

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 6

---

---

## **Effet des Sulfates sur la Résistance au Cisaillement Direct**

- 6.1. *Introduction***
- 6.2. *Résistance au cisaillement des  
sols traités sans sulfates***
- 6.3. *Résistance au cisaillement des  
sols traités avec sulfates***
- 6.4. *Conclusion***

## 6.1 Introduction

En général, l'étude de la stabilité des fondations, des remblais, des ouvrages de soutènement, des talus naturels ou artificiels...etc., nécessite de connaître la résistance au cisaillement du sol. La résistance au cisaillement est définie comme étant la contrainte de cisaillement au moment de la rupture. Les résultats de la résistance au cisaillement issus des essais de laboratoire ou in situ permettent de tracer la droite intrinsèque et de déduire les paramètres de cisaillement des deux sols à savoir la cohésion et l'angle de frottement interne. Cependant, les sols fins constituent un vrai handicap pour les ingénieurs ce qui leur conduit à les améliorer en vue de répondre aux exigences normatives de construction. Le traitement chimique des sols par l'utilisation des additifs minéraux permet d'améliorer la résistance et les paramètres de cisaillement, par conséquent, la stabilité des ouvrages en question.

Néanmoins, un autre problème majeur est lié à la présence des sulfates lors de la stabilisation chimique des sols en favorisant la formation de nouvelles phases minérales fortement expansives (ex: ettringite). L'ettringite peut intervenir plus souvent à très long terme pour dégrader et altérer la cohérence des particules du sol, par conséquent, la stabilité de l'ouvrage. Dans ce chapitre, nous allons analyser, comparer et interpréter 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 au cisaillement 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.

## 6.2 Résistance au cisaillement des sols traités sans sulfates

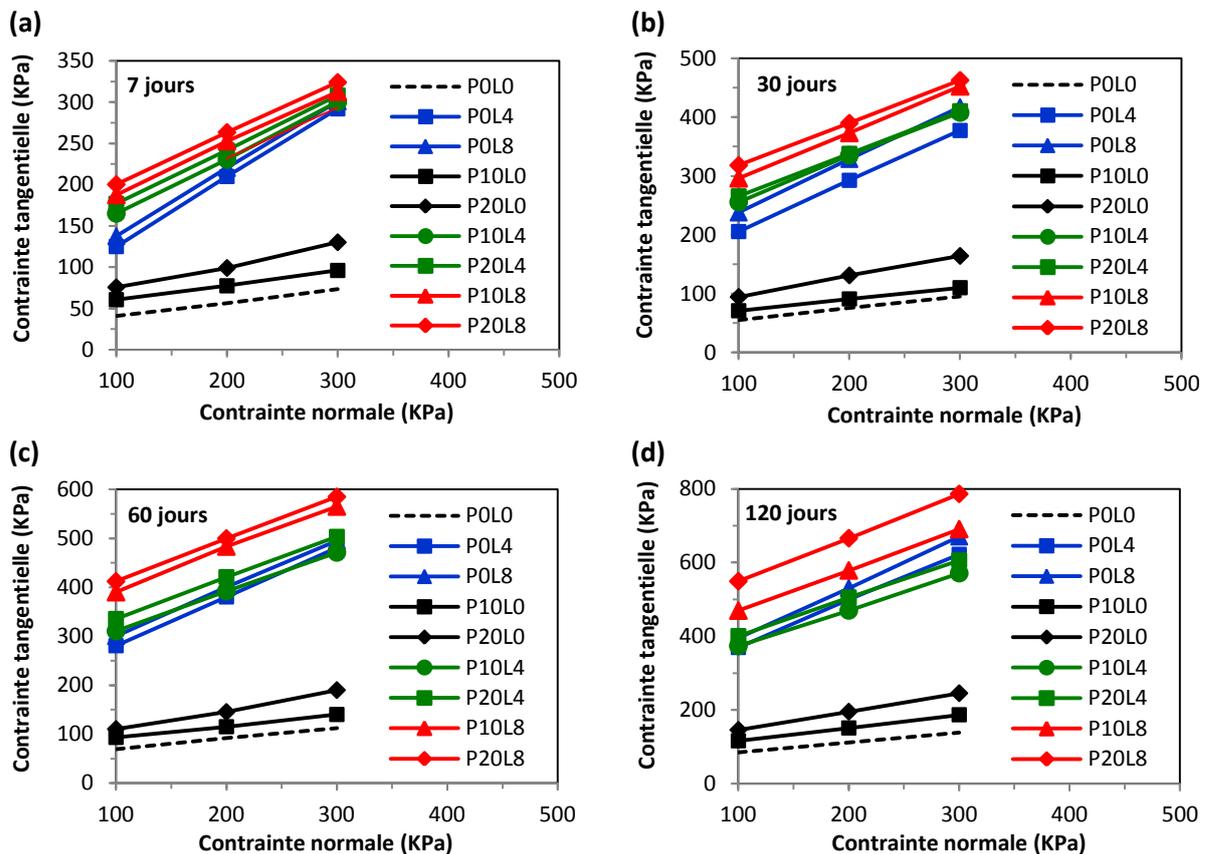
### 6.2.1 Effet des additifs sur la résistance au cisaillement

Les résultats de l'effet de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leurs combinaisons sur la variation temporelle de la résistance au cisaillement maximale des deux sols argileux étudiés en absence des sulfates sont montrés dans les Figures 6.1 et 6.2.

#### 6.2.1.1 Effet de la chaux

Les Figures 6.1 et 6.2 montrent que la résistance au cisaillement des deux sols argileux stabilisés augmente avec la période de cure. L'utilisation de la chaux seule comme stabilisant fait cimenter les particules des sols argileux en augmentant significativement leur résistance au cisaillement, particulièrement, au delà de 30 jours de cure. En outre, La résistance au cisaillement augmente également avec l'augmentation de la teneur en chaux additionnée à savoir que cette augmentation est très prononcée avec le SR qu'avec le SG où la différence

devient presque comparable au bout de 120 jours de cure. Par exemple, avec une charge normale de 300 KPa, la résistance au cisaillement développée par le SG traité avec 8% de chaux est de 301, 416.9, 495.5 et 670.2 KPa après 7, 30, 60 et 120 jours de cure, respectivement. Cependant, avec la même charge normale, la résistance au cisaillement développée par le SR traité avec la même teneur en chaux est de 372, 481.3, 584.1 et 687 KPa après 7, 30, 60 et 120 jours de cure, respectivement.



**Fig. 6.1** — Effet de différents pourcentages de chaux, de PN et de L-PN sur la résistance au cisaillement du SG stabilisé en absence des sulfates pour différentes périodes de cure.

### 6.2.1.2 Effet de la PN

Concernant l'utilisation de la pouzzolane naturelle en tant qu'additif (Fig. 6.1 et 6.2), il semble que l'effet de la variation temporelle de la résistance au cisaillement pour les deux sols est marginal. Cela explique clairement que ce type de matériau volcanique a besoin d'un activateur chimique, physique ou mécanique pour pouvoir réagir et développer des réactions pouzzolaniques. Dans cette étude, la chaux a été choisie pour jouer le rôle d'un catalyseur (activateur chimique) en vue de réactiver la silice amorphe ( $\text{SiO}_2$ ) qui se présente dans la pouzzolane naturelle pour le cas d'un traitement combiné.

### 6.2.1.3 Effet combiné de chaux-PN

La combinaison de la chaux et de la pouzzolane naturelle fait apporter un effet significatif sur la résistance au cisaillement des deux sols argileux par rapport à l'utilisation de la chaux ou de la pouzzolane naturelle toutes seules. En effet, une augmentation considérable de la résistance au cisaillement des deux sols argileux stabilisés a été obtenue à très long terme à savoir que cette augmentation est très importante quand la teneur en chaux-pouzzolane naturelle utilisée est importante (ex: 20%PN+8%L) (Fig. 6.1 et 6.2).

