

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 4

Effet des Sulfates sur les Limites d'Atterberg

- 4.1. *Introduction***
- 4.2. *Limites d'Atterberg des sols traités sans sulfates***
- 4.3. *Limites d'Atterberg des sols traités avec sulfates***
- 4.4. *Conclusion***

4.1 Introduction

La nature et la proportion des minéraux, la masse volumique et la teneur en eau ainsi que l'argilosité, sont les paramètres physiques fondamentaux qui influent sur le comportement d'un sol. L'argilosité est une caractéristique exclusive de la fraction fine qui consiste à déterminer les caractéristiques de plasticité à savoir: la limite de liquidité (W_L), la limite de plasticité (W_P) et l'indice de plasticité (I_P). D'autre part, la teneur en eau et la compacité des mélanges sont définies par les essais de compactibilité.

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, Na_2SO_4) et divalent (sulfate de calcium hydraté, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) sur les limites d'Atterberg des deux sols argileux traités avec l'addition de différentes proportions de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison en fonction du temps de cure.

4.2 Limites d'Atterberg des sols traités sans sulfates

4.2.1 Effet de la chaux (L)

4.2.1.1 Effet de la chaux sur la limite de liquidité

Les résultats de l'effet de la chaux sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés sont illustrés dans la Figure 4.1. La W_L des échantillons des deux sols argileux diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux additionnée mais, elle augmente avec le temps de cure et semble d'être constante pour le cas du sol gris (SG). Par exemple, l'addition de 8% de chaux au SG fait diminuer la W_L de 82.8% jusqu'à 62.1 et 61% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.1a). Manasseh and Olufemi (2008) ont observé que l'addition de 10% de chaux, pour une même classe de sol, fait réduire la W_L de 72% à 62% après 1 jour de cure. La diminution de la W_L peut être attribuée à l'échange de cations qui s'est produit dans le sol par les ions divalents de calcium venant de l'addition de la chaux (Goswami and Singh, 2005). Par ailleurs, Miller and Azad (2000) ont rapporté que la diminution de la W_L avec l'augmentation de la teneur en chaux utilisée est plus prononcée pour les argiles à cations de valence inférieure telle que l'ion Na^+ . Cependant, l'addition de 8% de chaux au sol rouge (SR) fait augmenter la W_L de 46.5% jusqu'à 54.9 et 59.6% après des cures de 1 et 30 jours, respectivement (Fig. 4.1b). Pour une même classe de sol traité avec 10% de chaux comme additif, Yong and Ouhadi (2007) ont observé que la W_L a augmenté de 49.6% jusqu'à 56.5 et 75% après 1 et 30 jours de cure, respectivement. Des observations similaires ont été rapportées par Bell (1996) et Asgari et al. (2015). D'autre part, pour un sol de classe similaire,

Afès and Didier (2000) ont constaté que l'utilisation de 6% de chaux en tant qu'additif, la W_L diminue de 47.7% jusqu'à 42.7 et 42.4% après 7 et 30 jours de cure, respectivement. Ces résultats nous permettent de conclure que les augmentations et les diminutions dans les limites d'Atterberg dépendent fortement de la composition minéralogique des sols stabilisés. En effet, Attoh-Okine (1995) a rapporté que la diminution de la W_L est observée pour les sols composés principalement de l'argile montmorillonitique alors que son augmentation est constatée dans le cas des sols kaoliniques. En outre, Goswami and Singh (2005) ont indiqué que la façon de l'arrangement des particules ainsi que la présence de cations bivalents favorisent la floculation des particules argileuses et augmentent la W_L des sols kaoliniques.

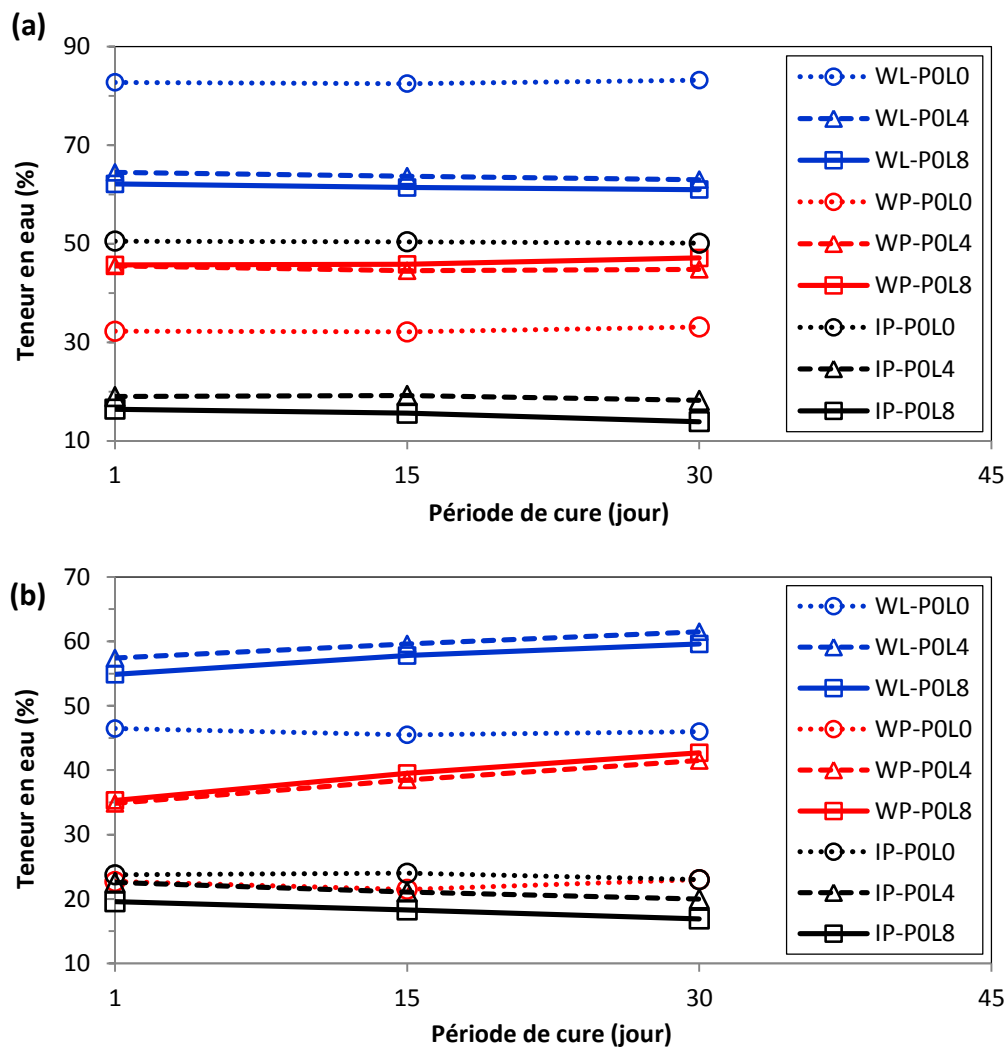


Fig. 4.1 — Effet de différents pourcentages de chaux sur les limites d'Atterberg des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): sol gris, (b): sol rouge.

4.2.1.2 Effet de la chaux sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet de la chaux sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés sont présentés dans la Figure 4.1. En général, la W_P des deux sols argileux traités

augmente avec l'augmentation du dosage en chaux additionné et de la période de cure. Par exemple, avec 8% de chaux utilisée en tant qu'additif, la W_p du SG augmente de 32.2% à 43.8 et 44.8% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.1a). Pour une même classe de sol, Nalbantoglu (2006) a observé que la W_p augmente de 22.2% à 37.5% pour l'addition de 7% de chaux. Un comportement similaire a été observé par Rahman (1986). Cependant, l'addition de 8% de chaux au SR fait augmenter la W_p de 22.7% à 35.3 et 42.7% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.1b). Pour un sol de même classe, Afès and Didier (2000) ont trouvé que l'utilisation de 6% de chaux fait augmenter la W_p de 24% jusqu'à 32.4 et 34% après 7 et 30 jours de cure, respectivement. Des observations similaires pour les sols de classes similaires ont été rapportés par plusieurs chercheurs (Bell, 1996; Attoh-Okine, 1995; Okagbue and Yakubu, 2000; Yong and Ouhadi, 2007; Asgari et al., 2015). Il est connu que l'utilisation de la chaux conduit à la floculation des particules d'argiles en provoquant une augmentation immédiate de la W_p . En outre, l'augmentation de la W_p provoque une diminution des propriétés plastiques du sol stabilisé en raison de l'altération du film d'eau entourant les minéraux d'argile dans le sol (Osula, 1991).

