'à 1.2 et 1.9 MPa en présence de 2 et 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , respectivement (Fig. 10d, h). Cependant, pour la même teneur en pouzzolane naturelle et la même période de cure, la résistance à la compression du SR augmente de 1.2 MPa jusqu'à 4.8 et 8.6 MPa en présence de 2 et 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , respectivement (Fig. 11d, h).

Les résultats de la macrostructure issus des essais de MEB effectués sur des échantillons de deux sols traités avec la pouzzolane naturelle en présence de 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  après 60 jours de cure sont présentés dans les Figure 5.12. Les images de MEB obtenues montrent la formation de nouveaux composés cimentaires (C-S-H et C-A-H). Ces images indiquent que

les nouveaux composés cimentaires formés par les réactions chimiques ont fait produire des liaisons plus fortes entre les particules d'argile et par conséquent des valeurs élevées de la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés. D'une part, l'augmentation des valeurs de la résistance à la compression des échantillons des deux sols argileux traités avec la pouzzolane naturelle en présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  est certainement liée à la formation éventuelle de composés cimentaires.

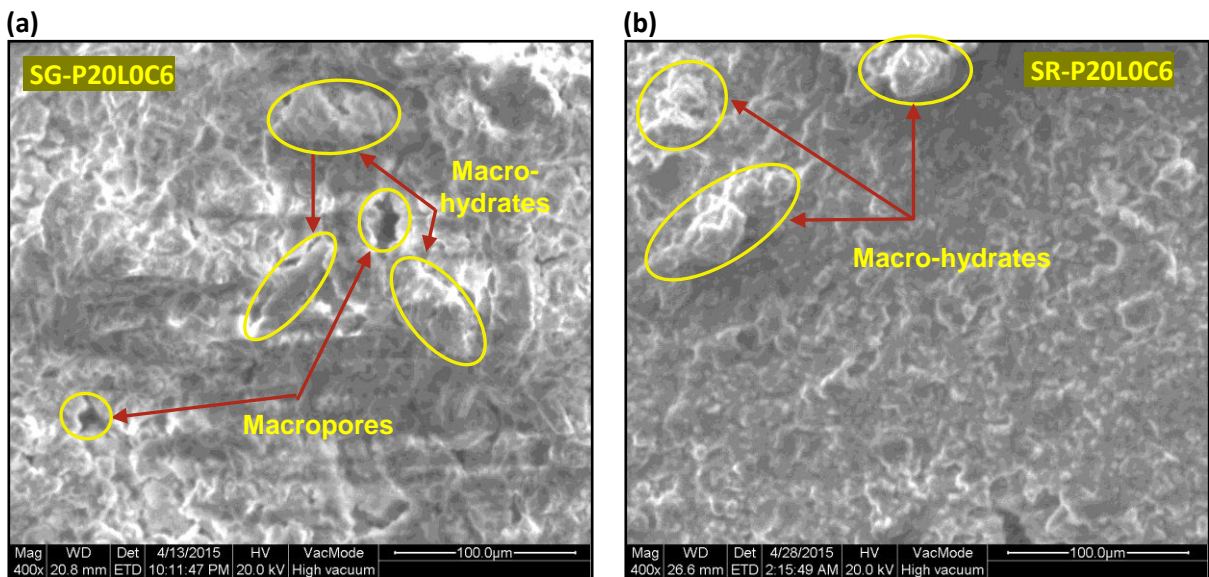


**Fig. 5.11** — Effet de différents teneurs en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés avec la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

D'une part, la formation de l'ettringite et/ou des composés cimentaires dans des mêmes échantillons des deux sols argileux stabilisés avec la pouzzolane naturelle en présence du

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  n'a pas été observée par les analyses de DRX en raison probablement de la faible quantité de ces composées (Figs. 5.2(f) et 5.3(f)). D'autre part, il se peut que ces composés cimentaires aient été endommagés lors de la préparation des échantillons par broyage.

Les composés cimentaires observés dans les images de MEB pour les échantillons des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle en présence de 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ont été probablement formés suite à des réactions pouzzolaniques entre l'hydroxyde de chaux ( $\text{CaO}$ : présent dans le sol et/ou provenant de la pouzzolane naturelle elle-même) et les ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) apportés par l'addition du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Il convient de noter que la présence de 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  fait améliorer considérablement la compacité des échantillons des deux sols argileux traités avec la pouzzolane naturelle au bout de 60 jours de cure. Le même comportement a été observé par Aldaood et al. (2014a) où ils ont rapporté que l'augmentation de la résistance des sols gypseux traités à la chaux est liée à la fraction des particules fines de la poudre du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  qui font augmenter la compacité de la matrice du sol stabilisé et par conséquent la résistance à la compression.



**Fig. 5.12** — Images de MEB montrent les changements dans la macrostructure des deux sols argileux traités avec l'addition de 20% de pouzzolane naturelle en présence de 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  après 60 jours de cure, (a): SG, (b): SR.

Des macropores de dimensions variant de 10 à 20µm ont été observés sur l'échantillon du SG traité avec 20% de pouzzolane naturelle en présence de 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Ces macropores sont probablement liés au mauvais compactage lors de la confection des échantillons. Ceci explique pourquoi le SR a développé des valeurs de la résistance à la compression bien plus grandes que celles développées par le SG. Par comparaison, la différence dans les valeurs de



la résistance à la compression des échantillons du SR traités à la chaux et ceux traités avec la pouzzolane naturelle s'explique par le comportement du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  qui a la capacité de réduire la solubilité de la chaux hydratée (Shi and Day, 2000a).