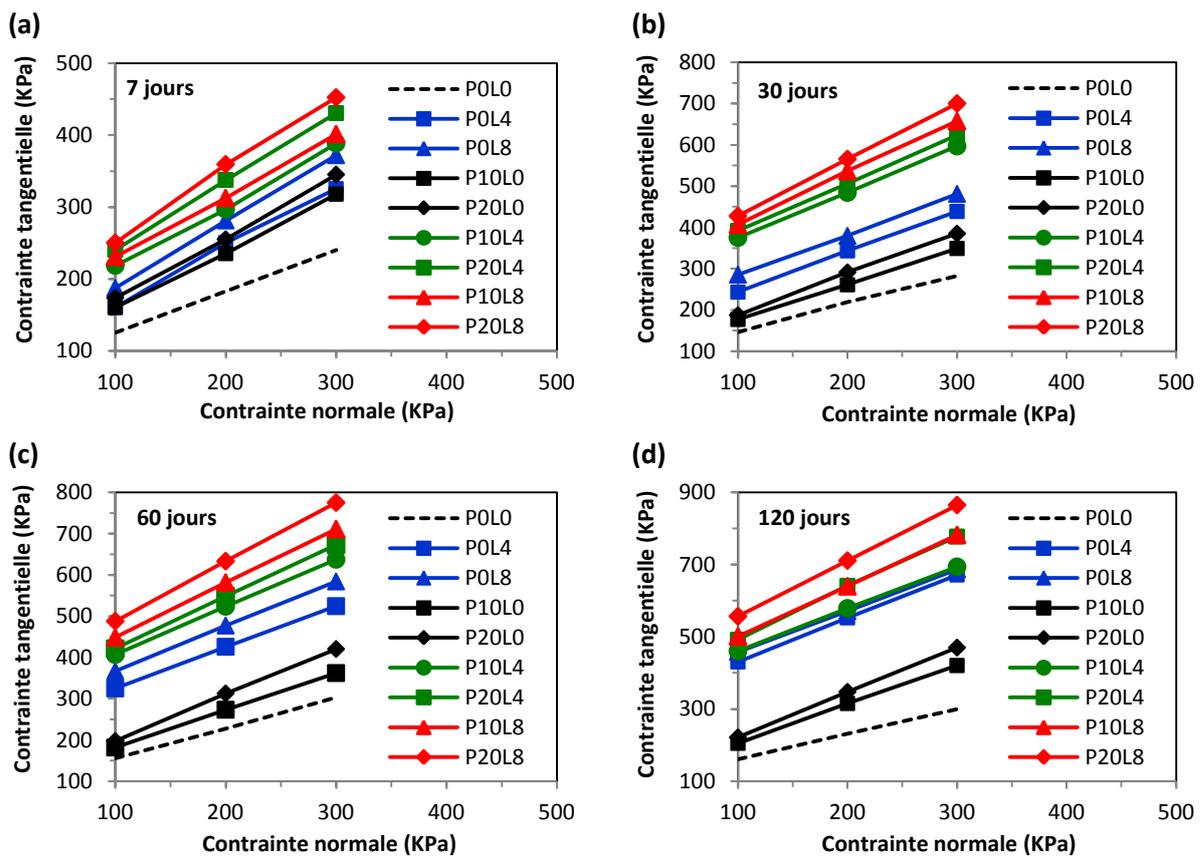


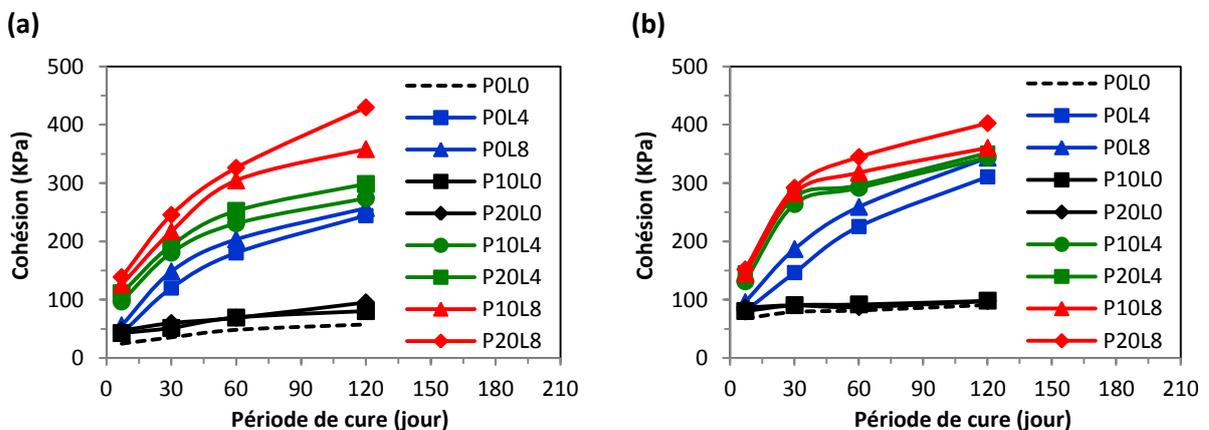
Fig. 6.2 — Effet de différents pourcentages de chaux, de PN et de L-PN sur la résistance au cisaillement du SR stabilisé en absence des sulfates pour différentes périodes de cure.

### 6.2.2 Effet des additifs sur la cohésion

Les résultats de l'effet de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leurs combinaisons sur la variation temporelle de la cohésion des deux sols argileux traités en absence des sulfates sont illustrés dans la Figure 6.3. Dans cette étude, seuls les paramètres de cisaillement (en utilisant les résistances maximales de cisaillement) ont été calculés ici, parce que dans l'analyse de la stabilité des pentes ou d'autres projets nécessitant de faire une analyse de stabilité, la résistance au cisaillement maximale est généralement adoptée comme un paramètre essentiel pour ce genre d'étude.

### 6.2.2.1 Effet de la chaux

La stabilisation avec l'addition de la chaux seule des deux sols argileux en absence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  fait apporter un effet bénéfique sur la variation temporelle de la cohésion. D'autre part, la cohésion augmente considérablement avec l'augmentation de la teneur en chaux et de la période de cure, notamment, à long terme. Cette augmentation est plus prononcée pour le SR que pour le SG. Par exemple, la cohésion développée par le SG traité avec 8% de chaux est de 56.1 KPa au bout de 7 jours de cure puis, elle augmente jusqu'à 148.5 et 256.9 KPa après 30 et 120 jours de cure, respectivement (Fig. 6.3a). Cependant, pour la même teneur en chaux, la cohésion produite par le SR est de 95.8 KPa après 7 jours de cure puis, elle augmente jusqu'à 166.7 et 343.4 KPa au bout de 30 et 120 jours de cure, respectivement (Fig. 6.3b). Un comportement similaire a été observé par Gay and Schad. (2000) et Harichane et al. (2011a). L'augmentation de la cohésion avec la teneur en chaux additionnée est attribuée à l'adhésion des particules argileuses entre elles tout en formant des agrégats plus gros et fortement liés (Ola, 1978). Harichane et al. (2011a) ont rapporté que ce comportement est probablement dû à l'effet d'auto-durcissement lié à la chaux, ça d'une part. D'autre part, ceci peut être attribué à la cimentation et aux réactions pouzzolaniques qui se produisent au fil du temps (Lees et al., 1982; Bell, 1989).



**Fig. 6.3** — Effet de différents pourcentages de chaux, de PN et de L-PN sur la cohésion des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): SG, (b): SR.

### 6.2.2.2 Effet de la PN

Il est à observer que l'effet de la pouzzolane naturelle sur la cohésion des deux sols argileux étudiés est marginal même avec la période de cure. La pouzzolane naturelle se comporte comme un sol naturel en absence d'un élément activateur des réactions pouzzolaniques. En concluant que la pouzzolane naturelle n'est pas recommandée d'être utilisée toute seule en tant que stabilisant (Fig. 6.3a et b).

### 6.2.2.3 Effet combiné de chaux-PN

Dans le cas où la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées, l'effet provoqué se multiplie par rapport à l'utilisation de la chaux seule, en particulier, à long terme. Par exemple, la cohésion du SG traité avec la combinaison de 10% de pouzzolane naturelle et 4% de chaux était de 96.8 KPa après 7 jours de cure mais, elle augmente jusqu'à 274 KPa au bout de 120 jours de cure (Fig. 6.3a). Cependant, pour un traitement avec la même combinaison (10%PN+4%L), la cohésion du SR était de 131.4 KPa pour 7 jours de cure puis, elle devient 344.1 KPa après 120 jours de cure (Fig. 6.3b). De plus, la cohésion des deux sols argileux augmente lorsque la quantité de chaux-pouzzolane naturelle additionnée augmente à savoir que cette augmentation est plus prononcée pour le SR que pour le SG.

### 6.2.3 Effet des additifs sur l'angle de frottement interne

Les résultats de l'effet de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leurs combinaisons sur la variation temporelle de l'angle de frottement interne des deux sols argileux traités en absence des sulfates sont illustrés dans la Figure 6.4.

#### 6.2.3.1 Effet de la chaux

Pour les deux sols argileux, l'angle de frottement interne augmente avec la période de cure et la teneur en chaux additionnée. Cependant, des augmentations assez faibles dans les valeurs de l'angle de frottement interne des deux sols argileux ont été enregistrées après 7 et 30 jours de cure. Par contre, des augmentations significatives ont été observées à partir de 60 jours de cure à savoir que cette augmentation est plus prononcée pour le SG que pour le SR, particulièrement, à long terme. Cependant, Sezer et al. (2006) ont utilisé une forte teneur de chaux-cendres volantes en tant que stabilisant dont ils ont conclu que l'augmentation de l'angle de frottement interne est probablement due au fait que les cendres volantes ont un angle de frottement interne bien plus élevé que celui du sol non traité.

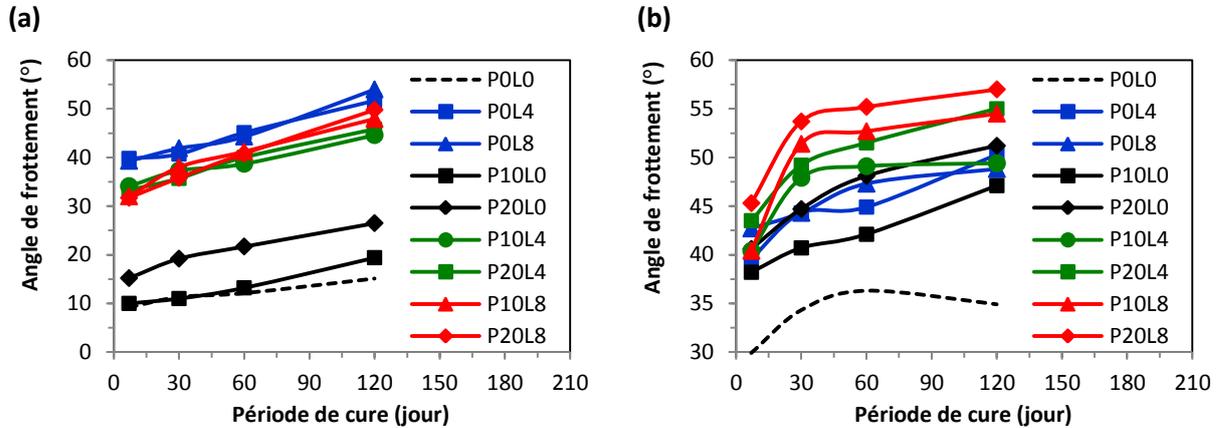
#### 6.2.3.2 Effet de la PN

En général, pour les deux sols argileux étudiés, la stabilisation avec l'utilisation de la pouzzolane naturelle seule fait provoquer un effet marginal sur l'angle de frottement interne même pour un traitement à très long terme.

#### 6.2.3.3 Effet combiné de chaux-PN

Pour les échantillons du SR stabilisé avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle, nous constatons qu'il y a une augmentation significative de l'angle de frottement interne après

7 et 30 jours de cure. Cependant, un effet marginal a été observé au-delà de 30 jours de cure. Par exemple, l'angle de frottement interne développé par le SG traité avec la combinaison de 20%PN+8%L est de  $31.7^\circ$  et  $35.8^\circ$  respectivement avec 7 et 30 jours de cure mais, il augmente jusqu'à  $40.8$  et  $49.8^\circ$  après 60 et 120 jours de cure, respectivement (Fig. 6.4a).



**Fig. 6.4** — Effet de différents pourcentages de chaux, de PN et de L-PN sur l'angle de frottement interne des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): SG, (b): SR.