4.2.1.3 Effet de la chaux sur l'indice de plasticité

Les résultats des changements observés dans l'indice de plasticité (I_p) des deux sols argileux stabilisés par l'addition de la chaux sont reportés sur la Figure 4.1. Les sols traités ont montré une diminution immédiate de leurs indices de plasticité sous l'effet de l'addition de la chaux. Il est évident que l'addition d'une faible teneur en chaux est suffisante pour améliorer l'ouvrabilité des deux sols stabilisés. Cependant, l'augmentation de la teneur en chaux au-delà de 4% a un effet marginal sur la réduction de l'indice de plasticité. Un comportement similaire a été observé par plusieurs chercheurs pour une même classe de sol (Nalbantoglu, 2006; Harichane et al., 2011a). Cela peut être attribuée à des réactions chimiques entre la chaux et le sol, y compris l'échange d'ions et des réactions de floculation associées (Puppala et al., 2006). Il est très clair que l'indice de plasticité des deux sols argileux stabilisés diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux et de la période de cure à savoir que sa réduction est plus prononcée dans le SG que dans le SR. Il s'avère que l'addition de 8% de chaux est suffisante pour diminuer l'indice de plasticité du SG de 50.5% jusqu'à 15.6 et 13.9% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.1a). Cependant, pour le cas du SR stabilisé avec la même teneur en chaux, l'indice de plasticité diminue de 23.7% jusqu'à 19.6 et 16.9% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.1b). Pour une même classe de sol, Afès and Didier (2000) ont rapporté que l'utilisation de 6% de chaux comme un additif, l'indice de plasticité diminue de 23.7% à 10.3 et 8.4% après 7 et 30 jours, respectivement. Des comportement

similaires ont été observées par plusieurs chercheurs (Ola, 1977; Attoh Okine, 1995; Okagbue and Yakubu, 2000; Bagherpour and Choobbasti, 2003; Ansary et al., 2006) où ils ont utilisé la chaux comme additif de stabilisation.

4.2.2 Effet de la pouzzolane naturelle (PN)

4.2.2.1 Effet de la PN sur la limite de liquidité

Les résultats de l'effet de la pouzzolane naturelle sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés sont reportés sur la Figure 4.2. En général, la W_L des deux sols argileux traités diminue avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle mais elle semble d'être constante avec la cure. Par exemple, l'addition de 20% de pouzzolane naturelle au SG fait diminuer la W_L de 82,8% jusqu'à 67,3 et 66,7% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.2a). Il convient de noter que l'addition de la pouzzolane naturelle aux deux sols argileux a provoqué une légère diminution de la W_L par rapport à l'addition de la chaux toute seule. Cette diminution est probablement liée à la faible teneur en chaux libre qui se présente dans la pouzzolane naturelle utilisée. Une tendance similaire en W_L a été rapportée par Parsons and Kneebone (2005) où ils ont utilisé des cendres volantes en tant qu'additif. Cependant, pour le cas du SR stabilisé avec le même dosage en pouzzolane naturelle (20%PN), la W_L diminue de 46.5% jusqu'à 39.3 et 41.2% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.2b). Pour une même classe de sol, Sivrikaya et al. (2014) ont observé que la W_L du sol traité diminue de 28 à 25% pour l'addition de 20% du laitier de haut fourneau-A (GGBS-A, poudre grossière). D'autre part, pour une même classe de sol, Basha et al. (2003) et Rahman (1986) ont rapporté que l'addition de 20% de cendres de l'écorce de riz, fait augmenter la W_L de 49.8 à 54.3% et de 36.8 à 47%, respectivement.

4.2.2.2 Effet de la PN sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet de la pouzzolane naturelle sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés sont illustrés dans la Figure 4.2. Dans tous les cas étudiés, on assiste à des diminutions de l'ordre de 20 et 25% de la W_P des deux sols argileux traités avec l'addition de 10 et 20% de pouzzolane naturelle, respectivement. Par exemple, avec l'addition de 10% de pouzzolane naturelle en tant qu'additif, la W_P du SG diminue de 32.2% jusqu'à 25.5 et 25% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Figure 4.2a).

Selon la littérature, l'addition de 10% de cendres de l'écorce de riz à la même classe de sol fait augmenter légèrement la W_P de 32.3% à 34.3% (Muntohar and Hantoro, 2000). Cependant,

pour le cas du SR, l'addition de 10% de pouzzolane naturelle fait diminuer légèrement sa W_p de 22.7% jusqu'à 20.5 et 21.5% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Figure 4.2b).

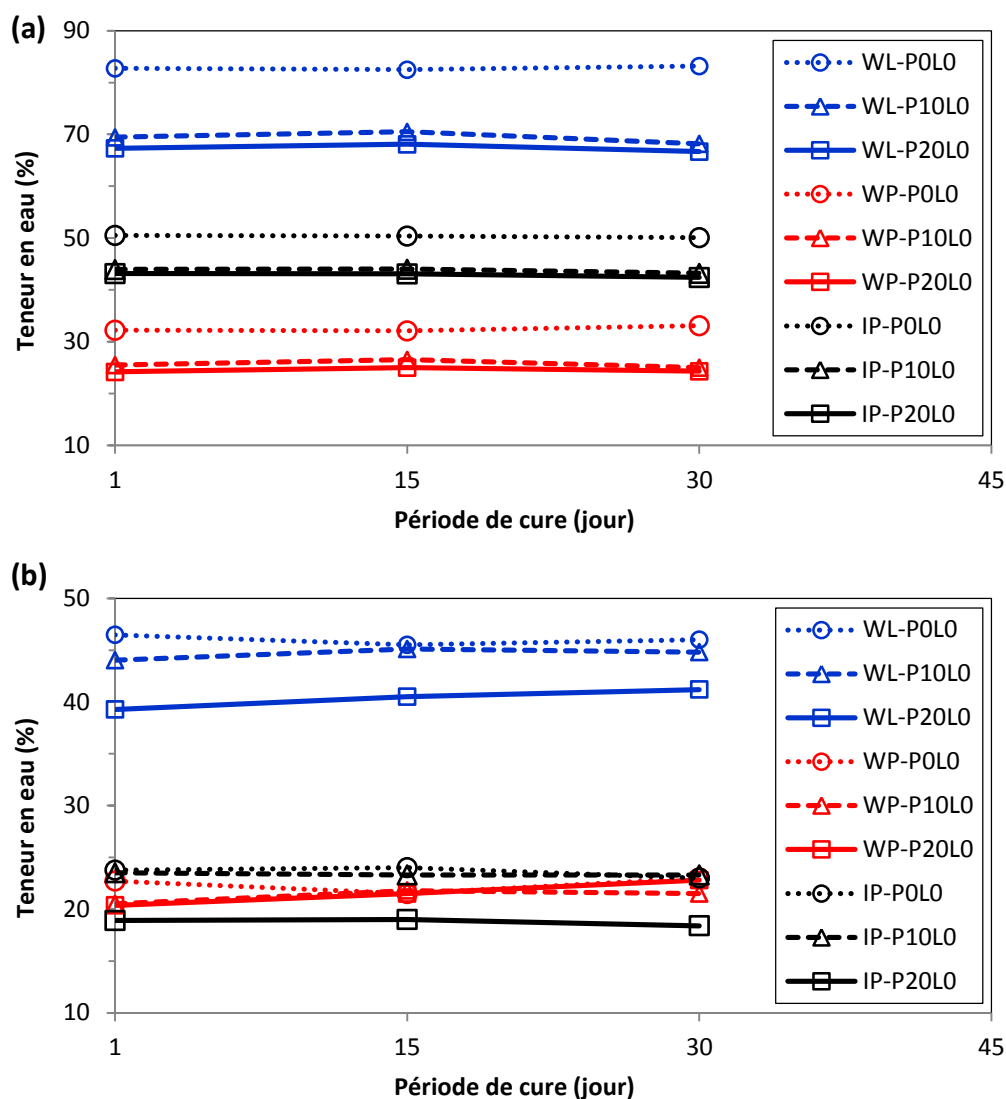


Fig. 4.2 — Effet de différents pourcentages de pouzzolane naturelle sur les limites d'Atterberg des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): sol gris, (b): sol rouge.

Des comportements différents ont été observés par plusieurs chercheurs pour une même classe de sol (Rahman, 1986; Basha et al., 2003). Il est suggéré que la diminution de la W_p des deux sols argileux stabilisés est probablement liée au remplacement des grosses particules du sol traité par des particules fines de la pouzzolane naturelle additionnée.

4.2.2.3 Effet de la PN sur l'indice de plasticité

Les résultats de l'effet de la pouzzolane naturelle sur l'indice de plasticité (I_p) des deux sols argileux stabilisés sont reportés sur la Figure 4.2. L'addition de la pouzzolane naturelle aux

deux sols argileux fait réduire légèrement leurs indices de plasticité par rapport à l'addition de la chaux toute seule. Il est clair de constater que l'addition de 20% de pouzzolane naturelle au SG, l'indice de plasticité diminue de 50.5% à seulement 43.1 et 42.4% après de 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.2a). Cependant, l'utilisation de la même teneur en pouzzolane naturelle en tant qu'additif fait diminuer l'indice de plasticité du SR de 23.8% jusqu'à 18.9 et 18.4% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.2b). Pour une même classe de sol, Yadu and Tripathi (2013) et Sivrikaya et al. (2014) ont trouvé que l'indice de plasticité des deux sols traités avec l'addition de 12% et 20% du laitier de haut fourneau diminue de 17 à 13% et de 9% à 4%, respectivement. Des tendances similaires ont été observées par Rahman (1986), Parsons and Kneebone (2005) et Eberemu (2013) où ils ont utilisé des cendres de l'écorce de riz, des cendres volantes et des cendres volcaniques, respectivement. En revanche, Degirmenci et al. (2007) ont constaté que l'indice de plasticité augmente avec l'augmentation de la teneur en cendres volantes utilisées. Ce comportement peut être expliqué par la petite taille des particules des cendres volantes qui ont une surface spécifique très élevée que celle de la pouzzolane naturelle.