### 5.3.1.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN

Les résultats de l'effet apporté par le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sur la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sont présentés dans la Figure 5.13. Dans tous les cas, les valeurs de la résistance à la compression des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sont supérieures à celles des échantillons des deux sols traités sans présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

En effet, la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle augmente considérablement avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , de la teneur en chaux-pouzzolane naturelle et de la période de cure où le SR a des meilleurs résultats. Par exemple, avec 2% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et après 120 jours de cure, les SG et SR stabilisées avec la combinaison de 10%PN+4%L développent des valeurs de la résistance à la compression de l'ordre de 3.8 et 7.4 MPa, respectivement (Fig. 5.13(a)). Cependant, avec le même teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et pour la même période de cure, les SG et SR stabilisée avec la combinaison de 20%PN+8%L développent des valeurs de la résistance à la compression de l'ordre de 7.1 et 8.8 MPa, respectivement (Fig. 5.13(a)). En revanche, une fois d'ajouter 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , les SG et SR stabilisés avec la combinaison de 10%PN+4%L développent respectivement des valeurs de la résistance à la compression de 5.8 et 8 MPa au bout de 120 jours de cure (Fig. 5.13(c)). Cependant, pour la même teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et pour la même période de cure, les résistances des SG et SR stabilisés avec 20%PN+8%L deviennent 8.7 et 9.9 MPa, respectivement (Fig. 5.13(c)). En général, le traitement combiné de chaux-pouzzolane naturelle en présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  fait apporter un effet significatif sur la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés.

Les résultats des analyses minéralogiques issus des essais de DRX effectués sur des échantillons de deux sols traités avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en présence de 4% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  après 60 jours de cure sont présentés dans les Figures 5.2(d) et 5.3(d). Il est à observer que la forte augmentation dans les valeurs de la résistance à la compression des deux sols argileux traités avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en présence de 4% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  est certainement liée à la formation des composés de C-S-H, C-A-H et de l'ettringite minérale.