Cependant, pour un traitement avec la même combinaison, la cohésion produite par le SR est de  $45.3^\circ$  et  $53.7^\circ$  respectivement avec 7 et 30 jours de cure mais, il augmente jusqu'à  $55.2$  et  $57^\circ$  après 60 et 120 jours de cure, respectivement (Fig. 6.4b). D'autre part, pour le cas du SG, l'angle de frottement interne augmente avec la période de cure et en particulier à très long terme. Harichane et al. (2011a) ont indiqué que l'amélioration de la cohésion et de l'angle de frottement interne peut être due à l'activité pouzzolanique et à la propriété de l'auto-cimentation du mélange chaux-pouzzolane naturelle. Il est donc clair de constater que la floculation des particules augmente la valeur de l'angle de frottement interne alors que la cimentation de particules augmente la valeur de la cohésion.

### 6.3 Résistance au cisaillement des sols traités avec sulfates

#### 6.3.1 Effet du $\text{CaSO}_4$ sur la résistance au cisaillement

Les résultats de l'effet du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sur la variation temporelle de la résistance au cisaillement maximale des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont montrés dans les Figures 6.5–6.7.

##### 6.3.1.1 Cas du traitement à la chaux

Lorsque le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  se présente avec une faible teneur, l'addition de la chaux seule fait augmenter considérablement la résistance au cisaillement des deux sols argileux étudiés

notamment avec la période de la cure. Le même comportement a été observé à court terme lorsque le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  se présente avec une forte teneur où la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Ainsi, pour les deux sols argileux, la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et de la période de cure à savoir que cette augmentation est très prononcée avec le SR qu'avec le SG.

### 6.3.1.2 Cas du traitement avec la PN

Pour une faible teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , l'utilisation de la pouzzolane naturelle seule fait apporter un effet négligeable sur la variation temporelle de la résistance au cisaillement avec la période de cure mais, elle diminue avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ .

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

Les meilleurs résultats de la résistance au cisaillement ont été achevés lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées. Avec une faible teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , l'utilisation de la chaux seule en tant que stabilisant fait augmenter significativement la résistance au cisaillement des deux sols argileux étudiés particulièrement avec la période de la cure. Un comportement similaire a été observé à très court terme lorsque le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  se présente avec une forte teneur où la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Ainsi, pour les deux sols argileux traités, la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et de la période de cure à savoir que cette augmentation est très prononcée avec le SR qu'avec le SG. D'après Aldaood et al. (2014a), l'augmentation significative de la résistance au cisaillement des deux sols argileux stabilisés avec la chaux seule ou combinée avec la pouzzolane naturelle est due à la présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  qui fait accélérer la réaction chimique entre le sol et la chaux. De plus, l'augmentation de la résistance au cisaillement des deux sols argileux en présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  peut être expliquée par la formation de l'ettringite expansive.

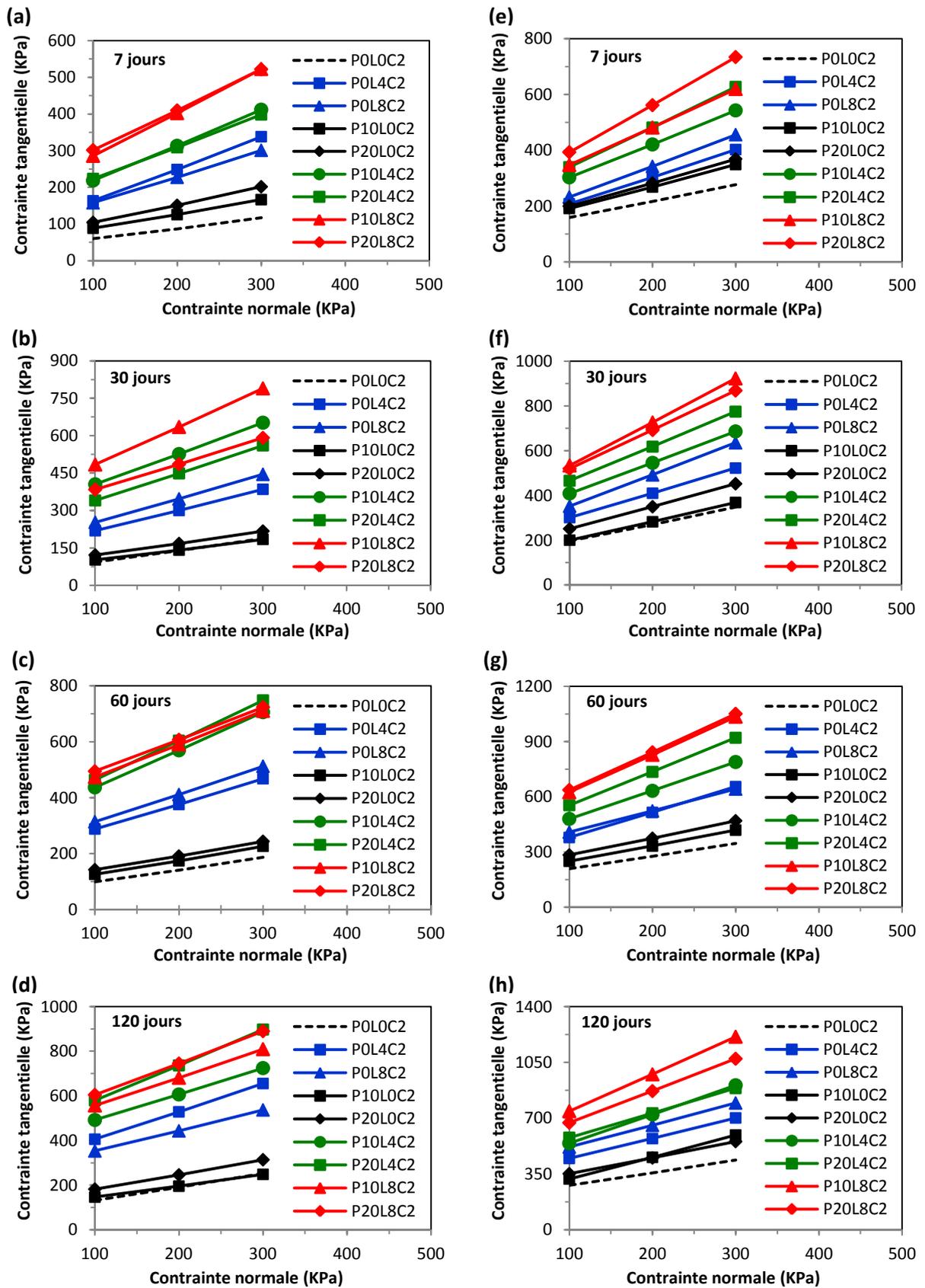


Fig. 6.5 — Effet de 2% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.

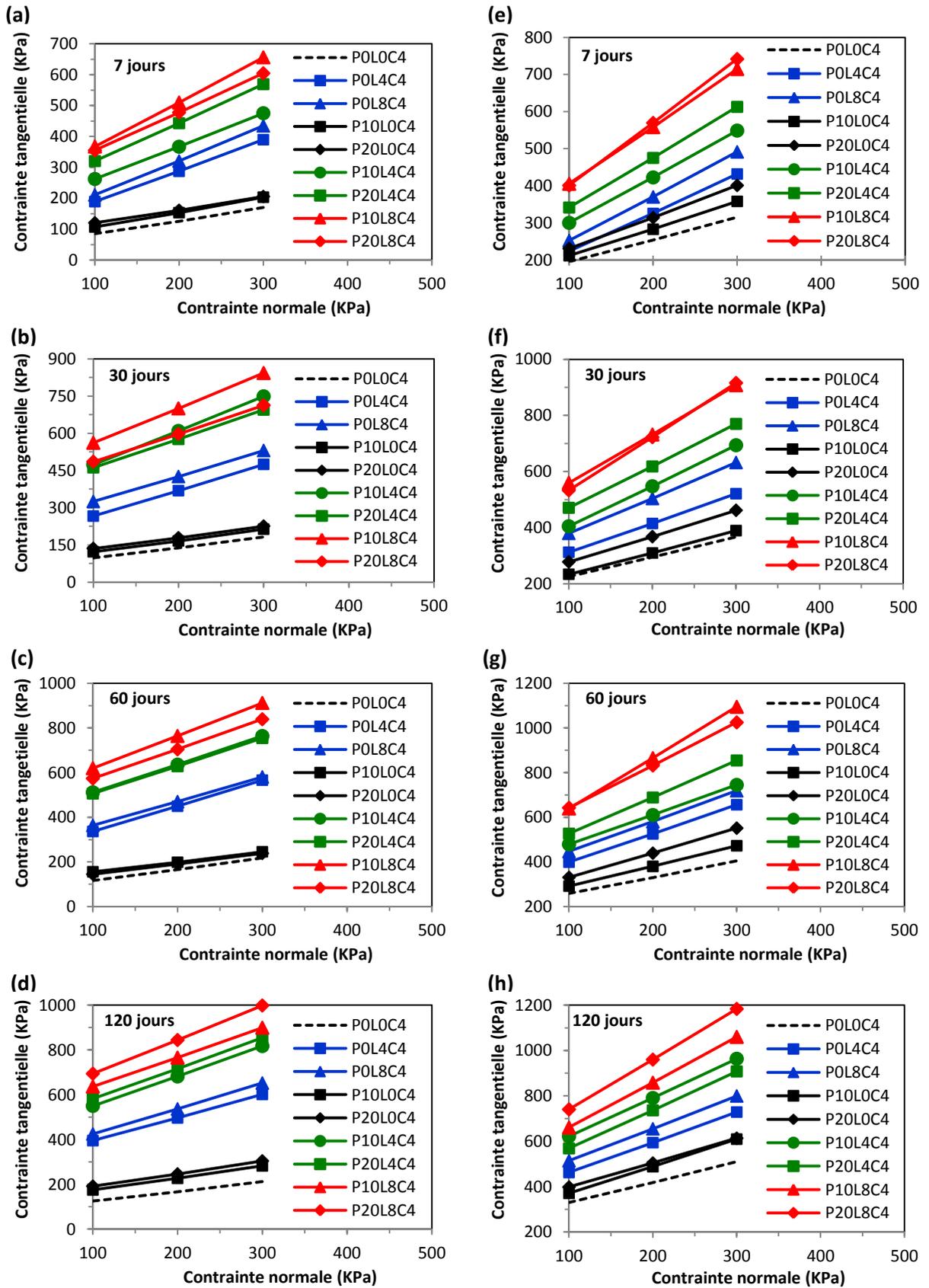


Fig. 6.6 — Effet de 4% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.