4.2.3 Effet de la combinaison chaux-pouzzolane naturelle (L-PN)

4.2.3.1 Effet combiné de L-PN sur la limite de liquidité

La Figure 4.3 illustre les résultats de l'effet apporté par la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés. Il convient de noter que la stabilisation des deux sols argileux avec l'utilisation de la combinaison chaux-pouzzolane naturelle montre que les réductions dans la valeur de la W_L sont comparables à celles des sols traités à la chaux toute seule. Pour le cas du SG, la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle fait diminuer considérablement sa W_L et notamment avec la période de cure. Par exemple, l'addition à la fois de 20% de pouzzolane naturelle et de 8% de chaux au SG fait diminuer la W_L de 82.8% jusqu'à 62.2 et 61% après 1 et 30 jours de cure, respectivement, soit une réduction de 30% (Fig. 4.3a). Pour un sol de même classe, al-Swaidani et al., (2016) ont observé un comportement différent à savoir que l'utilisation de la même combinaison de chaux-pouzzolane naturelle (20%PN+8%L) fait diminuer la W_L de 58.8 jusqu'à 44.4% après un jour de cure, soit une réduction de 25%. Cependant, une augmentation considérable de la W_L du SR a été enregistrée lorsque la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est utilisée. Contrairement au SG, la W_L du SR augmente avec la période de cure. Par exemple, la W_L du SR traité avec la combinaison de 10% de pouzzolane naturelle et de 4% de chaux augmente de 46.5% jusqu'à 56.4 et 61.8% après 1 et 30 jours de cure,

respectivement (Fig. 4.3b). D'ailleurs, pour une même classe de sol, Ansary et al. (2006) ont constaté qu'avec la combinaison de 12% de cendres volantes et de 3% de chaux, la W_L du sol-B- diminue de 44% jusqu'à 32.3% après un jour de cure.

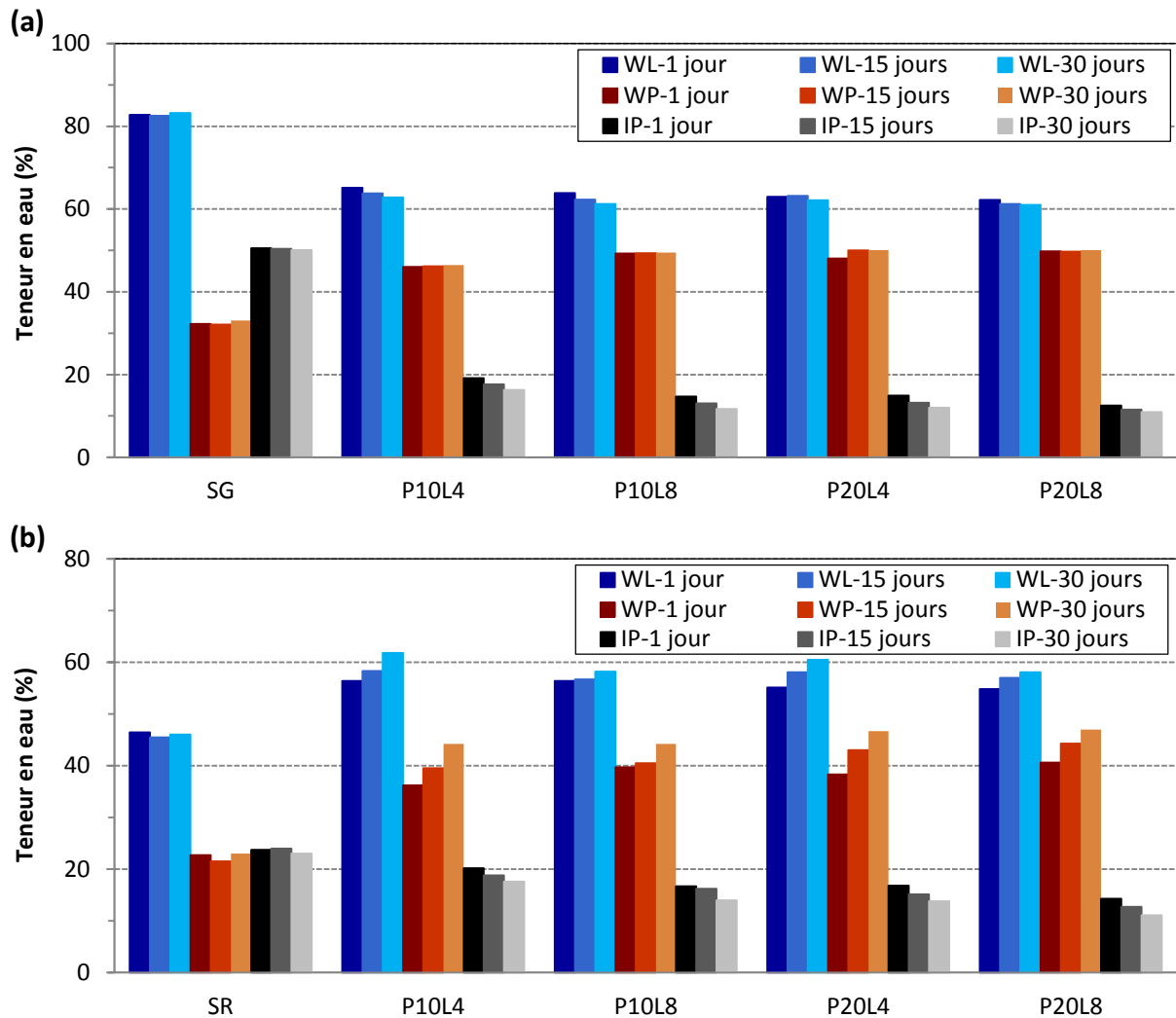


Fig. 4.3 — Effet de différents pourcentages chaux-pouzzolane naturelle sur les limites d'Atterberg des sols argileux stabilisés en absence des sulfates pour différentes périodes de cure, (a): sol gris, (b): sol rouge.

4.2.3.2 Effet combiné de L-PN sur la limite de plasticité

La Figure 4.3 illustre les résultats de l'effet engendré par la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux traités. En général, on observe qu'il y a une augmentation considérable de la W_P des deux sols argileux étudiés avec l'augmentation la teneur en chaux-pouzzolane naturelle additionnée et de la période de cure. D'une manière générale, l'utilisation de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle dans la stabilisation des deux sols argileux a conduit au développement des valeurs de W_P bien plus élevées que l'addition de la chaux toute seule. Par exemple, l'addition de 20% de pouzzolane

naturelle et de 8% de chaux au GS fait augmenter la W_p de 32.2% à 49.8 et 50.1% après 1 et 30 jours de cure, respectivement, soit une augmentation de 30% (Fig. 3.4a). Pour une même classe de sol, al-Swaidani et al., (2016) ont trouvé que la même combinaison de chaux-pouzzolane naturelle (20%PN+8%L) fait augmenter considérablement la W_p de 30% jusqu'à 41.5% après 24 heures, soit une augmentation de 25%. Cependant, pour le cas du SR traité avec la même combinaison (20%PN+8%L), la W_p passe de 22.7% à 40.6 et 47% après 1 et 30 jours de cure, respectivement, soit une augmentation de 55% après 30 jours de cure (Fig. 3.4b). Pour une même classe de sol, Ansary et al. (2006) ont observé que l'addition de 18% de cendres volantes et de 3% chaux fait augmenter la W_p de 25% jusqu'à 35.8%. Il est à noter que pour tous les échantillons des deux sols argileux étudiés, la W_p devient de plus en plus importante lorsque la teneur en chaux-pouzzolane naturelle augmente. D'autre part, par comparaison, les valeurs de la W_p développées par le SR sont également bien plus élevées que celles développées par le SG. Cela est attribué probablement à la nature du SR où on constate une absence complète de la montmorillonite dans sa composition minéralogique. Il est à signaler que la présence de la montmorillonite dans un sol naturel avec des proportions élevées peut empêcher l'augmentation de sa W_p .

4.2.3.3 Effet combiné de L-PN sur l'indice de plasticité

Les résultats de l'effet de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sur l'indice de plasticité (I_p) des deux sols argileux stabilisés sont reportés sur la Figure 4.3. Les meilleurs résultats de l'indice de plasticité sont obtenus lorsque la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est utilisée. Il est clair donc d'observer que la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle a un effet significatif sur l'indice de plasticité du SG que sur celui du SR. En outre, une diminution significative de l'indice de plasticité avec l'augmentation de la teneur en chaux-pouzzolane naturelle et de la période de cure a été observée. Par exemple, l'indice de plasticité de SG stabilisé avec la combinaison de 20% de pouzzolane naturelle et de 8% de chaux diminue de 50.5% jusqu'à 12.5 et 10.9% après 1 à 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.3a). al-Swaidani et al., (2016) ont observé que l'addition de la même teneur en chaux-pouzzolane naturelle (20%PN+8%L) à la même classe de sol fait diminuer considérablement l'indice de plasticité de 28.8% jusqu'à 2.9%, ce qui est 7 fois plus petit que celui du sol non traité. Cependant, l'indice de plasticité du SR stabilisé avec la même combinaison de chaux-pouzzolane naturelle (20%PN+8%L) diminue de 23.8% jusqu'à 14.8 et 11.1% après 1 et 30 jours de cure, respectivement, soit une réduction de 50% après 30 jours de cure (Fig. 4.3b). Ansary et al. (2006) ont rapporté que pour un sol de classe similaire, l'indice de plasticité diminue de 19% à 2.3% pour un traitement combiné de 6% de cendres volantes et de 3% de

chaux. Dans tous les cas, la forte réduction de l'indice de plasticité est achevée lorsque le traitement combiné de chaux-pouzzolane naturelle est utilisé. Ce comportement peut être expliqué par le rôle complémentaire joué par la chaux et la pouzzolane naturelle où les effets bénéfiques de l'un peuvent compenser les inconvénients qui pourraient présenter l'autre.