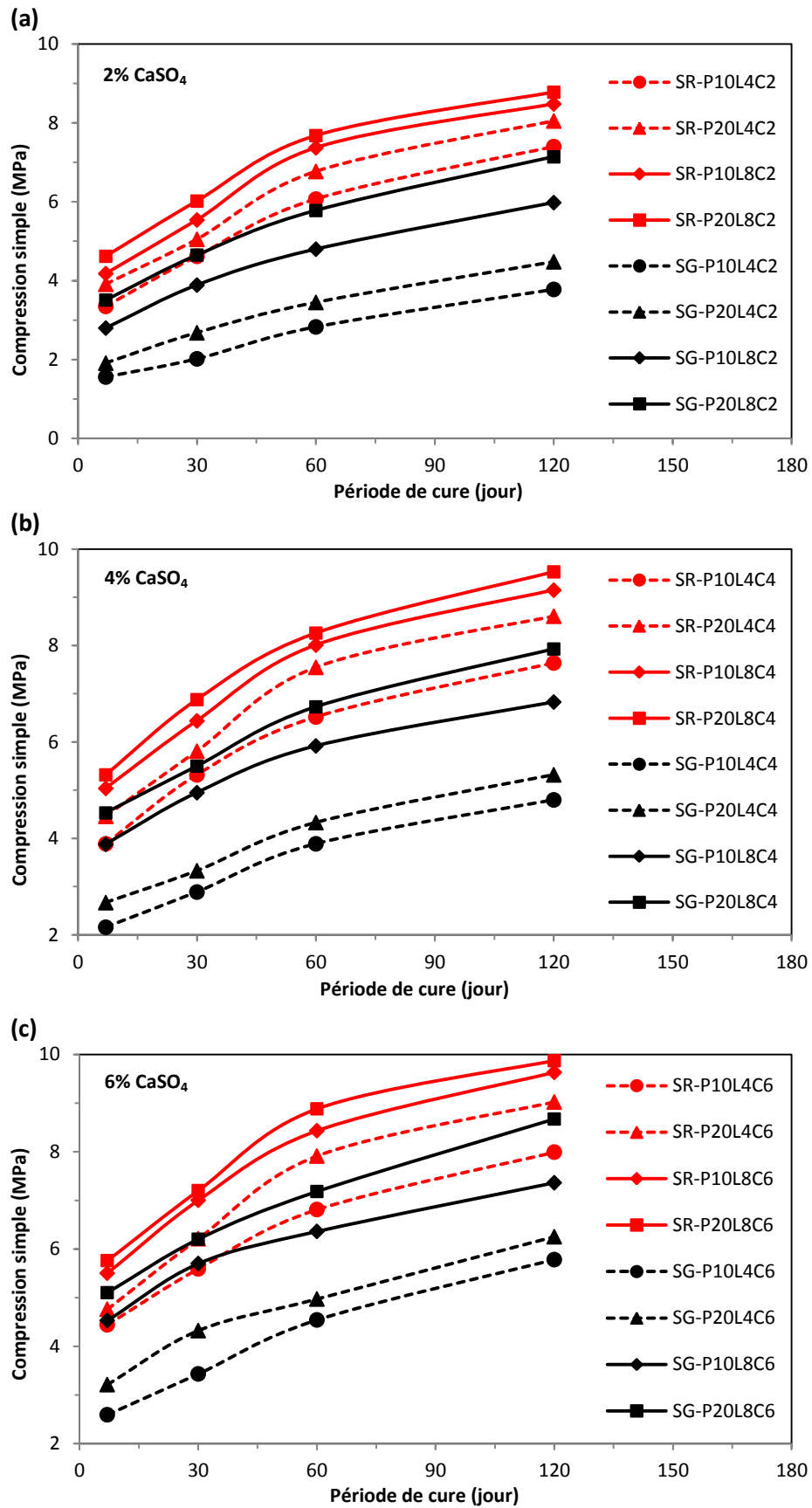


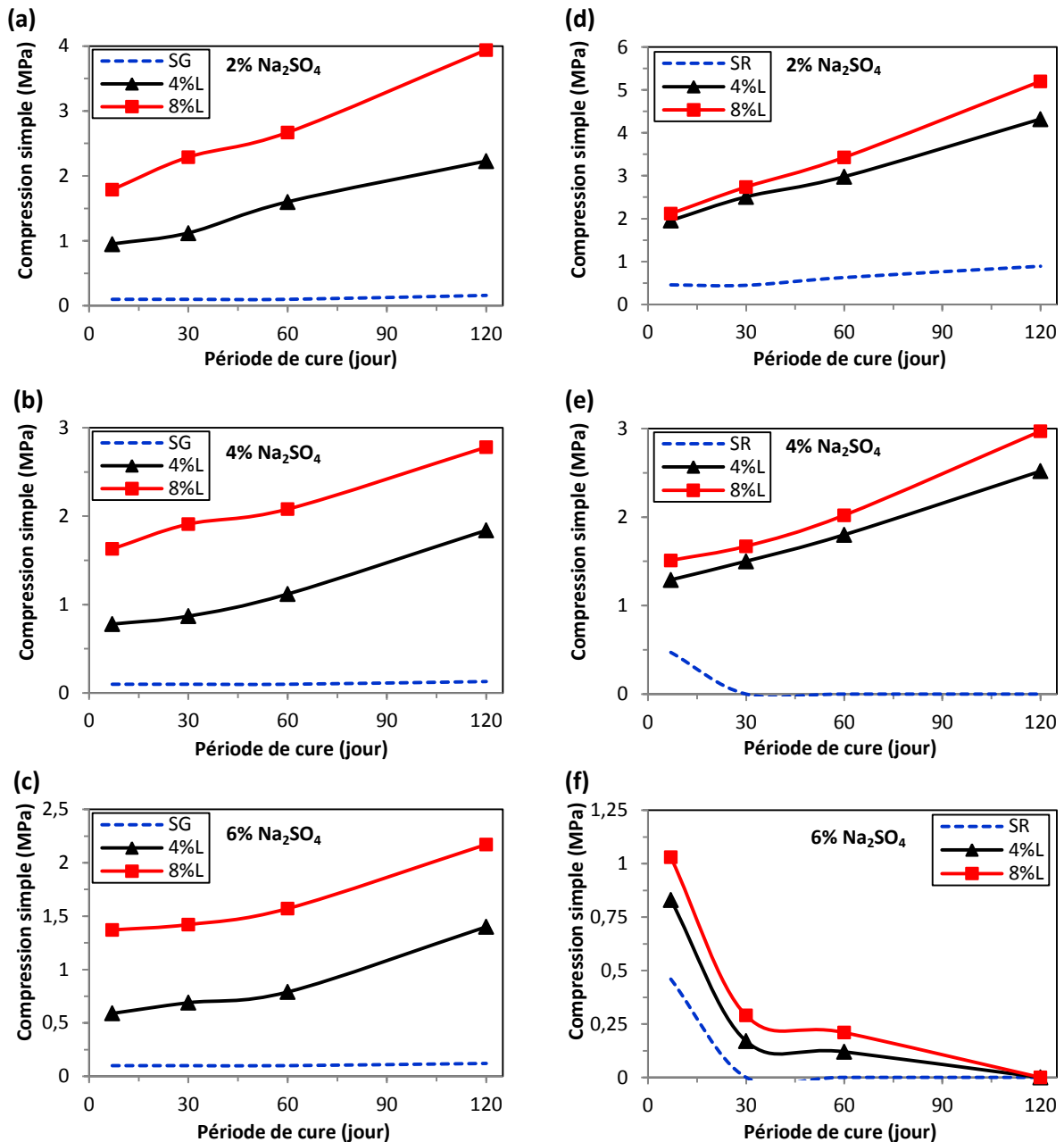
Fig. 5.13 — Effet de différents teneurs en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sur la résistance à la compression non confinée des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pozzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

### 5.3.2 Effet du $\text{Na}_2\text{SO}_4$ sur la compression simple

Les résultats de l'effet apporté par le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la résistance à la compression non confinée et la minéralogie des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont présentés dans les Figures 5.14–5.18.

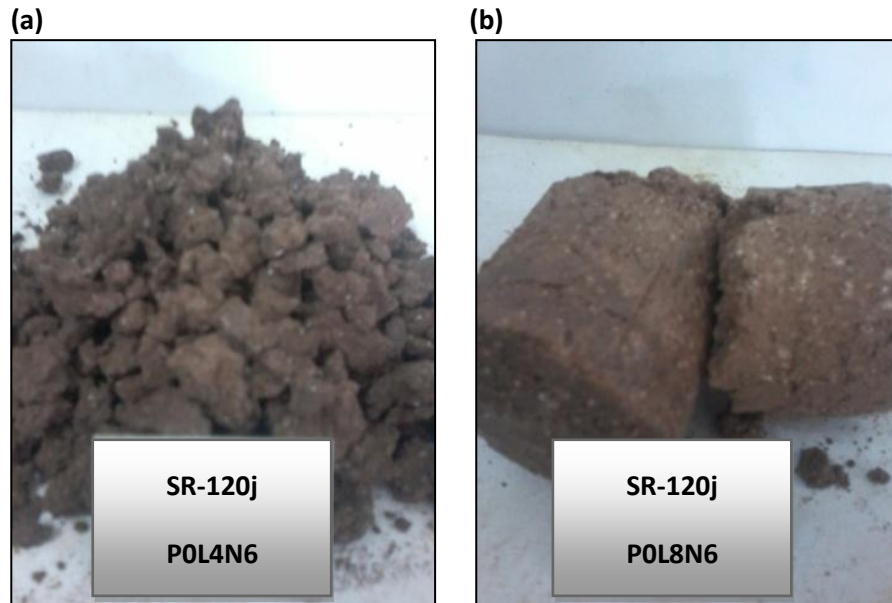
#### 5.3.2.1 Cas du traitement à la chaux