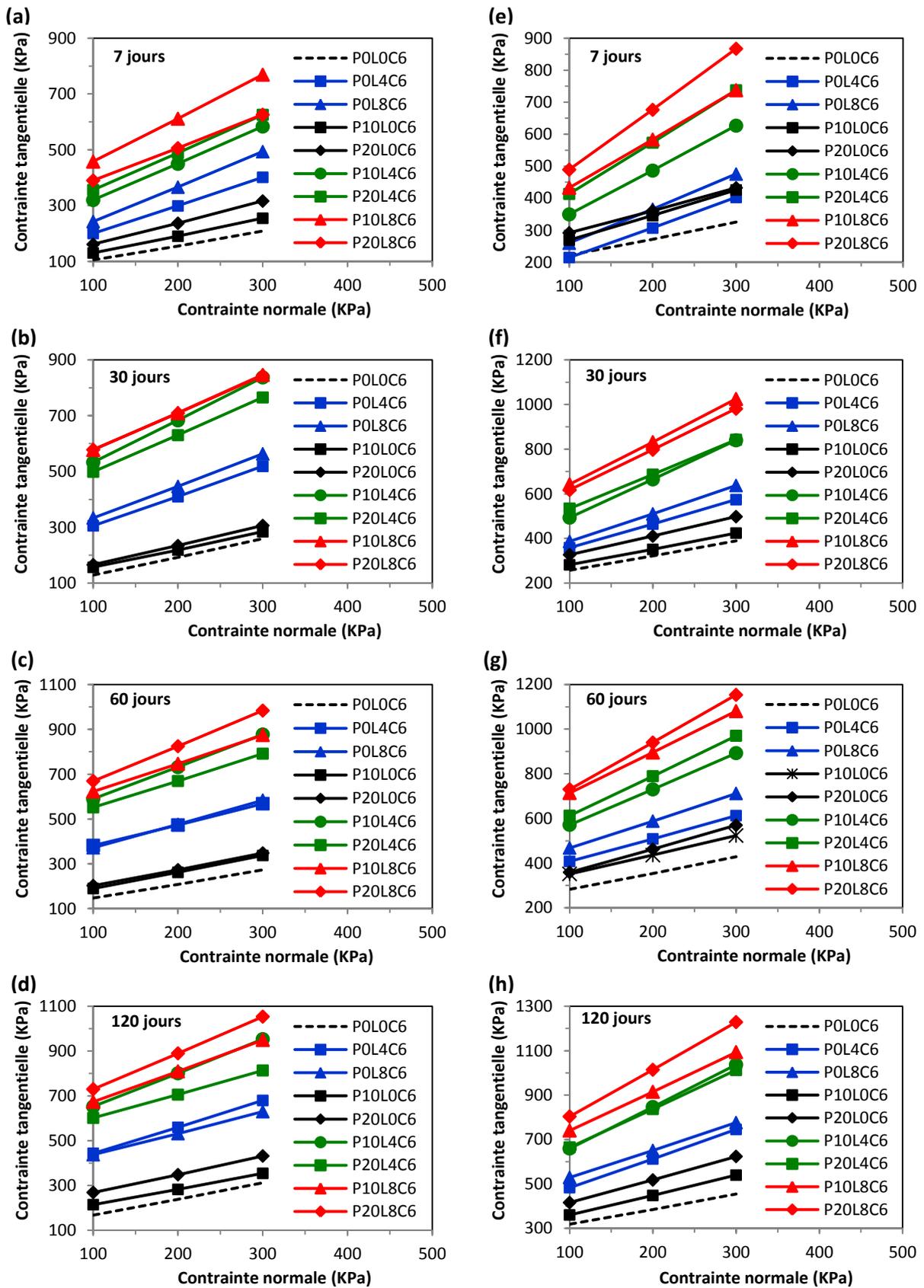


Fig. 6.7 — Effet de 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.

### 6.3.2 Effet du $\text{Na}_2\text{SO}_4$ sur la résistance au cisaillement

Les résultats de l'effet de différents dosages du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la variation temporelle de la résistance au cisaillement maximale des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont reportés sur les Figures 6.8–6.10.

#### 6.3.2.1 Cas du traitement à la chaux

Dans le cas où le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  se présente avec une faible teneur (2%) dans les échantillons des deux sols argileux étudiés, l'addition de chaux seule dans les deux sols fait augmenter considérablement la résistance au cisaillement et notamment avec la période de cure. Le même comportement a été observé à court terme (7 à 30 jours) pour des teneurs supérieures à 2% en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  où la résistance au cisaillement augmente avec l'augmentation de la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Cela est lié à la présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dans le sol stabilisé tout en faisant transformer la chaux additionnée en forme de gypse insoluble et de l'hydroxyde de sodium et ainsi de réduire la quantité de chaux disponible pour les réactions avec le sol. Cependant, la présence d'hydroxyde de sodium augmente le pH et en provoquant la dissolution d'une grande quantité d'alumine et de silice qui rentrent en réaction avec la chaux restante pour former des produits cimentaires. Ce processus chimique explique clairement l'augmentation significative de la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés à court terme (Sridharan et al., 1995). Ainsi, pour les deux sols argileux et après 30 jours de cure, la résistance au cisaillement décroît avec la période de cure et la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  à l'exception des échantillons traités en présence de 2% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . En revanche, pour le cas du SR traité à la chaux seule, les échantillons sont entièrement altérés après 30 et 60 jours de cure en présence de 6 et 4% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , respectivement.

#### 6.3.2.2 Cas du traitement avec la PN

Pour une faible teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (2%), la pouzzolane naturelle ne fait provoquer qu'un effet négligeable sur la résistance au cisaillement même avec la période de cure. Il est à constater que la résistance au cisaillement diminue avec l'augmentation de la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  à l'exception du cas du SR où tous les échantillons traités ont été complètement altérés après les périodes de cures de 30 et 60 jours de cure en présence de 6 et 4% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , respectivement.

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

D'ailleurs, l'augmentation de la résistance au cisaillement est significativement importante lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées. Les échantillons stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle ont pu résister à la dégradation causée par l'ettringite par rapport aux échantillons traités avec l'addition de chaux ou de la pouzzolane naturelle toute seule. Par comparaison, quelque soit le type du traitement, les valeurs de la résistance au cisaillement développées par le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sont bien plus élevées que celles développées par le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

L'augmentation précoce de la résistance au cisaillement en présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  peut s'expliquer par la formation de l'ettringite qui fait diminuer la résistance du SG et détruire les éprouvettes du SR stabilisé. En effet, Shi and Day. (2000b) ont confirmé qu'en présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , la réaction augmente la valeur du pH dans le sol à savoir que la dissolution du  $\text{SiO}_2$  amorphe est très forte pour un pH supérieur 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 du sol. De plus, l'accélération de la dissolution de la pouzzolane naturelle est contrôlée par l'accélération des réactions pouzzolaniques. 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 ( $[\text{SiO}(\text{OH})_3]^-$ ) et l'hydroxyde d'aluminium ( $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ ). Lorsque les ions de calcium contactent ces espèces dissoutes de monosilicates et d'aluminates, les composés de C-S-H et  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$  se forment. Dans le même temps, l'introduction du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  fait augmenter la concentration des ions du  $\text{SO}_4^{2-}$  et conduire à la formation d'ettringite tout en densifiant la structure et en augmentant, ou voire détruire, la résistance du sol stabilisé. Ils ont rapporté dans leur étude que l'ettringite peut augmenter le volume solide de 164% alors que les composés de C-S-H font l'augmenter seulement de 17,5 %. Les mécanismes de stabilisation et de perturbation du processus de stabilisation qui peuvent se produire dans le système Sol-Chaux-PN- $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sont présentés dans le chapitre 5 précédent.