4.3 Limites d'Atterberg des sols traités avec sulfates

4.3.1 Traitement à la chaux en présence du CaSO_4

4.3.1.1 Effet du CaSO_4 sur la limite de liquidité

Les Figures 4.4 et 4.5 présentent les résultats de l'effet du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux. En général, dans le cas où les échantillons des deux sols argileux non traités sont testés en présence seulement du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; nous assistons à une diminution remarquable (notamment pour le cas du SG) de la W_L avec l'augmentation de la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et de la période de cure. Par exemple, après 1 jour de cure, la W_L du SG diminue de 82.8% jusqu'à 73.5, 70.4 et 68.1% avec l'addition de 2, 4 et 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectivement (Fig. 4.4a). Cependant, après 30 jours de cure et pour le même sol en présence des mêmes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, la W_L continue à diminuer de plus en plus jusqu'à 62.7, 60.6 et 57.8% (Fig. 4.4c). Pour une même classe de sol (bentonite), Yilmaz and Civelekoglu (2009) ont rapporté que l'utilisation du gypse en tant qu'additif fait diminuer l'indice de plasticité de 186.9% jusqu'à 139.5 et 121.9% pour l'addition de 2.5 et 7.5% de gypse, respectivement.

Cependant, l'addition de la chaux en tant qu'additif a montré que la W_L des échantillons des deux sols argileux contenant du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, de la teneur en chaux et de la période de cure. Par exemple, après un 1 jour de cure, l'addition de 8% de chaux au SG a montré que la W_L diminue de 62.1% jusqu'à 61.4, 60.3 et 59.5% en présence de 2, 4 et 6% de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectivement (Fig. 4.4a). Pour un sol de classe similaire, Kinuthia et al. (1999) ont rapporté que qu'avec 6% de chaux, la W_L décroît de 73% jusqu'à 71, 69 et 67% en présence de 1, 2 et 3% de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectivement. Contrairement, pour un sol de classe traité avec 6% de chaux, Sivapullaiah et al. (2000) ont observé que la W_L augmente de 68% jusqu'à 70, 73 et 76% respectivement avec la présence de 0.5, 1 et 3% de CaSO_4 . Ils ont constaté que ce comportement est dû à l'interaction chimique entre le sol, la chaux et le CaSO_4 .

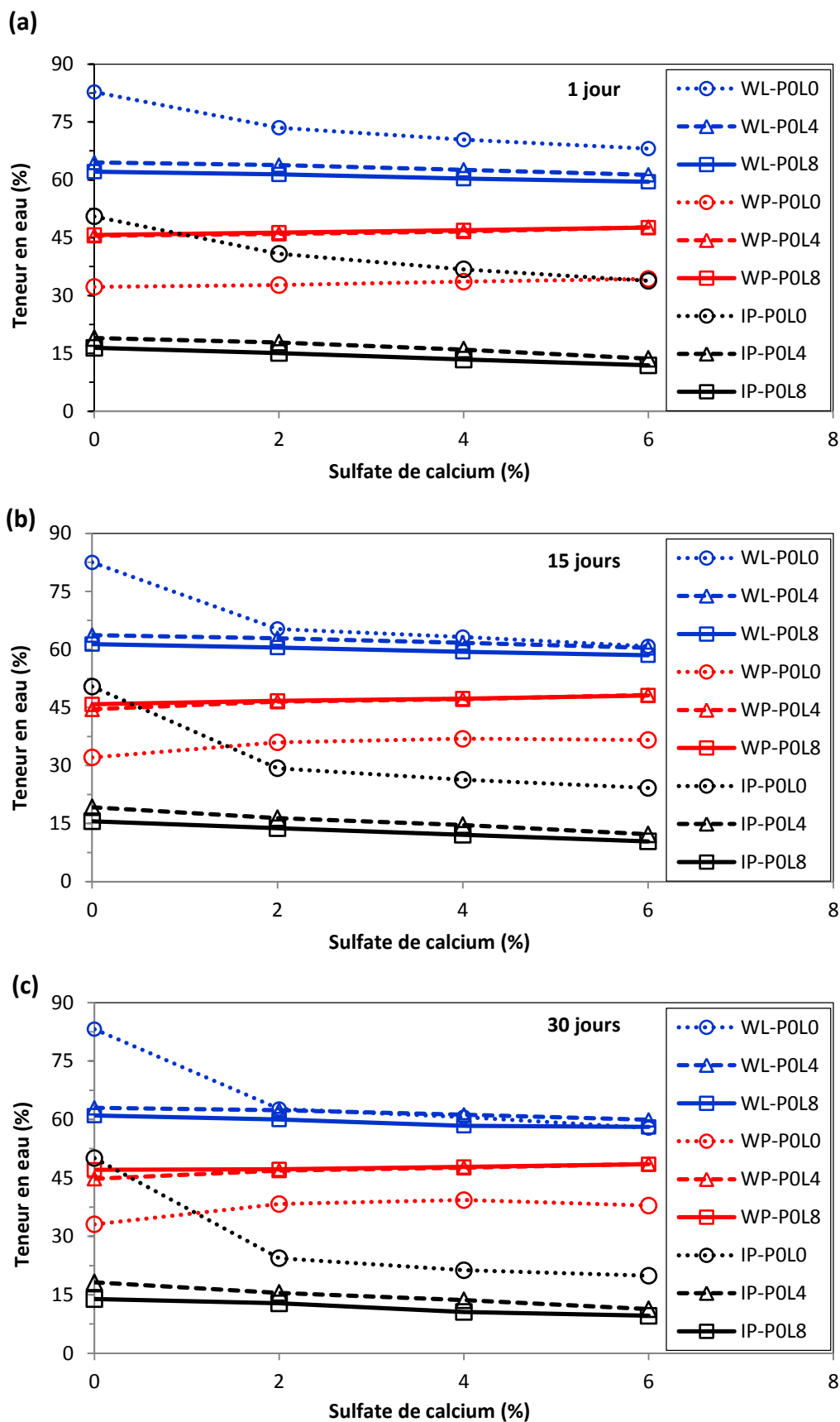


Fig. 4.4 — Effet de différents teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé à la chaux pour différentes périodes de cure.

Cependant, après 1 jour de cure, la W_L du SR stabilisé avec 8% de chaux diminue de 54.9% jusqu'à 54.2, 53.7 et 52% avec l'addition de 2, 4 et 6% $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectivement (Fig. 4.5a). Il est important de noter que pour les deux types de sols (notamment le SG), l'effet du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ est très remarquable sur la W_L des deux sols argileux non traités que sur celle des mêmes sols traités à la chaux.

4.3.1.2 Effet du CaSO_4 sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés à la chaux sont présentés dans les Figures 4.4 et 4.5. La W_L des deux sols argileux perturbés avec seulement du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ augmente avec l'augmentation de la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et de la période de cure. Cependant, pour le cas des sols traités à la chaux en présence du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, la W_P augmente avec l'augmentation de la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, de la teneur en chaux et de la période de cure. Par exemple, avec 8% de chaux, la W_P du GS contenant 6% de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ augmente de 45.7 à 47.6% et de 47.1 à 48.5% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.4a et b). Pour un sol de classe similaire, Kinuthia et al. (1999) ont constaté que la W_P augmente de 41% jusqu'à 45% pour l'addition de 3% de gypse. Cependant, pour le cas du SR stabilisé avec la même teneur en chaux (8%L), en présence de 6% de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, la W_P augmente de 35.5% jusqu'à 37.1% après 1 jour de cure puis elle diminue de 42.7% à 39% après une cure de 30 jours (Fig. 4.5a et b). Il est à noter que pour les deux types de sols traités, l'effet du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ est fortement considérable sur la W_P des deux sols argileux non traités que sur celle des mêmes sols argileux traités à la chaux.

4.3.1.3 Effet du CaSO_4 sur l'indice de plasticité

Les Figures 4.4 et 4.5 montrent les changements dans l'indice de plasticité (I_P) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux en présence de différents teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. En général, une diminution significative de l'indice de plasticité des échantillons des deux sols argileux non traités (notamment pour le cas du SG) a été observée lorsque la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ augmente, particulièrement, avec la période de cure. Par exemple, au bout 1 jour de cure, l'indice de plasticité du SG diminue de 50.5% jusqu'à 40.8, 36.8 et 33.8% en présence de 2, 4 et 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectivement (Fig. 4.4a). Alors qu'après 30 jours de cure, l'indice de plasticité continue à décroître petit à petit jusqu'à 24.4, 21.4 et 19.9% respectivement avec les mêmes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Fig. 4.4c).