Les résultats de l'effet apporté par le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux sont illustrés dans la Figure 5.14. La résistance à la compression des deux sols stabilisés diminue significativement avec l'augmentation de la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Pour des faibles teneurs en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (2%), les deux sols argileux stabilisés à la chaux seule ont présenté une augmentation considérable de la résistance à la compression notamment avec la période de cure (Figures 3b et 4b). Ce comportement est attribué à l'effet immédiat de l'hydroxyde de sodium dû à la présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  tout en faisant accélérer les réactions pouzzolaniques à court terme (Shi and Day, 2000a). Cependant, pour un traitement seul à la chaux, la présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  avec des fortes teneurs (à partir de 4%) fait perturber la résistance à la compression des échantillons des deux sols stabilisés. D'autre part, les éprouvettes du SR traités avec de différentes teneurs en chaux après 30 et 60 jours de cure en présence de 4 et 6% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sont entièrement altérées (Fig. 5.15). Les résultats des analyses minéralogiques issus des essais de DRX effectués sur des échantillons de deux sols traités avec l'addition de la chaux en présence de 4% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  après 60 jours de cure sont présentés dans les Figures 5.2(b) et 5.3(b). Il est à observer que la forte augmentation dans les valeurs de la résistance à la compression ainsi que l'altération des éprouvettes du SR traité avec l'addition de la chaux en présence de 4% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  est certainement liée à la formation des composés de C-S-H, C-A-H et de l'ettringite minérale fortement expansive. D'après Mitchell (1986), la diminution remarquable de la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés et aussi bien l'altération des éprouvettes du SR stabilisées à la chaux est attribuée à la présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dans le sol conduisant à la formation d'ettringite qui se traduit par la diminution du pH due à l'épuisement de la chaux additionnée au sol. De plus, Hunter (1988) a indiqué que l'hydroxyle  $\text{OH}^-$  provenant de l'hydratation de la chaux se combine avec la montmorillonite,  $\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2^-$ , pour former l'hydroxyde d'aluminium  $[\text{2Al}(\text{OH})_4]$ . Ce dernier  $[\text{2Al}(\text{OH})_4]$  réagit ensuite avec les sulfates pour former le minéral d'ettringite responsable de l'altération des éprouvettes. D'ailleurs, Mehta (1983) a rapporté que l'adsorption du sulfate sur des surfaces de C-S-H provoque la réduction de la résistance due à la diminution de la capacité de cimentation.



**Fig. 5.14** — Effet de différents teneurs en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés à la chaux pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

Il est à constater que quelle que soit la période de cure, la résistance à la compression du SG traité à la chaux en présence de différents teneurs en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> augmente considérablement avec la teneur en chaux additionnée par rapport aux échantillons du SR traité avec le même additif. Donc, la sensibilité de la résistance à la compression à l'effet de la chaux est plus prononcée avec le SG qu'avec le SR. En revanche, la sensibilité de la résistance à la compression à l'effet du Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> est plus prononcée avec le SR qu'avec le SG. Ce comportement est probablement attribué à la nature du sol traité qui est conditionné par son indice de plasticité et de sa composition minéralogique.