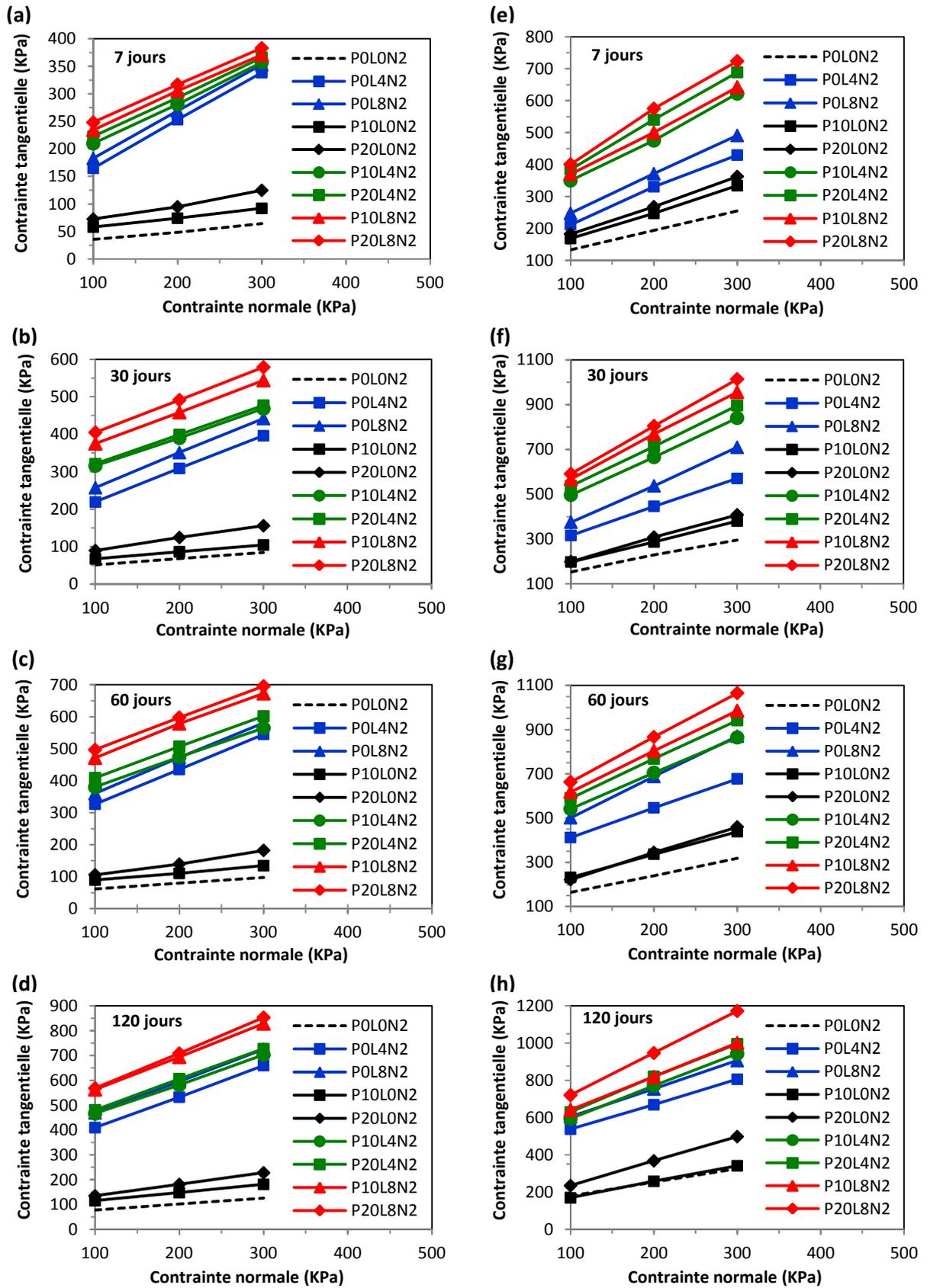


Fig. 6.8 — Effet de 4% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.

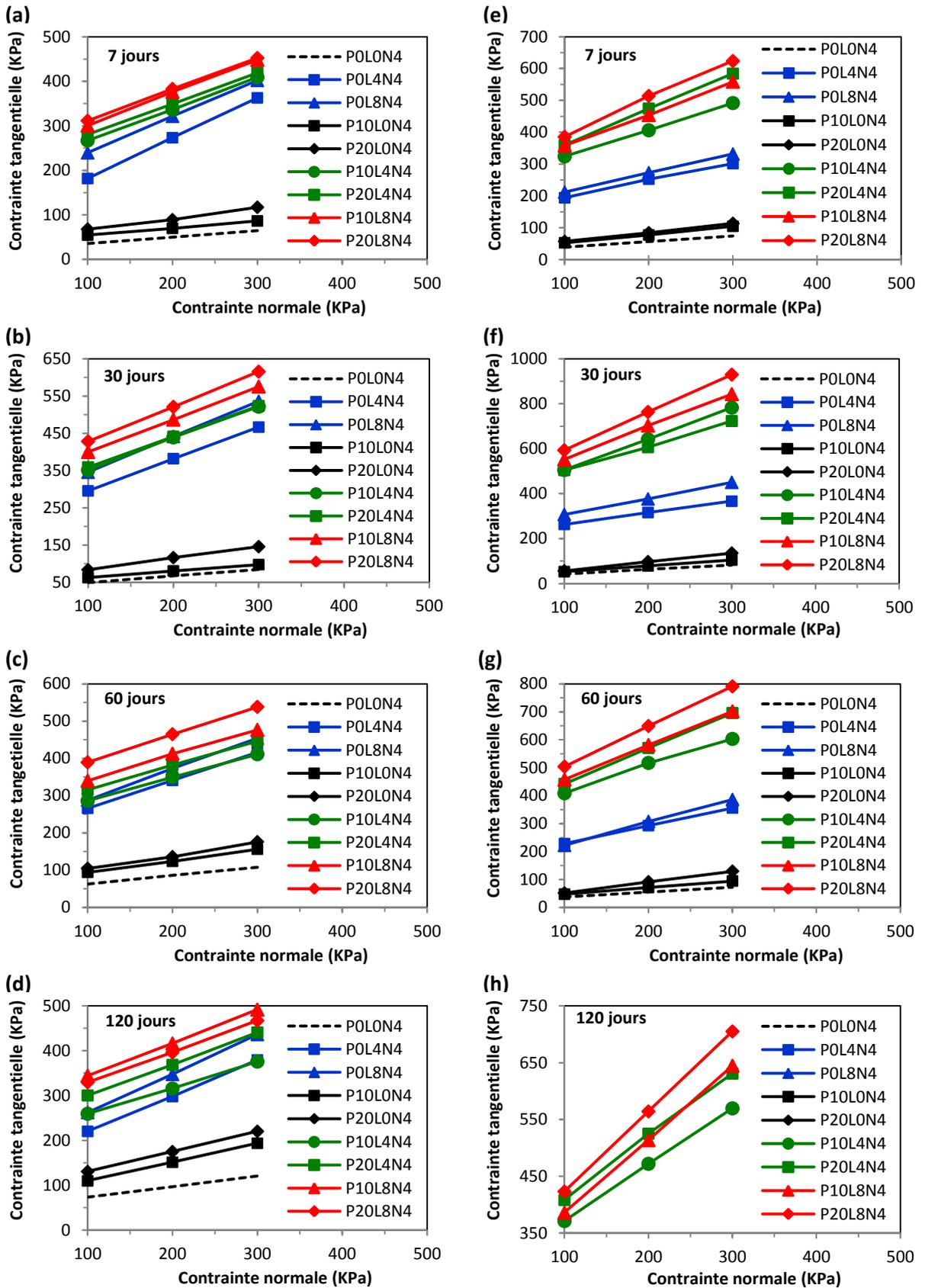


Fig. 6.9 — Effet de 4% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.

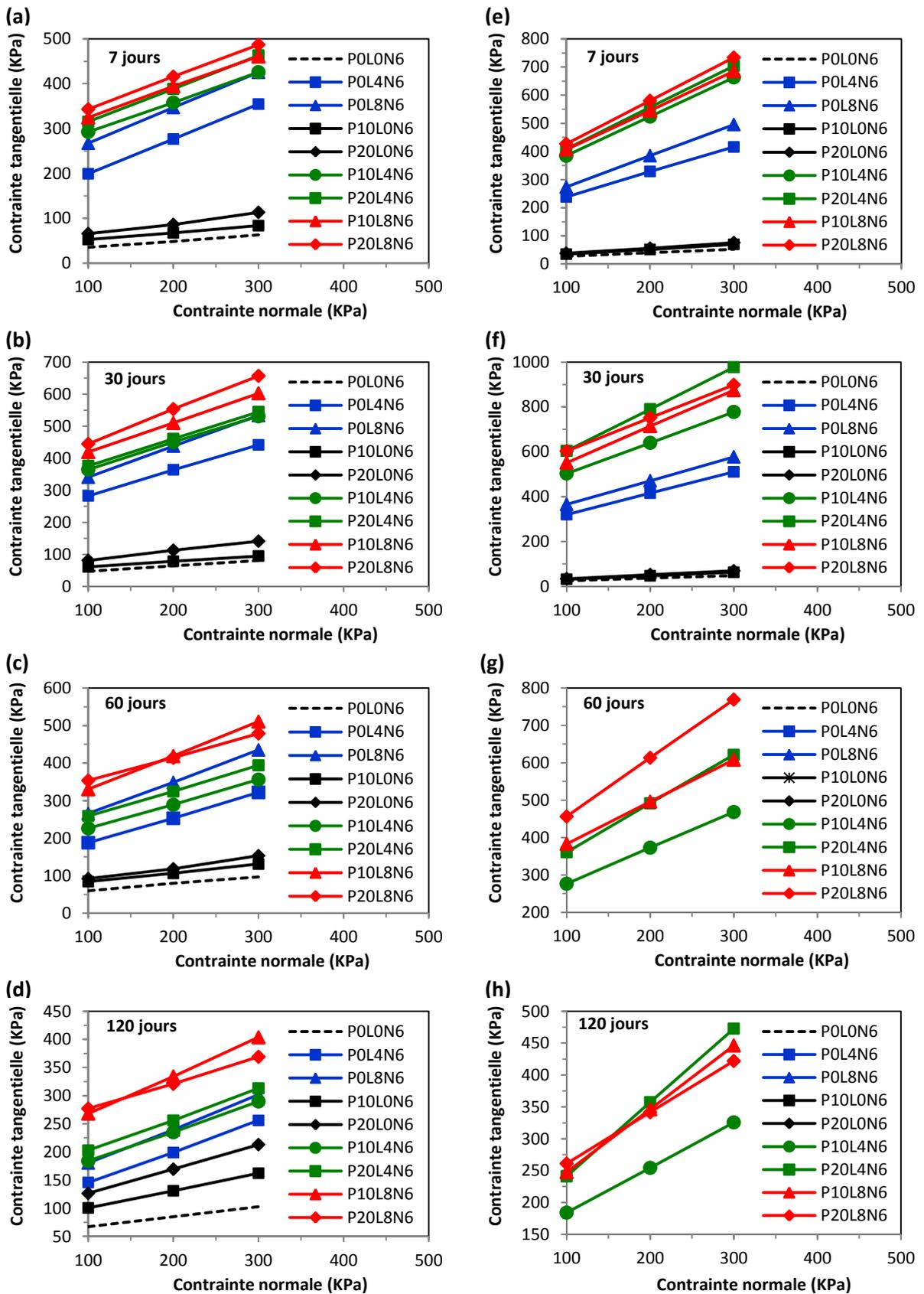


Fig. 6.10 — Effet de 6% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la résistance au cisaillement des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-d): SG, (e-h): SR.