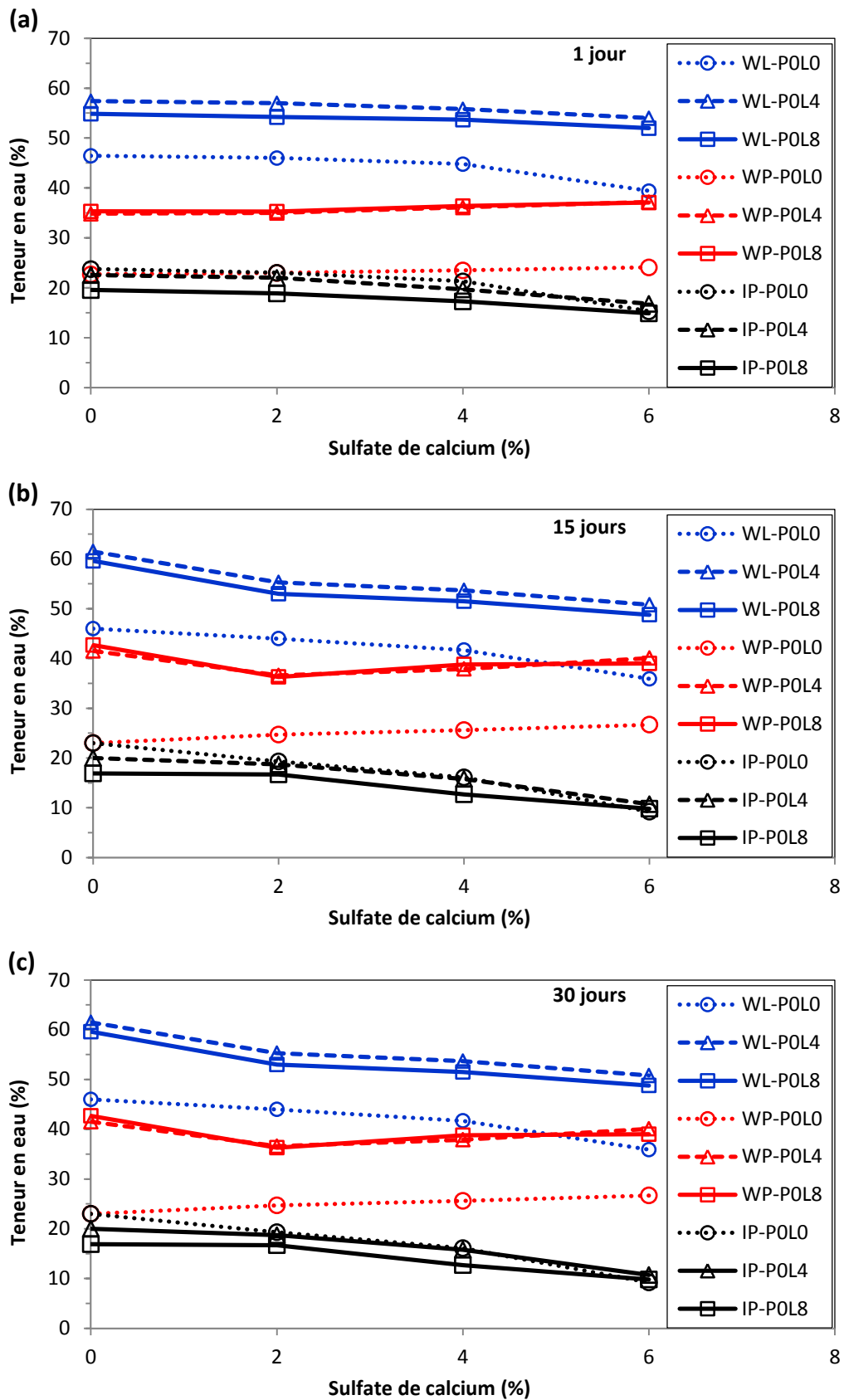


Fig. 4.5 — Effet de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé à la chaux pour différents périodes de cure.

Cependant, le traitement avec l'addition de la chaux en présence du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ fait diminuer considérablement l'indice de plasticité des deux sols argileux étudiés. Cette diminution devient importante avec la période de cure, la teneur croissante du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et la teneur en chaux additionnée. Par exemple, au bout de 30 jours de cure, l'indice de plasticité du SG stabilisé avec 8% de chaux diminue de 16.4% jusqu'à 12.9, 10.6 et 9.6% en présence de 2, 4 et 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectivement, soit une réduction de 50% en présence de 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Fig. 4.4c). En revanche, pour la même période de cure et pour la même teneur en chaux, l'indice de plasticité du SR diminue de 19.6% jusqu'à 16.7, 12.7 et 9.8% en présence de 2, 4 et 6% $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectivement, soit une réduction de 100% pour un dosage maximal en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Fig. 4.5c). Kinuthia et al. (1999) ont rapporté que l'interaction entre deux particules d'argile est considérablement affectée par le processus d'échange de cations. Cela est dû à l'augmentation de la concentration de cations qui font entraîner l'augmentation de la distance entre ces particules d'argile, tout en favorisant l'augmentation de la taille des particules d'argile et en affectant la distribution des pores en raison de l'agencement des particules qui conduit à la modification de la consistance du sol traité. D'autre part, la modification de l'indice de plasticité est le résultat du processus de l'échange de cations qui affectent la viscosité du mélange argile-eau. Il est très important de noter que pour les deux types de sols, l'effet du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ est fortement considérable sur l'indice de plasticité des deux sols argileux non traités que sur celle des mêmes sols traités à la chaux.

4.3.2 Traitement à la chaux en présence du Na_2SO_4

4.3.2.1 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de liquidité

Les Figures 4.6 et 4.7 montrent les résultats de l'effet du Na_2SO_4 sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés à la chaux. En général, un effet marginal a été observé pour la W_L lorsque les échantillons des deux sols argileux non traités sont testés en présence seulement du Na_2SO_4 . Cependant, avec la chaux en tant qu'additif, la W_L des échantillons des deux sols argileux étudiés augmente de manière significative avec l'augmentation de la teneur en chaux, de la teneur en Na_2SO_4 et de la période de cure. Par exemple, au bout d'un jour de cure, l'addition de 8% de chaux au SG fait augmenter la W_L de 62.1% jusqu'à 106.4, 123.7 et 130.2% respectivement avec l'addition de 2, 4 et 6% du Na_2SO_4 (Fig. 4.6a). Pour une même classe de sol traité à 6% de chaux, Sivapullaiah et al. (2000) ont observé que la W_L augmente de 68% jusqu'à seulement 70, 73 et 76% en présence de 0.5, 1 et 3% Na_2SO_4 , respectivement.

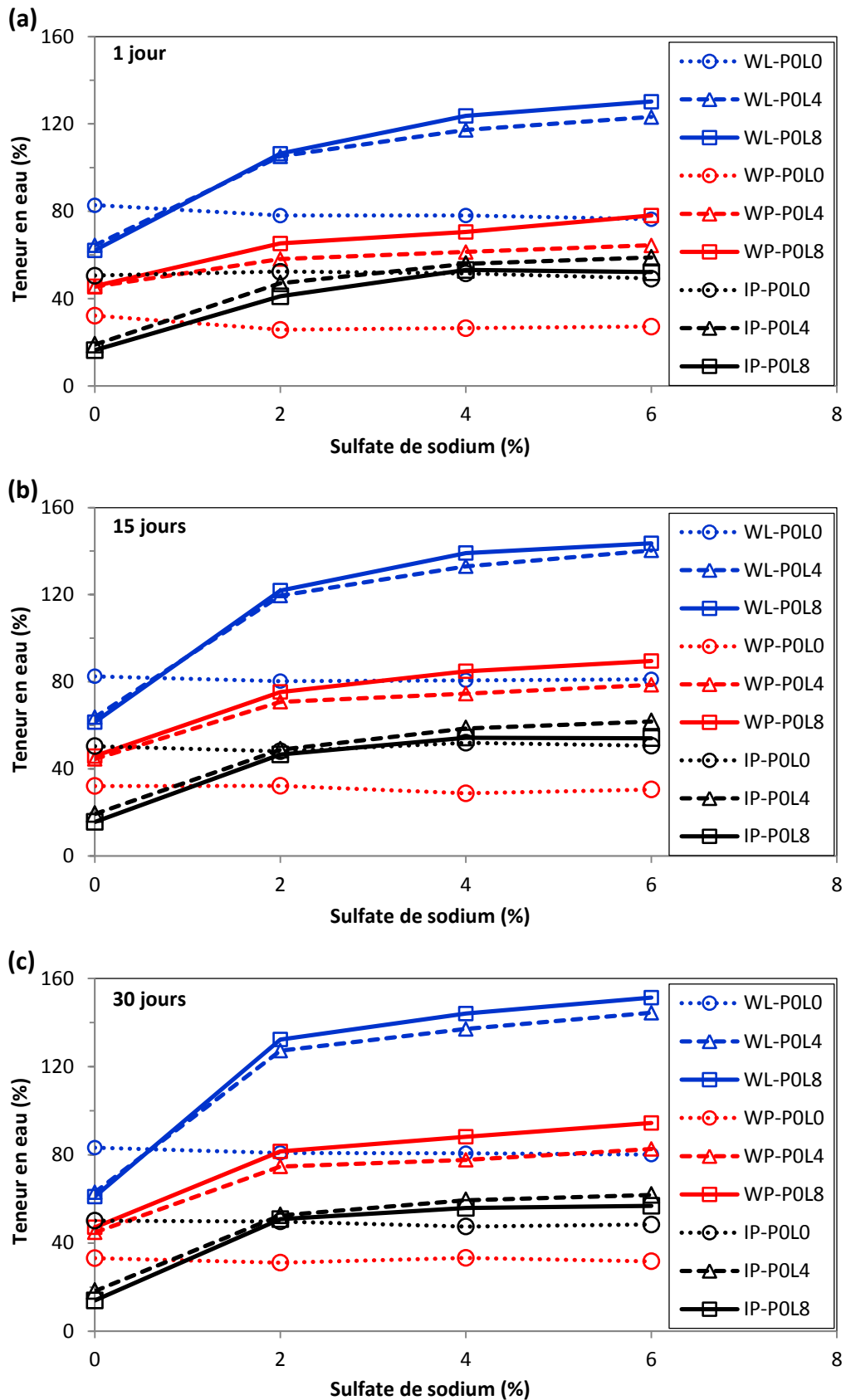


Fig. 4.6 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé à la chaux pour différentes périodes de cure.