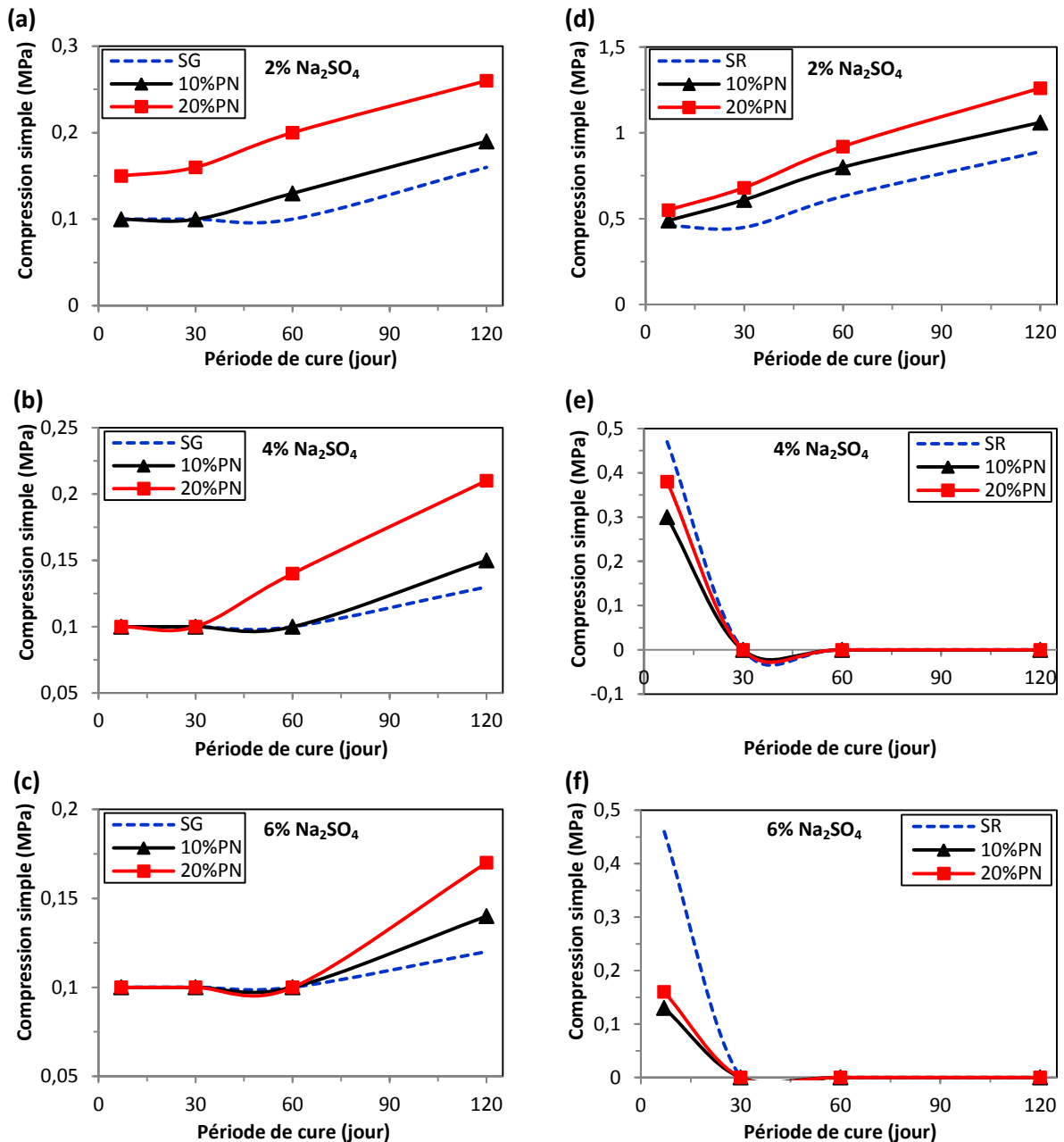


**Fig. 5.15** — Eprouvettes du SR altérées après traitement avec l'addition de la chaux en présence de 6% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  pendant 120 jours de cure, (a): POL4N6, (b): POL8N6.

### 5.3.2.2 Cas du traitement avec la PN

Les résultats de l'effet apporté par le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle sont reportés dans la Figure 5.16. En général, l'influence de la pouzzolane naturelle reste presque marginale même en présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Cependant, le cas des éprouvettes du SR traité avec différentes teneurs en pouzzolane naturelle durant 30, 60 et 120 jours de cure en présence de 4 et 6% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sont entièrement altérées (Fig. 5.17). D'ailleurs, la formation de l'ettringite et/ou des composés cimentaires dans les échantillons des deux sols argileux stabilisés avec la pouzzolane naturelle en présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  n'a pas été observée par les analyses de DRX (Figs. 5.2(c) et 5.3(c)). Donc, la dégradation des éprouvettes du SR stabilisé avec la pouzzolane naturelle en présence de fortes teneurs en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  est attribuée au comportement du SR du fait que les éprouvettes du SG ont pu résister à l'altération.

Par comparaison, les valeurs de la résistance à la compression développées par des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle en présence de 2% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sont bien plus grandes que celles développées en présence de 2% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . De plus, l'augmentation marginale dans la résistance à la compression du SR traité à la chaux par rapport au même sol traité avec la pouzzolane naturelle est attribuée au fait que le gypse secondaire ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) issu de l'addition du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  possède la capacité de réduire la solubilité de la chaux hydratée (Shi and Day, 2000a).



**Fig. 5.16** — Effet de différents teneurs en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la résistance à la compression non confinée des sols argileux stabilisés avec la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

A partir des résultats obtenus, il est donc important de classer le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  comme étant un perturbateur de prise pour la stabilisation des deux sols lorsque sa teneur est supérieure à 2% en poids sec de sol. En général, quelque que soit la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , les différences dans les valeurs de la résistance à la compression entre la chaux et la pouzzolane naturelle sont plus prononcées avec le SG qu'avec le SR. Par comparaison, le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  apporte un effet bénéfique aux deux sols traités avec l'addition de la pouzzolane naturelle alors que le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  apporte un effet indésirable.



**Fig. 5.17** — Epreuves du SR complètement altérées après traitement avec l'addition de la pouzzolane naturelle en présence de 4 et 6% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  pendant 30, 60 et 120 jours de cure.