### 6.3.3 Effet du $\text{CaSO}_4$ sur la cohésion

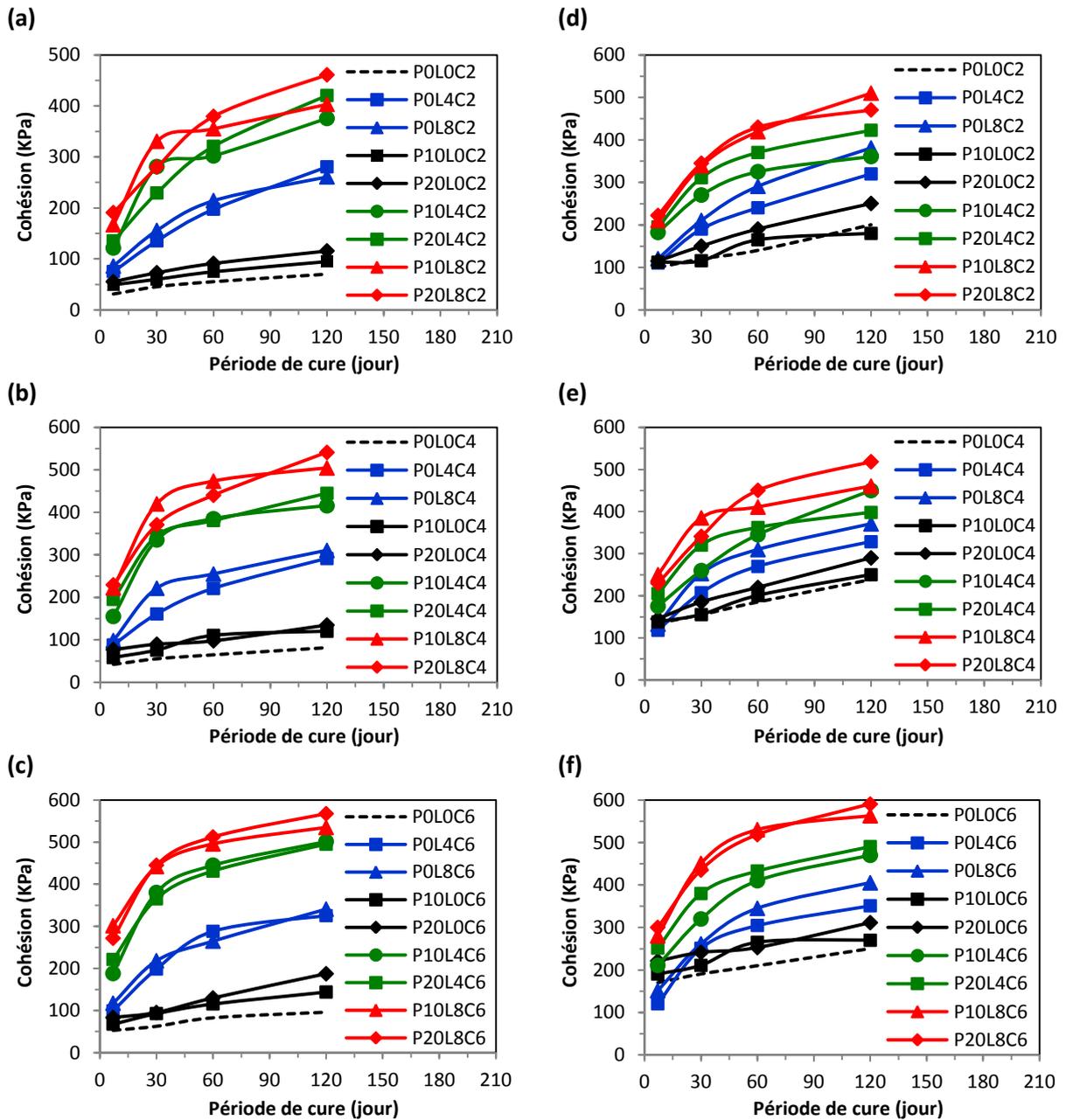
Les résultats de l'effet de différents pourcentages du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sur la cohésion des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont reportés sur la Figure 6.11.

#### 6.3.3.1 Cas du traitement à la chaux

La cohésion augmente de manière significative avec la période de cure et en particulier au-delà de 30 jours de cure lorsque la chaux est ajoutée toute seule aux deux sols argileux traités en présence d'une faible teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Par exemple, pour 2% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , la cohésion du SG stabilisé avec 8% de chaux était de 85.9 KPa au bout 7 jours de cure alors qu'elle augmente jusqu'à 260.9 KPa après une cure 120 jours (Fig. 6.11(a-c)). En revanche, pour une même teneur en chaux, la cohésion du SR était de 120.4 KPa au bout de 7 jours de cure alors qu'elle augmente jusqu'à 381 KPa après 120 jours de cure (Fig. 6.11(d-f)). Cependant, si la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  est supérieure à 2%, la cohésion des deux sols argileux stabilisés augmente fortement avec la période de cure et notamment à très long terme. En général, la cohésion des deux sols argileux augmente avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et de la période de cure.

#### 6.3.3.2 Cas du traitement avec la PN

Pour les deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle seule et lorsque le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  se présente avec une faible teneur, il a été constaté qu'il y a eu une augmentation significative de la variation temporelle de la cohésion et notamment avec la période de cure. Cependant, à très court terme, la cohésion des deux sols argileux augmente avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et de la période de cure. Il est donc très clair que l'augmentation de la cohésion en présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  se traduit par l'amélioration de la résistance des deux sols stabilisés. La cohésion des éprouvettes des deux sols argileux non traités ou traités avec l'addition de la pouzzolane naturelle seule a été significativement améliorée en présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et en particulier avec une forte teneur en sulfate utilisé. Pour le moment, il n'est pas possible d'expliquer cette augmentation parce qu'elle n'est certainement pas liée à la formation éventuelle de l'ettringite dans les échantillons des deux sols stabilisés. Ces observations ont été confirmées par des analyses de DRX reportées sur les Figures 5.2(f) et 5.3(f) (déjà citées au Chapitre 5). En outre, l'augmentation de la cohésion a été fortement marquée dans le SR que dans le SG et en particulier à long terme.



**Fig. 6.11** — Effet de différents teneurs en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sur la cohésion des sols argileux stabilisé par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

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

L'addition de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle aux deux sols argileux en présence d'une faible teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  fait augmenter leur cohésion de manière significative avec la période de cure et notamment à partir de 60 jours. Par exemple, en présence de 2% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , la cohésion des SG et SR stabilisés avec la combinaison de 20%PN+8%L peut atteindre des valeurs de 461 et 470.6 KPa au bout de 120 jours de cure, respectivement. Cependant, pour les sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en présence de fortes teneurs en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (plus 2%), la cohésion

augmente considérablement avec la période de cure et en particulier à très long terme. Par exemple, en présence de 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , la cohésion des SG et SR stabilisés avec la même combinaison (20%PN+8%L) peut atteindre des valeurs de 567.5 et 590.4 KPa au bout de 120 jours de cure, respectivement.

En général, la cohésion des deux sols argileux stabilisés augmente avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  additionnée et de la période de cure. A court terme, l'augmentation de la cohésion et par conséquent la résistance au cisaillement peut être expliquée par la présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  qui fait accélérer la réaction chimique entre le sol et la chaux (Aldood et al., 2014a). A long terme, l'augmentation de la résistance au cisaillement est certainement liée à la formation d'ettringite qui est confirmée par des analyses de DRX (Figures 5.2(d) et 5.3(d)).

### 6.3.4 Effet du $\text{Na}_2\text{SO}_4$ sur la cohésion

Les résultats de l'effet apporté par le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la variation temporelle de la cohésion des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont présentés dans la Figure 6.12.

#### 6.3.4.1 Cas du traitement à la chaux

D'ailleurs, l'addition de la chaux seule aux deux sols argileux traités en présence d'une faible teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  fait augmenter considérablement leur cohésion avec la cure et en particulier au-delà de 60 jours de cure. Par exemple, la cohésion du SG stabilisé avec 8% de chaux est estimée à 98.4 KPa au bout de 7 jours de cure mais, elle augmente jusqu'à 340.9 KPa au bout de 120 jours de cure (Fig. 6.12(a-c)). En revanche, avec la même teneur en chaux, la cohésion du SR est estimée à 126.4 KPa au bout de 7 jours de cure mais, elle devient 453.3 KPa après 120 jours de cure (Fig. 6.12(d-f)).

De plus, après 30 jours de cure, la cohésion des échantillons du SG contenant plus de 2% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  décroît avec l'augmentation de la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et de la période de cure. Cependant, après 30 et 60 jours de cure, les échantillons du SR sont entièrement altérés en présence de 6 et 4% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , respectivement. Cette altération peut s'expliquer par l'augmentation de la teneur en  $\text{SO}_4^{2-}$  en faisant favoriser la formation d'une grande quantité d'ettringite qui est la cause de l'altération des propriétés du sol traité. En outre, Mehta (1983) a rapporté que l'adsorption du sulfate sur la surface des C-S-H a provoqué une diminution de la résistance causée par la réduction de la capacité de cimentation.