Cependant, pour un sol de même classe stabilisé avec 6% de chaux, Kinuthia et al. (1999) ont constaté un comportement inverse où la W_L décroît de 73% jusqu'à 59 et 58% en présence de 1 et 3% de Na_2SO_4 , respectivement. D'autre part, pour le cas du SR traité avec 8% de chaux et après un jour de cure, il a été constaté que la W_L augmente de 54.9% jusqu'à 83.3, 85.2 et 87.1% en présence de 2, 4 et 6% du Na_2SO_4 , respectivement (Fig. 4.7a). Il est à noter que la W_L des deux sols argileux traités à la chaux a continué à augmenter de plus en plus avec la cure (Figs. 4.6c et 4.7c). Cette augmentation dépend beaucoup plus de la capacité des deux sols argileux traités à absorber de plus de quantité d'ions sulfate (SO_4^{2-}) avec le temps.

4.3.2.2 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet du Na_2SO_4 sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux ont été reportés sur les Figures 4.6 et 4.7. Contrairement à la présence seule du $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, la W_P des deux sols argileux perturbés avec seulement du Na_2SO_4 ne montre qu'une faible variation. On peut conclure que la sensibilité de la W_P à l'effet des sulfates est très prononcée avec le $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ qu'avec le Na_2SO_4 . Cela peut être expliqué par l'aptitude des deux sols argileux traités à l'absorption des cations divalents (Ca^{2+}) qu'à l'absorption des cations monovalents (Na^+).

Dans tous les cas, la W_P des échantillons des deux sols argileux traités à la chaux augmente avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4 , de la teneur en chaux et de la période de cure. Par exemple, avec 8% de chaux en tant que stabilisant, la W_P du SG des échantillons contenant 6% du Na_2SO_4 augmente de 45.7 à 78.1 et de 47.1 à 94.4% respectivement avec 1 et 30 jours de cure (Fig. 4.6a et c). Pour une même classe de sol traité avec 6% de chaux, Kinuthia et al. (1999) ont constaté que la W_P diminue de 41 jusqu'à 34% en présence de 3% du Na_2SO_4 . Cependant, la W_P des échantillons du SR stabilisés avec 8% de chaux, en présence de 6% du Na_2SO_4 , augmente de 35.3 à 60% et de 42.7 à 68.1% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.7a et c).

4.3.2.3 Effet du Na_2SO_4 sur l'indice de plasticité

Les changements dans l'indice de plasticité (I_P) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la chaux en présence de différents teneurs en $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ sont présentés dans les Figures 4.6 et 4.7. On constate que l'indice de plasticité des deux sols argileux non traités n'est pas influencé par la présence du Na_2SO_4 . D'autre part, l'indice de plasticité du SG traité avec l'addition de la chaux augmente avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4 et de la période de cure.

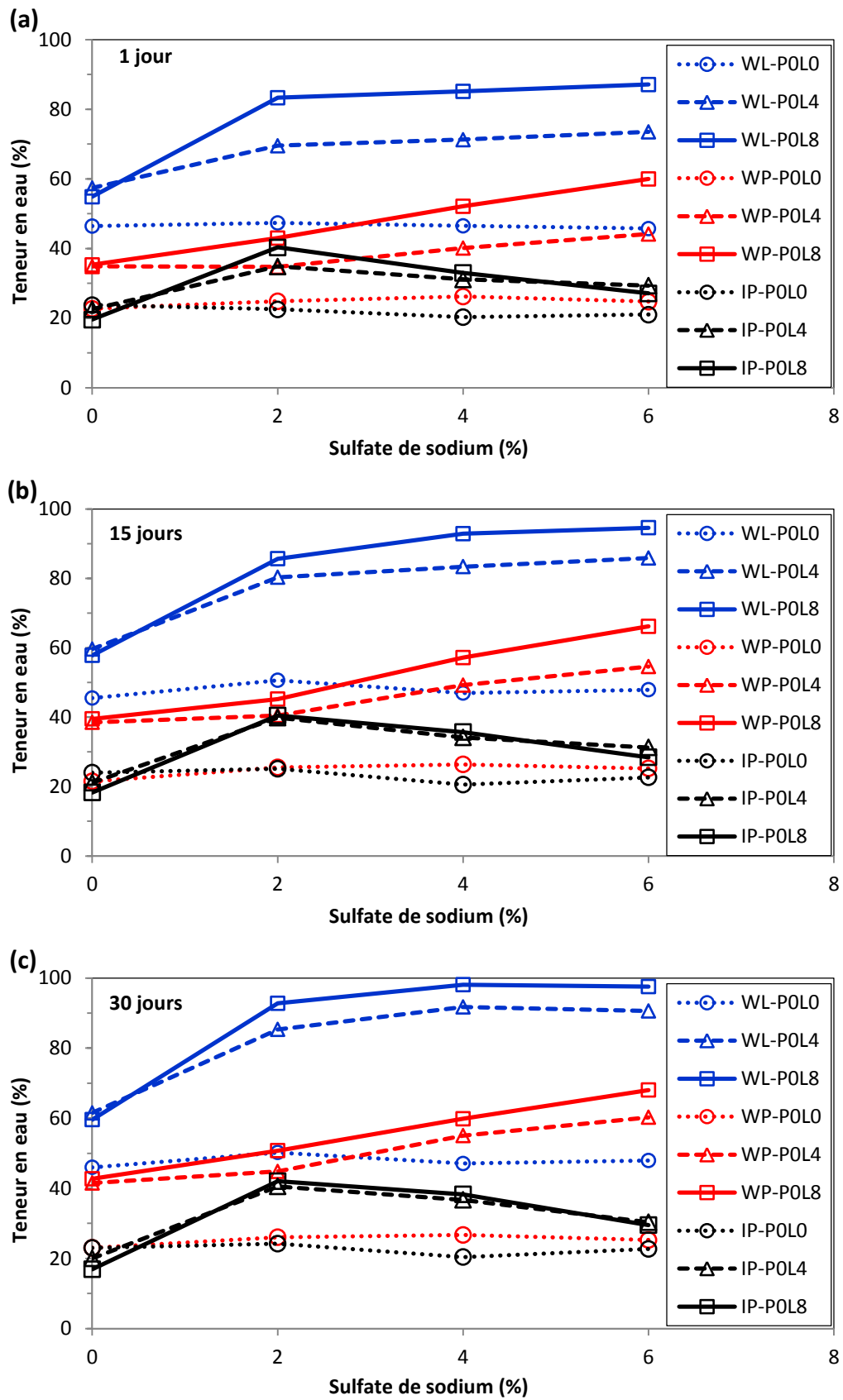


Fig. 4.7 — Effet de différentes teneurs en Na₂SO₄ sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé à la chaux pour différentes périodes de cure.

Celik et Nalbantoglu (2013) ont rapporté que l'indice de plasticité d'un sol argileux stabilisé avec 5% de chaux diminue de 32 à 15% en présence de 2000 ppm du Na_2SO_4 alors qu'il augmente jusqu'à 34 et 38% en présence de 5000 et 10000 ppm du même sulfate, respectivement. Contrairement au SG, l'indice de plasticité du SR traité à la chaux diminue avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4 tandis qu'il augmente avec la période de cure. Il est à constater qu'en présence du Na_2SO_4 (notamment avec une forte teneur), de grandes valeurs de l'indice de plasticité ont été enregistrées pour les deux types de sols traités. Cela est probablement attribué à la grande surface spécifique des particules d'argile. Cette grande surface a une forte capacité de stockage de l'eau qui est gouvernée probablement par l'échange de cations monovalents tels que les ions sodium venant de l'addition du Na_2SO_4 après dissolution en présence d'eau. Par comparaison, les cations divalents (Ca^{2+} , provenant de la dissolution du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et/ou de la chaux) ont l'aptitude de diminuer l'indice de plasticité des deux sols argileux tandis que ceux des monovalents (Na^+ , provenant de la dissolution du Na_2SO_4) ont la tendance de le faire augmenter.

4.3.3 Traitement à la PN en présence du CaSO_4

4.3.3.1 Effet du CaSO_4 sur la limite de liquidité

Les Figures 4.8 et 4.9 illustrent les résultats de l'effet du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle. Les résultats obtenus ont montré que l'utilisation de la pouzzolane naturelle en tant que stabilisant, fait diminuer considérablement la W_L des deux sols argileux traités (notamment le cas du SG) notamment avec l'augmentation de la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, de la teneur en pouzzolane naturelle et de la période de cure. Par exemple, au bout de un jour de cure et avec la présence de 2% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, la W_L du SG traité avec 10 et 20% de pouzzolane naturelle diminue de 82.8% jusqu'à 60.6 et 58.4%, respectivement (pour ces mêmes conditions et après 30 jours de cure, ces deux dernières valeurs diminuent encore plus jusqu'à 49.1 et 46.9% respectivement avec l'addition de 10 et 20% de pouzzolane naturelle). Alors qu'après un jour de cure en présence de 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, la W_L du même sol (SG) diminue encore plus de jusqu'à 57.9 et 54.7% respectivement avec l'addition de 10 et 20% de pouzzolane naturelle (pour ces mêmes conditions et après 30 jours de cure, ces deux dernières valeurs diminuent encore plus jusqu'à 45 et 43.7% respectivement avec l'addition de 10 et 20% de pouzzolane naturelle).