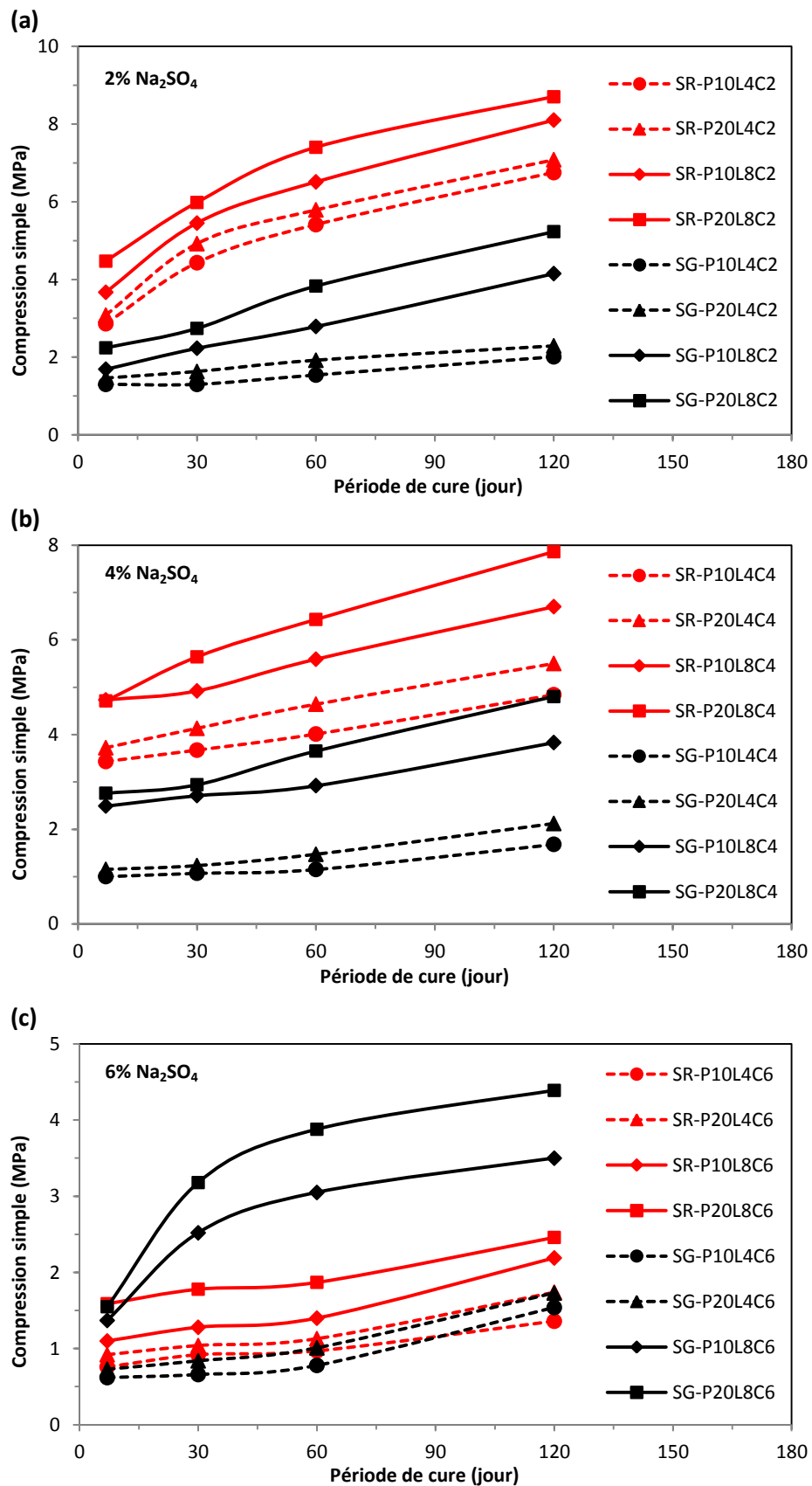
### 5.3.2.3 Cas du traitement combiné de chaux-PN

Les résultats de l'effet apporté par le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sont reportés dans la Figure 5.18. En général, la présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dans un traitement combiné avec la chaux et de la pouzzolane naturelle fait perturber la résistance à la compression des échantillons des deux sols argileux stabilisés. Dans le cas du SG, on assiste à une diminution progressive de la résistance à la compression lorsque la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  augmente. Par exemple, pour un traitement combiné de 20%PN+8%L durant 120 jours de cure, la résistance à la compression du SG décroît de 5.9 MPa jusqu'à 5.2, 4.8 et 4.4 MPa en présence de 2, 4 et 6% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , respectivement. Cependant, après 7 jours de cure et pour le même type de sol traité avec la même combinaison, la résistance à la compression présente des augmentations de l'ordre de 25.1 et 54.2% en présence de 2 et 4% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , respectivement. Le même comportement a été observé avec les combinaisons 10%PN+4%L, 20%PN+4%L, 10%PN+8%L.

D'ailleurs, pour le même type de traitement (20%PN+8%L) en présence de 2% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , la résistance à la compression du SR stabilisé avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle présente des augmentations de l'ordre de 74.4 et 6.1% après 7 et 120 jours de cure, respectivement. Il est à noter qu'en présence de 2 et 4% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , les valeurs de la résistance à la compression des échantillons du SR traité avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle durant 7 et 30 jours sont bien plus grandes que celles des échantillons du sol non traité. D'après Sridharan et al., 1995, la présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dans un système de sol stabilisé à la chaux fait transformer la chaux additionnée en gypse insoluble et en hydroxyde de sodium tout en réduisant ainsi la quantité de chaux disponible pour les réactions avec le sol. Par conséquent, la présence d'hydroxyde de sodium fait augmenter le pH du sol en provoquant la dissolution d'une grande quantité de l'alumine et de la silice qui rentrent en réaction avec la chaux restante pour former des produits cimentaires. Ceci explique clairement l'augmentation significative de la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés à court terme.

Par comparaison, quelque soit la période de cure, la sensibilité de la résistance à la compression des échantillons de deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle à l'effet des sulfates est très prononcée avec la présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  qu'avec présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . En effet, les ions calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) nécessaires à l'échange de cations au niveau du sol sont fournis par des ions calcium libérés par le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  alors qu'avec le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  les échanges de cations doivent être assurés par l'addition de la chaux.





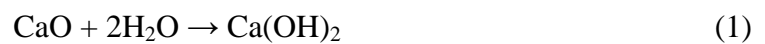
**Fig. 5.18** — Effet de différents teneurs en Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sur la résistance à la compression non confinée des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

Il y a donc une réduction de la teneur en chaux disponible pour les réactions pouzzolaniques dans le sol en présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  par rapport à ceux qui sont disponibles dans le sol en présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (Mitchell, 1986). De plus, il est à constater que pour une forte teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (6%) et avec un traitement de 20%PN+8%L, la résistance à la compression des échantillons du SR obtenue durant 120 jours de cure est presque 4 fois plus petite (soit une chute de 69.9%) que celle des échantillons du même sol traité en absence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Ce qui est très important de signaler que le traitement avec l'utilisation de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle a pu résister à l'altération des éprouvettes du SR malgré la présence de fortes teneurs en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Ainsi, plus la teneur en pouzzolane naturelle mélangée avec la chaux est importante plus la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés avec ou sans sulfate est importante.