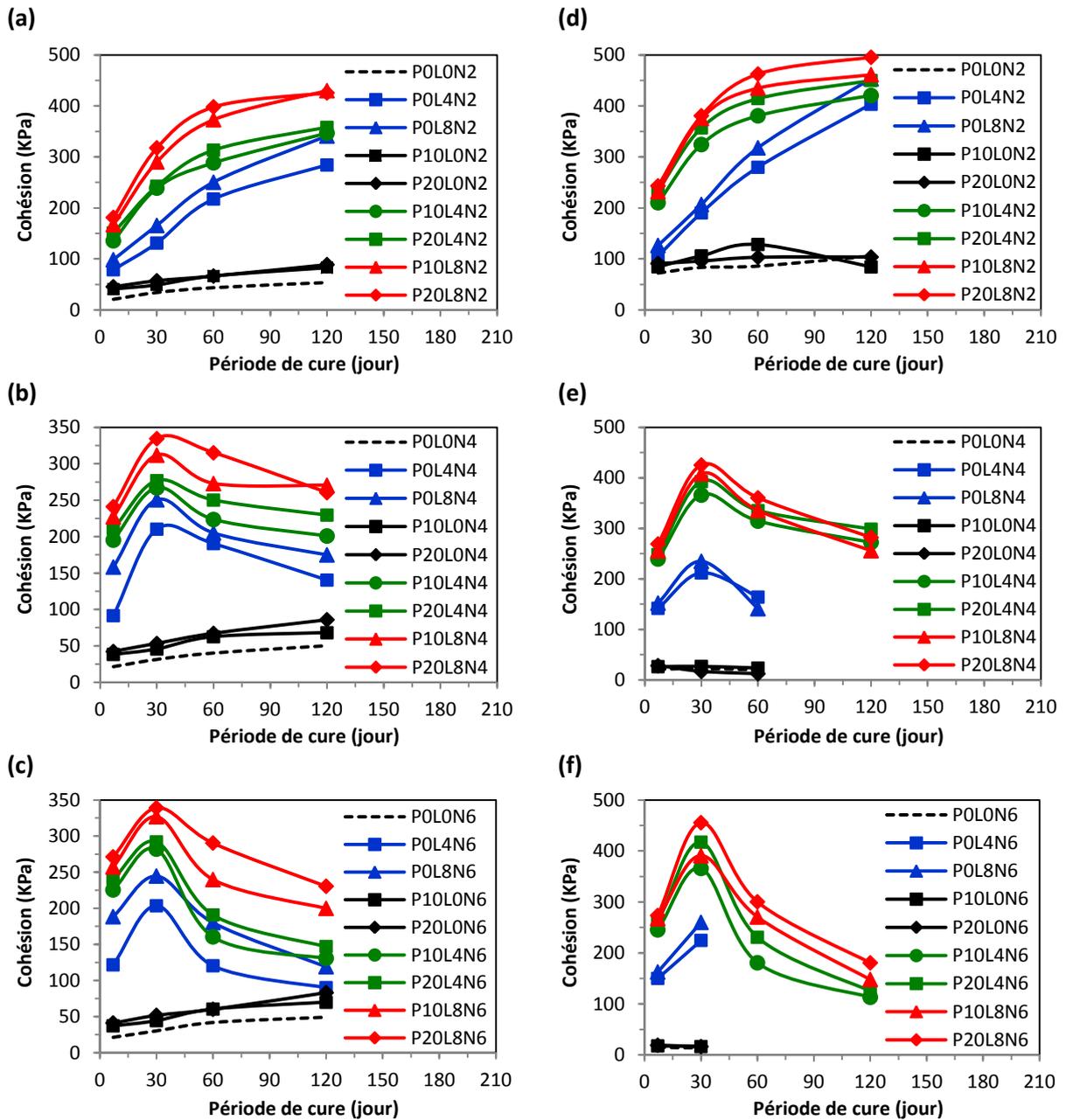


Fig. 6.12 — Effet de différents teneurs en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la cohésion des sols argileux stabilisé par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

### 6.3.4.2 Cas du traitement avec la PN

La figure 6.12 montre une augmentation négligeable de la cohésion avec la période de cure lorsque le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  se présente avec une faible teneur (2%) dans les échantillons des deux sols argileux stabilisés avec l'addition seule de la pouzzolane naturelle. Cependant, à court terme la cohésion des deux sols argileux stabilisés augmente avec la période de cure et elle diminue avec l'augmentation de la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Il est à signaler que pour le cas du SR, nous constatons que tous les échantillons des deux sols argileux traités sont complètement dégradés après des périodes de cure de 30 et 60 jours en présence de 6 et 4% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,

respectivement. La diminution de la cohésion des deux sols traités est reflétée par la diminution de la résistance au cisaillement qui est probablement attribuée à la présence du sulfate qui fait empêcher la cimentation des particules d'argiles et en favorisant la formation d'ettringite extrêmement expansive.

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

D'ailleurs, l'addition de la chaux en combinaison avec la pouzzolane naturelle aux deux sols argileux traités en présence d'une faible teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  fait augmenter considérablement leur cohésion avec la cure et en particulier au-delà de 60 jours de cure. En effet, l'augmentation de la cohésion devient plus importante lorsqu'on combine 8% de chaux avec 20% de pouzzolane naturelle. Par exemple, la cohésion des SG et SR stabilisés avec la combinaison de 20%PN+8%L peut développer des valeurs de 425.7 et 495.4 KPa au bout de 120 jours de cure, respectivement (Fig. 6.12(a-f)). Ce comportement est attribué à l'amélioration des réactions de la chaux par l'augmentation de la teneur en silice en raison de l'augmentation du pH (Davidson et al., 1960). En revanche, la cohésion des deux sols argileux stabilisés en présence de 4 et 6% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  augmente rapidement jusqu'à 30 jours de cure, au-delà de cette période, la cohésion commence à décroître progressivement avec des valeurs comparables à celles développées par les échantillons traités avec la pouzzolane naturelle seule.

Il est à noter que l'utilisation de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour un traitement des sols argileux riches en sulfates est fortement recommandée puisqu'elle résiste aux dommages structuraux causés par la formation de nouvelles phases expansives comme l'ettringite et/ou de la thaumasite. Par comparaison, quelque soit le types du traitement, les valeurs de la cohésion développées par le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sont bien plus élevées que celles développées par le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

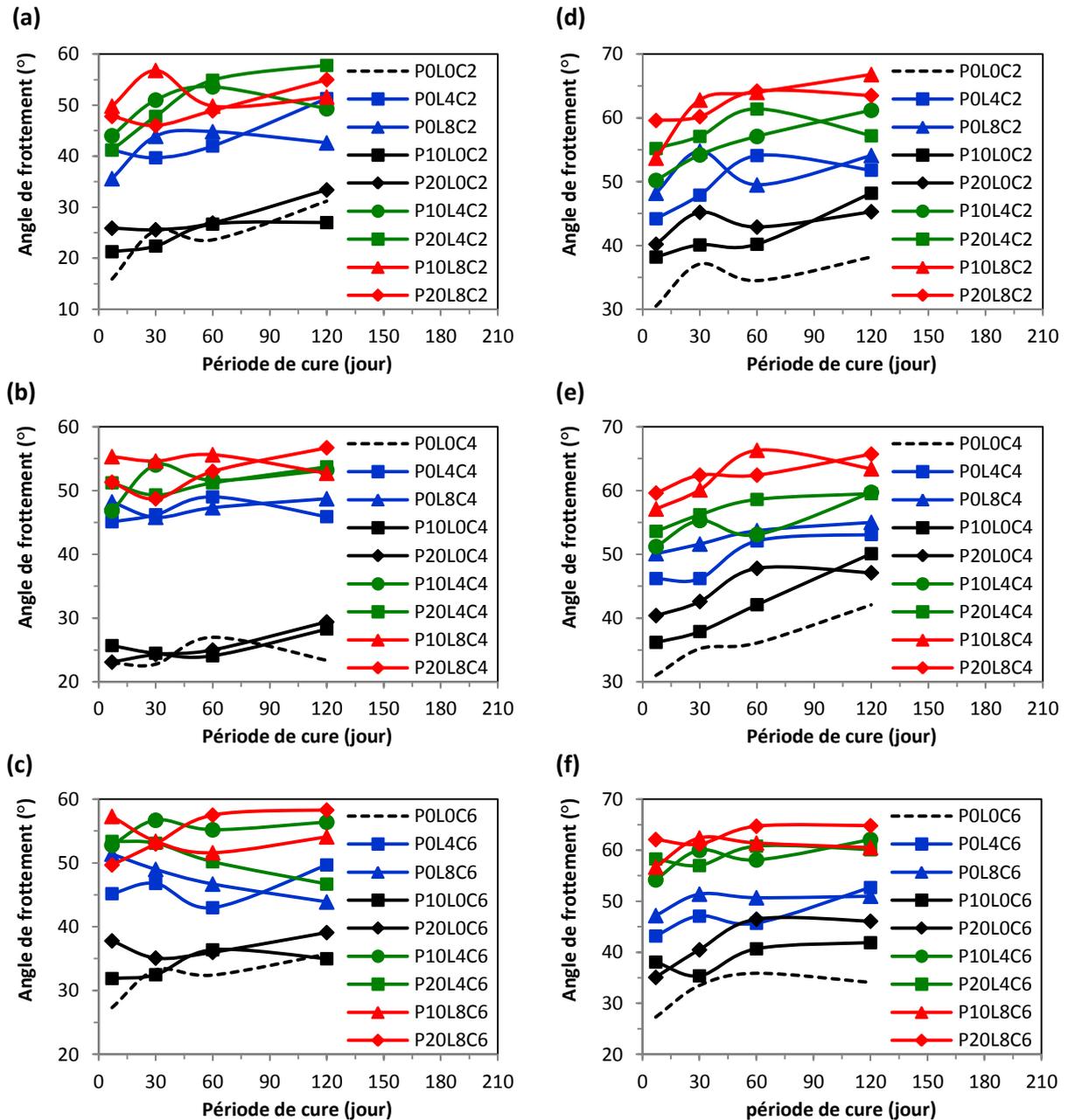
#### 6.3.5 Effet du $\text{CaSO}_4$ sur l'angle de frottement interne

Les résultats de l'effet engendré par le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sur la variation temporelle de l'angle de frottement interne des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont illustrés dans la Figure 6.13.

##### 6.3.5.1 Cas du traitement à la chaux

L'angle de frottement interne des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux augmente considérablement avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et de la période de cure, en particulier, à très long terme. Par exemple, avec 2% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ,

l'angle de frottement interne du SG stabilisé avec 8% de chaux est estimé à 35.6° au bout de 7 jours de cure mais, il augmente jusqu'à 42.6° après 120 jours de cure (Fig. 6.13(a-c)). En revanche, pour une même teneur en chaux additionnée, l'angle de frottement interne du SR est estimé à 48.2° au bout de 7 jours de cure et il devient 54.1° après 120 jours de cure (Fig. 6.13(d-f)).



**Fig. 6.13** — Effet de différentes teneurs en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  sur l'angle de frottement interne des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

### 6.3.5.2 Cas du traitement avec la PN

En général, l'angle de frottement interne des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle seule augmente progressivement avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et de la période de cure. Par comparaison, l'angle de frottement interne des deux sols argileux stabilisés avec 20% de pouzzolane naturelle est bien plus grand que celui des sols non traités. Ce comportement est probablement lié au fait que la pouzzolane naturelle possède un angle de frottement interne bien plus élevé que celui du sol non traité.

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

L'angle de frottement interne des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle augmente significativement avec l'augmentation de la teneur en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  et de la période de cure, en particulier, à très long terme. Par exemple, avec 2% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , l'angle de frottement interne des SG et SR stabilisés avec la combinaison de 20%PN+8%L peut développer des valeurs de 55 et 63.5° au bout de 120 jours de cure, respectivement. De plus, l'angle de frottement interne des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle, en présence des teneurs en  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  supérieures à 2% augmente avec la période de cure, en particulier, à très long terme. Par exemple, en présence de 6% du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , l'angle de frottement interne des SG et SR stabilisés avec la combinaison de 20%PN+8%L peut développer des valeurs de 58.3 et 64.8° au bout de 120 jours de cure, respectivement.