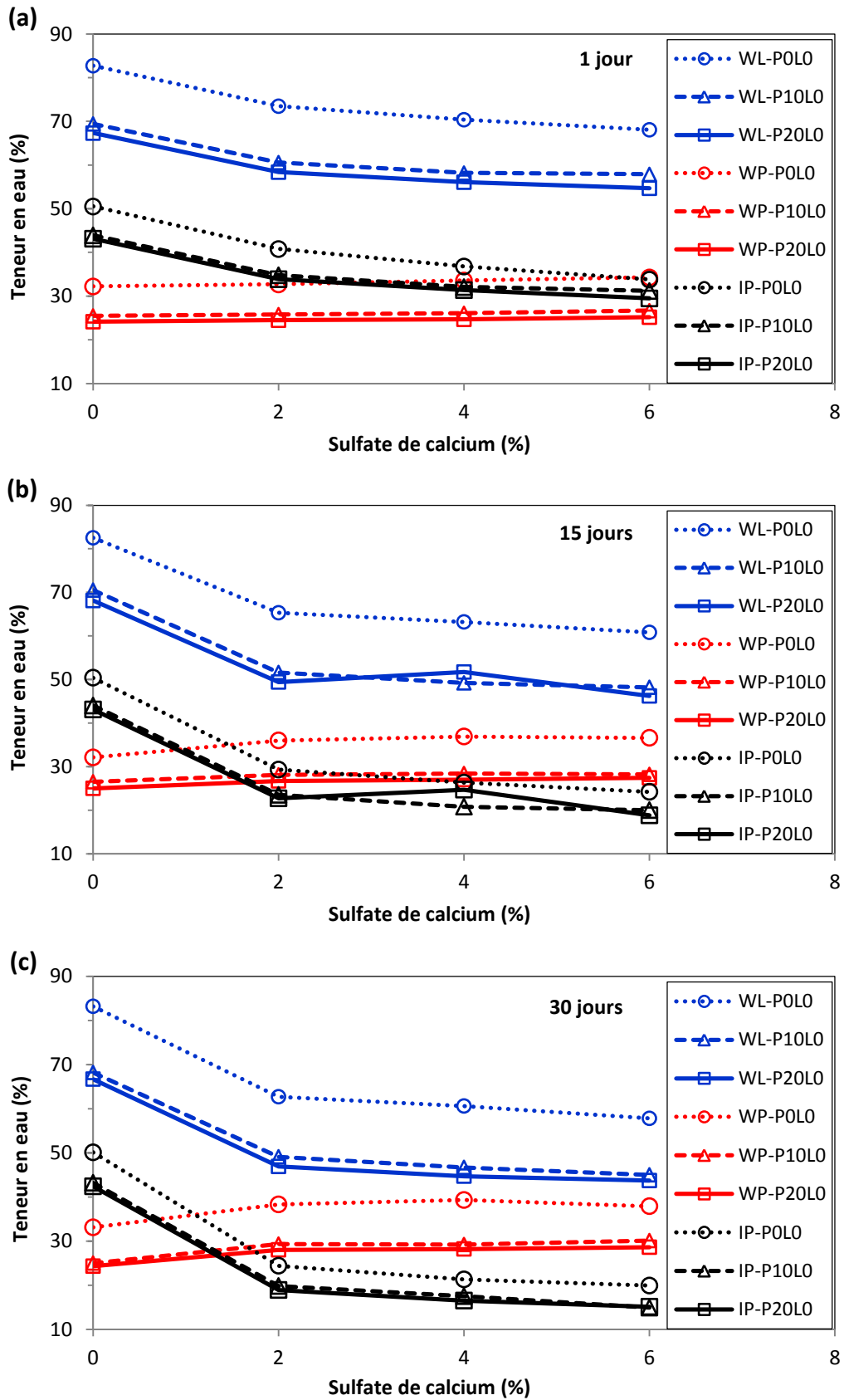


Fig. 4.8 — Effet de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé par l'utilisation de la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

En effet, les valeurs les plus élevées de la W_L sont achevées lorsque la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ additionnée est supérieure à 2%. Cependant, il y a un changement négligeable dans la valeur de la W_L des échantillons du SG contenant 2% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et traités avec la pouzzolane naturelle par rapport aux échantillons du même sol traité sans présence du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. En général, quelque soit la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ utilisée lors de différentes périodes de cure, la différence dans les valeurs de la W_L entre la chaux et la pouzzolane naturelle est plus prononcée avec le SR qu'avec le SG. Ceci peut être expliqué par le comportement du SR qui a une faible plasticité et une composition minéralogique différente à celle du SG.

4.3.3.2 Effet du CaSO_4 sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle sont présentés dans les Figures 4.8 et 4.9. Quelque soit la teneur en pouzzolane naturelle utilisée, la W_P du SR augmente légèrement avec l'augmentation de la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ additionnée et de la période de cure. Alors que la W_P du GS augmente avec la période de cure mais elle semble d'être constante avec l'augmentation de la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ additionnée. Il convient de signaler que la W_P des deux sols argileux traités avec l'addition de la pouzzolane naturelle n'est pas vraiment influencée par la présence du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

4.3.3.3 Effet du CaSO_4 sur l'indice de plasticité

Les Figures 4.8 et 4.9 illustrent les changements dans l'indice de plasticité (I_P) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle en présence de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. L'indice de plasticité des deux sols argileux stabilisés diminue avec l'augmentation de la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, de la teneur en pouzzolane naturelle et de la période de cure. Par exemple, après 1 jour de cure, l'indice de plasticité du SG stabilisé avec 20% de pouzzolane naturelle diminue de 50.5% jusqu'à 33.9 et 29.5% en présence de 2 et 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectivement (pour ces mêmes conditions et après 30 jours de cure, ces deux dernières valeurs diminuent encore plus jusqu'à 18.9 et 15.1% respectivement avec 2 et 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Fig. 4.8a). En revanche, après la même période de cure et pour la même teneur en pouzzolane naturelle, l'indice de plasticité du SR décroît de 23.8% jusqu'à 18.4 et 14.2% en présence de 2 et 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectivement (pour ces mêmes conditions et après 30 jours de cure, ces deux dernières valeurs diminuent encore plus jusqu'à 16.5 et 6.5% respectivement avec 2 et 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) (Fig. 4.9a).

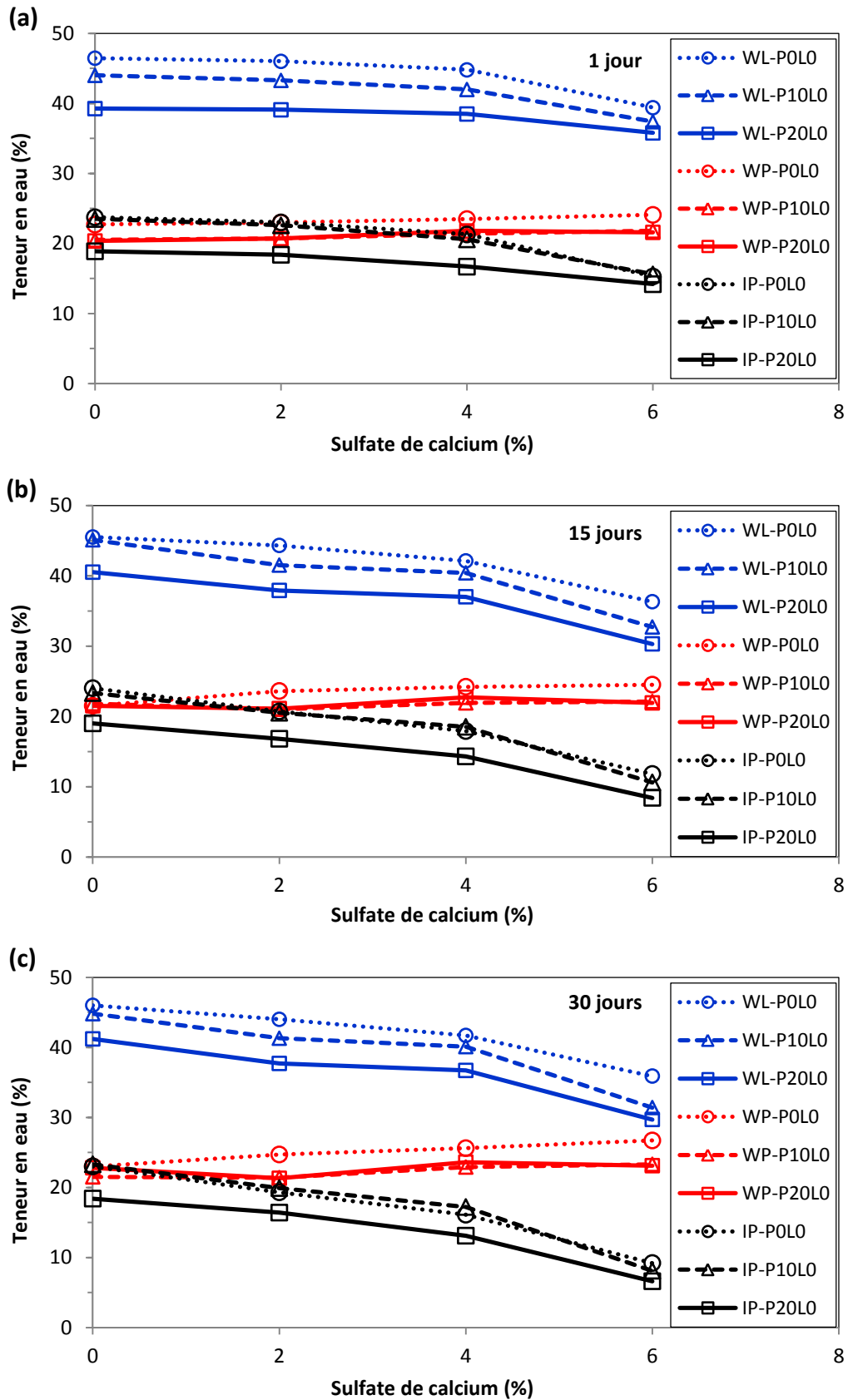


Fig. 4.9 — Effet de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé par l'utilisation de la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