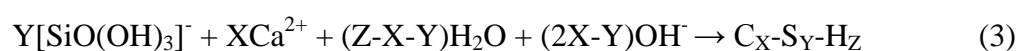
## 5.4 Mécanismes de stabilisation et d'altération de la résistance

### 5.4.1 Mécanisme de stabilisation du mélange Sol-Chaux-PN

Il est connu qu'en absence du sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), lorsque la chaux vive ( $\text{CaO}$ ) se met au contact de l'eau ( $2\text{H}_2\text{O}$ ), la chaux s'hydrate (ou s'hydrolyse) en premier pour former l'hydroxyde de chaux [ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ] (Eq. 1) et puis elle s'ionise pour libérer des ions de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et d'hydroxydes ( $\text{OH}^-$ ) en faisant augmenter la valeur du pH de la solution très rapidement (Eq. 2):

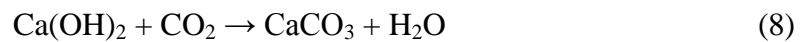
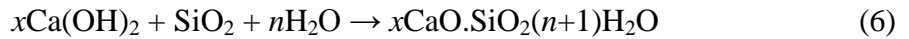
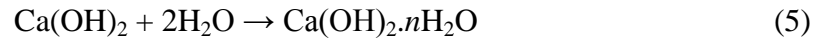


D'après Shi and Day (2000b), en absence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , la dissolution de la  $\text{SiO}_2$  amorphe est très forte pour un pH égal à 12.5. Généralement, les pouzzolanes naturelles sont constituées de silice ou d'aluminosilicate. Selon leur structure, le pH aura un effet similaire sur la dissolution de la pouzzolane naturelle que celle de la  $\text{SiO}_2$  amorphe. De plus, l'accélération de la réaction pouzzolanique est contrôlée par l'accélération de la dissolution de la pouzzolane naturelle. Par conséquent, les espèces de monosilicates et d'aluminates dépolymérisés pénètrent dans la solution en formant deux principaux composés à savoir l'hydroxyde de silicium (ou les monosilicates, [ $\text{SiO}(\text{OH})_3$ ]) et l'hydroxyde d'aluminium (ou les aluminates [ $\text{Al}(\text{OH})_4$ ]). Lorsque les ions de calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) contactent ces espèces dissoutes de monosilicates et d'aluminates, les composés de C-S-H et  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  se forment (Eqs. 3 et 4).





D'autre part, Hu et al. (2016) ont rapporté qu'il y a quatre équations de réactions physiques et chimiques (échange d'ions, la cristallisation, réactions pouzzolaniques et la carbonatation) survenus dans les mélanges de Sol-Chaux-cendres volantes sous les conditions de cure standard (Eqs. 5-8).



Les composés chimiques  $\text{C}_x\text{-S}_y\text{-H}_z$ ,  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2.n\text{H}_2\text{O}$ ,  $x\text{CaO}.\text{SiO}_2(n+1)\text{H}_2\text{O}$  et  $x\text{CaO}.\text{Al}_2\text{O}_3(n+1)\text{H}_2\text{O}$  sont les résultats des réactions chimiques (Eqs. 3-7). Le rôle de ces composés dans les mélanges de Sol-Chaux-cendres volantes et par conséquent les mélanges de Sol-Chaux-pouzzolane naturelle est de:

- produire une couche stable de film protecteur qui enveloppe les particules de sol;
- cimenter les particules du sol;
- remplir les vides pour diminuer l'indice de vide et par conséquent la perméabilité;
- améliorer la compacité et par conséquent la résistance à la compression non confinée.

Cependant, le cristal de  $\text{CaCO}_3$  (Eq. 8) a la capacité de cimenter les particules du sol et d'améliorer la résistance à la compression des deux sols traités avec les mélanges de chaux-cendres volantes ou de chaux-pouzzolane naturelle.

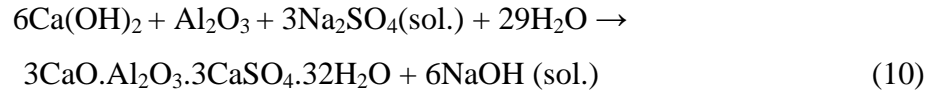
#### 5.4.2 Mécanisme d'altération de la résistance du mélange Sol-Chaux-PN- $\text{Na}_2\text{SO}_4$

En présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , la réaction entre le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  et le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  en présence de l'eau a été donnée par Roy (1986) comme suit (Eq. 9):

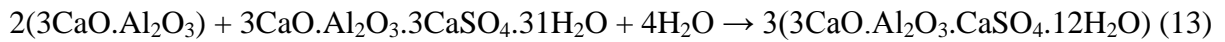
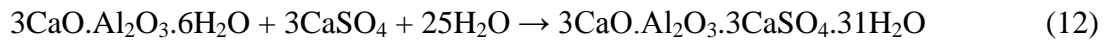
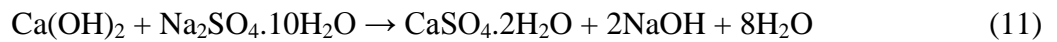