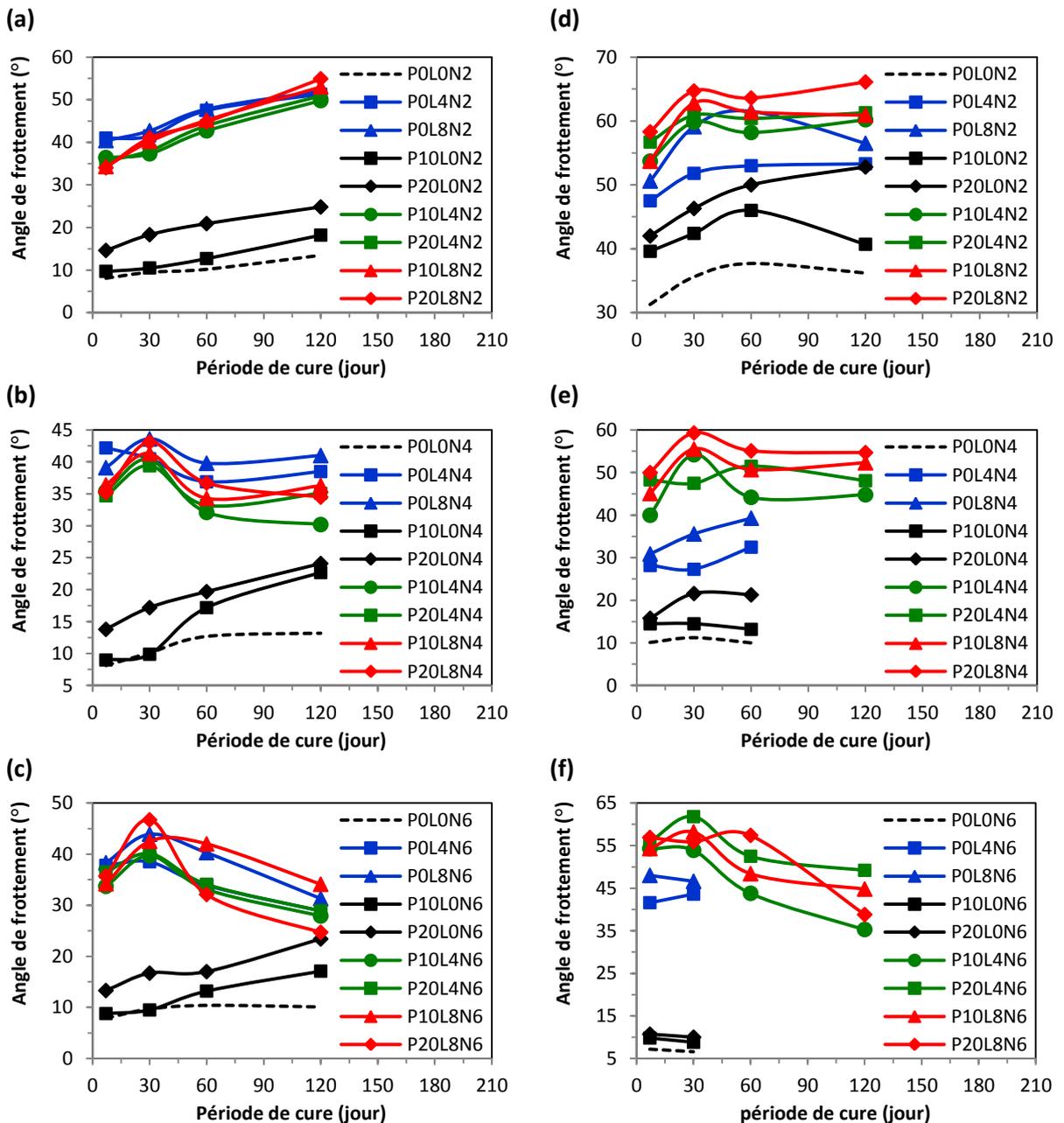
Il est à observer que l'angle de frottement interne des échantillons des deux sols argileux stabilisés à la chaux seule ou combinée avec la pouzzolane naturelle en présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  augmente avec l'augmentation de la cohésion (Fig. 6.13(a-f)). En général, les plus grandes valeurs de l'angle de frottement interne sont aussi couplées avec des grandes valeurs de cohésion. Ce comportement est probablement dû aux grandes charges normales utilisées lors de l'essai de cisaillement direct qui font augmenter la compressibilité de la structure du sol tout en activant les propriétés de frottement entre les composés cimentaires et les particules de sol qui conduisent à une forte augmentation de l'angle de frottement interne.

### 6.3.6 Effet du $\text{Na}_2\text{SO}_4$ sur l'angle de frottement interne

Les résultats de l'effet apporté par le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur la variation temporelle de l'angle de frottement interne des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison sont illustrés dans la Figure 6.14.

### 6.3.6.1 Cas du traitement à la chaux

En présence de 2% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , l'angle de frottement interne des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux seule augmente considérablement avec la période de cure. Cependant, au-delà de 2% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , l'angle de frottement interne du SG stabilisé avec l'addition de la chaux seule augmente considérablement avec la période de cure jusqu'à 30 jours mais, elle diminue significativement après cette période de cure.



**Fig. 6.14** — Effet de différentes teneurs en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur l'angle de frottement interne des sols argileux stabilisés par des additifs (L, PN et L-PN) pour différentes périodes de cure, (a-c): SG, (d-f): SR.

En revanche, à court terme et lorsque la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  est supérieure à 2%, les valeurs de l'angle de frottement interne des échantillons du SR stabilisé avec l'addition de la chaux seule

s'annulent après 30 et 60 jours de cure en présence de 6 et 4% en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , respectivement. Il est à noter que l'utilisation de la chaux comme stabilisant dans un traitement des sols fins et très bénéfique quand la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  est inférieure à 2%.

#### 6.3.6.2 Cas du traitement avec la PN

L'angle de frottement interne des échantillons du SG traité avec l'addition de la pouzzolane naturelle augmente linéairement avec l'augmentation de la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , de la teneur en pouzzolane naturelle et de la période de cure. Le même comportement a été observé pour le SR quand la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  additionnée est égale à 2%. En outre, les échantillons du SR traité avec l'addition de la chaux montrent le même comportement que celui des échantillons traités avec la pouzzolane naturelle en présence de 4 et 6% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

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

Lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées, l'angle de frottement interne du SR augmente initialement d'une manière précoce jusqu'à 30 jours à savoir que cette augmentation est importante lorsque la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  augmente. Cependant, pour des teneurs de 4 et 6% du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , l'angle de frottement interne des deux sols argileux traités avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle présente une variation perturbée avec la cure, mais elle décroît avec l'augmentation de la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  après 30 jours de cure. Il est à signaler que les valeurs de l'angle de frottement interne sont optimales après 30 jours de cure quand la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  est supérieure à 2%.

## 6.4 Conclusion

Plusieurs essais ont été conduits au niveau du laboratoire afin 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 au cisaillement (la cohésion;  $C$  et l'angle de frottement interne;  $\phi$ ) des deux sols argileux (SG et SR) traités avec l'addition de la chaux (L), de la pouzzolane naturelle (PN) et de leur combinaison (L-PN). A partir des résultats des essais effectués, les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- La stabilisation à la chaux seule en absence des sulfates fait augmenter considérablement la résistance au cisaillement des deux sols argileux stabilisés. Cette augmentation est fonction de la teneur en chaux ajoutée et de la période de cure. Cependant, l'utilisation de la PN toute seule a provoqué une influence négligeable sur la résistance au cisaillement des deux sols argileux traités.

- Les meilleurs résultats de la résistance au cisaillement sont obtenus lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées. La combinaison de ces deux derniers additifs fait augmenter la résistance au cisaillement des deux sols argileux étudiés mieux que l'utilisation de la chaux toute seule.
- Avec la pouzzolane naturelle en tant qu'additif, une augmentation significative de la résistance au cisaillement 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 à la chaux en présence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ne montrent qu'une légère augmentation de la résistance au cisaillement par rapport aux échantillons des deux argileux sols traités en absence du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ . Ceci peut être expliqué par l'effet du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  qui présente l'aptitude de réduire la solubilité de la chaux hydratée dans les échantillons des deux sols argileux en tant que stabilisant.
- Pour les échantillons des deux sols argileux contenant du  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , il y a une meilleure augmentation de la résistance au cisaillement lorsque la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est utilisée.
- Les grandes valeurs de la résistance au cisaillement 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'amélioration de la résistance au cisaillement des deux sols argileux stabilisés avec la période de cure est attribuée à 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.
- En présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , les fortes valeurs initiales de la cohésion développées par les deux sols argileux à court terme peuvent être attribuées à l'accélération des réactions pouzzolaniques causées par l'hydroxyde de sodium provenant de l'addition du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .
- La dégradation totale des éprouvettes des deux sols argileux stabilisés pendant la cure et la diminution progressive de leurs cohésions peut s'expliquer par la formation d'ettringite favorisée par la présence du  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dans les mélanges de Sol-Chaux-PN. Cette modification est particulièrement importante lorsque la teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  augmente. Le taux de l'altération des éprouvettes des deux sols stabilisées dépend de plusieurs facteurs à savoir: la composition minéralogique du sol, le type et la teneur de l'additif utilisé, la teneur et le type du sulfate présent et enfin la période de cure.

- La stabilisation des sols riches en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  par la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est très efficace contre la dégradation des performances mécaniques causées par l'ettringite.
- La nature minéralogique du sol présente une importance capitale et joue un rôle très important dans la réussite ou à l'échec d'un traitement en dominant les effets eux-mêmes apportés par le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  sur les sols stabilisés.
- La présence d'une faible teneur en  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  dans les des deux sols argileux stabilisés par la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle fait augmenter leur résistance au cisaillement tout en résistant à l'altération causée par la formation de l'ettringite dans le cas où le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  se présente avec des teneurs supérieures à 2%.
- Il est important de classer le  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  comme un élément perturbateur du processus de la stabilisation du sol lorsque sa teneur est supérieure à 2% alors que le  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  peut être considéré comme un additif de stabilisation.