D'une part, Sridharan et al. (1995) ont rapporté que la réaction entre la chaux et  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  en présence de l'eau fait produire un hydroxyde de sodium ( $\text{NaOH}$ ), qui développe une solution alcaline plus élevée (pH élevé) par rapport à la portlandite  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Le pH élevé qui a été développé par le  $\text{NaOH}$  conduit à la dissolution d'une grande quantité d'alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) et de

silice ( $\text{SiO}_2$ ) qui réagissent avec le reste de la chaux pour former une quantité élevée de produits cimentaires responsables de l'augmentation considérable des valeurs de résistance à la compression notamment à très court terme (7 et 30 jours). D'autre part, la présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  augmente la concentration des ions sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) tout en conduisant à la formation d'ettringite minérale ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ), comme suit (Eq. 10):



En outre, les réactions chimiques entre le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et le mélange chaux-cendres volantes ont été donné par Hu et al. (2016) come suit (Eqs.11-13):



Les trois nouvelles phases minérales insolubles citées ci-dessus  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ ,  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31\text{H}_2\text{O}$  et  $3(3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O})$  sont les résultats des réactions chimiques entre les ions  $\text{SO}_4^{2-}$  et  $\text{C}_X\text{-S}_Y\text{-H}_Z$ ,  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ,  $x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (n+1)\text{H}_2\text{O}$  et  $x\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot (n+1)\text{H}_2\text{O}$  (Eqs. 10, 12 et 13). L'effet de ces minéraux insolubles sur les mélanges de chaux-cendres volantes ou de chaux-pouzzolane naturelle est de:

- absorber une grande quantité de molécules d'eau qui produisent un fort gonflement;
- combler les vides tout en réduisant le volume des vides;
- améliorer la résistance à la compression à très court terme;
- densifier la structure, réduire la résistance à la compression et détériorer les sols améliorés à très long terme.

Il est à signaler que Shi and Day (2000a) ont rapporté dans leur étude que l'ettringite peut augmenter le volume solide jusqu'à 164% alors que les composés de C-S-H font l'augmenter seulement jusqu'à 17,5 %. Dans le cas de cette étude, il convient de noter que les résistances initiales qui sont fortement élevées peuvent être expliquées par l'accélération des réactions pouzzolaniques au jeune âge et ainsi de la formation d'ettringite à long terme due à la présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

## 5.5 Conclusion

De nombreux tests ont été effectués au niveau du laboratoire en vue d'étudier les différents effets apportés par la présence des sulfates ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) sur la résistance à la compression non confinée des deux sols argileux (SG et SR) traités avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison. A partir des résultats des essais effectués, les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- La stabilisation avec l'addition de la chaux seule sans présence des sulfates fait augmenter considérablement la résistance à la compression des échantillons de deux sols argileux étudiés. Cette augmentation dépend de la teneur en chaux additionnée et de la période de cure.
- L'utilisation de la pouzzolane naturelle seule a une influence marginale sur la résistance à la compression des deux sols argileux.
- Néanmoins, lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées, la résistance à la compression des deux sols argileux stabilisés devient très élevée et elle augmente avec l'augmentation de la teneur de chaux-pouzzolane naturelle et de la période de cure.
- Avec la pouzzolane naturelle en tant qu'additif, une augmentation significative de la résistance à la compression a été observée sur les échantillons des deux sols argileux traités en présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  en comparaison avec les échantillons traités sans présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  à savoir que le SR a des meilleurs résultats. Ceci est probablement attribué aux particules fines du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  qui font augmenter la compacité des échantillons des deux sols argileux traités.
- Les échantillons des deux sols traités avec l'addition de la chaux en présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ne montrent qu'une légère augmentation de la résistance à la compression par rapport aux échantillons des deux sols traités en absence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Ceci est attribué au fait que le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  a une aptitude de réduire la solubilité de la chaux hydratée dans les échantillons des deux sols argileux en tant que stabilisant.
- Une augmentation considérable de la résistance à la compression des échantillons des deux sols argileux contenant du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  a été observée lorsque la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est utilisée, particulièrement, avec la période de cure.
- L'augmentation progressive dans la résistance à la compression des deux sols argileux étudiés notamment le SR peut être expliqué par la formation d'ettringite minérale favorisée par la présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  dans les mélanges de Sol-Chaux-PN. En effet,

l'augmentation de la résistance à la compression est particulièrement importante lorsque la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  augmente.

- Les grandes valeurs de la résistance à la compression des échantillons des deux sols argileux stabilisés sont attribuées à la présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  qui fait accélérer la réaction chimique entre le sol, la chaux et la pouzzolane naturelle.
- L'augmentation de la cohésion des deux sols argileux stabilisés avec l'âge de cure peut être expliquée par la formation d'ettringite en raison de la présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  notamment avec des fortes teneurs.
- La composition minéralogique du sol a une importance capitale et joue un rôle très important dans le succès du processus de la stabilisation particulièrement en présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .
- L'augmentation précoce de la résistance à la compression des deux sols argileux peut être attribuée à l'accélération des réactions pouzzolaniques causées par l'hydroxyde de sodium provenant de l'addition du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .
- La diminution progressive de la résistance à la compression du SG et la dégradation totale des éprouvettes du SR pendant la cure peut s'expliquer par la formation d'ettringite minérale favorisée par la présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dans les mélanges de Sol-Chaux-PN. L'influence est particulièrement potentielle lorsque la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  utilisée est importante.
- La pouzzolane naturelle est un bon additif quand elle est combinée avec de la chaux puisqu'elle résiste à la dégradation des éprouvettes lorsque le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  se présente avec des fortes teneurs.
- La nature minéralogique du sol présente une importance capitale et joue un rôle très important dans la réussite ou l'échec d'un traitement en dominant les effets eux-mêmes apportés par le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur les sols stabilisés.