Il convient de noter que l'utilisation du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ fait réduire considérablement l'indice de plasticité des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle en faisant améliorer leur ouvrabilité. D'après Yilmaz et Civelekoglu (2009), l'indice de plasticité d'une bentonite diminue de 186.9% jusqu'à 139.5 et 120.8% pour l'addition de 2.5 et 10% de gypse, respectivement. Ceci est dû au remplacement des ions monovalents par des ions calcium (venant de l'addition $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) en provoquant une réduction de l'épaisseur de la double couche diffuse et conduisant à la diminution de la W_L , par conséquent, la diminution de l'indice de plasticité. A titre de comparaison, au bout de 30 jours de cure, les échantillons du SR traité avec 20% de pouzzolane naturelle seule ou mélangé avec 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ développent des valeurs de l'indice de plasticité bien plus élevées que celles développées par les mêmes échantillons du sol stabilisé avec 8% de chaux seule ou en présence de 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

4.3.4 Traitement à la PN en présence du Na_2SO_4

4.3.4.1 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de liquidité

Les résultats de l'effet du Na_2SO_4 sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle sont présentés dans les Figures 4.10 et 4.11. L'utilisation de la pouzzolane naturelle en tant que stabilisant fait augmenter considérablement la W_L du SG avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4 et de la période de cure. Cependant, la variation de la W_L du SR semble d'être constante quand la teneur en Na_2SO_4 augmente alors qu'elle diminue légèrement avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle additionnée et augmente avec la période de cure. En général, quelque soit la teneur en Na_2SO_4 lors de différentes périodes de cure, la différence dans les valeurs de la W_L entre la chaux et la pouzzolane naturelle est plus prononcée avec le SG qu'avec le SR.

4.3.4.2 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet du Na_2SO_4 sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle sont présentés dans les Figures 4.10 et 4.11. En général, la présence du Na_2SO_4 fait augmenter la W_P du SR mais fait diminuer celle du SG. Quelque soit la période de cure, les valeurs de la W_P du SG traité avec l'addition de la pouzzolane naturelle en présence de différentes teneurs en Na_2SO_4 sont presque comparables à celles du même sol traité sans présence du Na_2SO_4 . Cependant, pour le cas du SR traité avec le même additif (PN), les valeurs de la W_L sont nettement supérieures à celles du même sol traité sans présence du Na_2SO_4 . Il est indispensable de signaler que la W_P du SG traité avec l'addition de la pouzzolane naturelle n'a subi qu'une faible influence en présence du Na_2SO_4 .

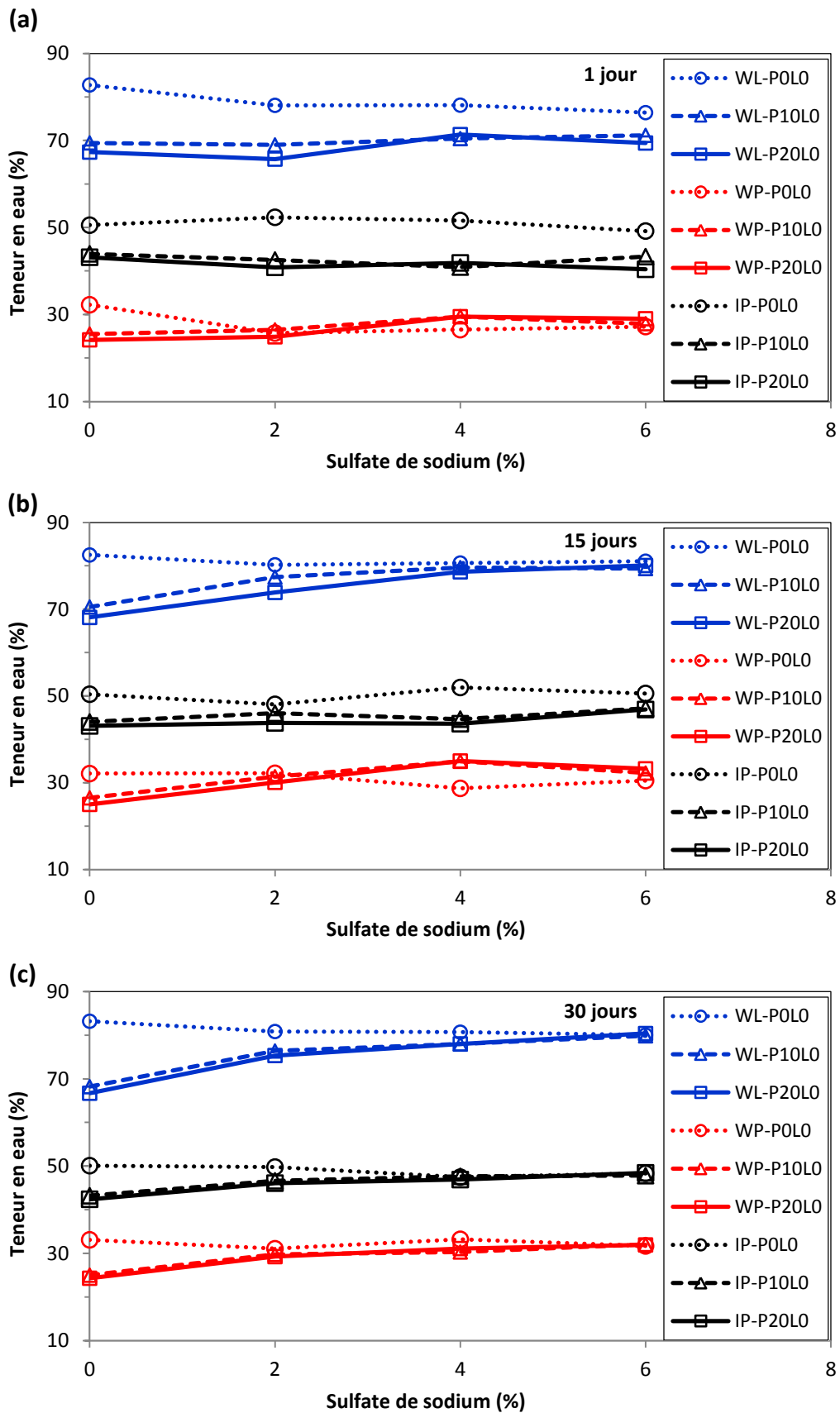


Fig. 4.10 — Effet de différentes teneurs en Na₂SO₄ sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé par l'utilisation de la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

4.3.4.3 Effet du Na_2SO_4 sur l'indice de plasticité

Les Figures 4.10 et 4.11 illustrent les changements dans l'indice de plasticité (I_p) des deux sols argileux stabilisés avec l'addition de la pouzzolane naturelle en présence de différentes teneurs en Na_2SO_4 . Généralement, il s'avère que l'utilisation de la pouzzolane naturelle en présence de différentes teneurs en Na_2SO_4 fait apporter une légère diminution dans l'indice de plasticité des deux sols argileux stabilisés. Après 1 et 15 jours de cure, les valeurs de l'indice de plasticité du SG traité avec l'addition de la pouzzolane naturelle en présence de différentes teneurs en Na_2SO_4 sont presque comparables à celles du même sol traité sans présence du Na_2SO_4 . Tandis qu'après 30 jours de cure, les valeurs de l'indice de plasticité du même sol (SG) traité avec le même additif (PN) en présence de différentes teneurs en Na_2SO_4 sont bien plus grandes par rapport à celles du même sol traité sans présence du Na_2SO_4 . Il est à noter que l'indice de plasticité du SG traité avec l'addition de la pouzzolane naturelle n'est pas vraiment influencé par la présence du Na_2SO_4 . D'autre part, pour le cas du SR traité avec le même additif (PN), les valeurs de l'indice de plasticité sont nettement supérieures à celles du même sol traité sans présence du Na_2SO_4 .

Il est clair de constater que les sols argileux traités avec l'addition de la pouzzolane naturelle ont la tendance à réagir positivement et aussi bien fortement avec l'addition du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ qu'avec l'addition du Na_2SO_4 additionné. En outre, la différence dans les valeurs de l'indice de plasticité entre le Na_2SO_4 et $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sont plus prononcées avec du SG qu'avec du SR.

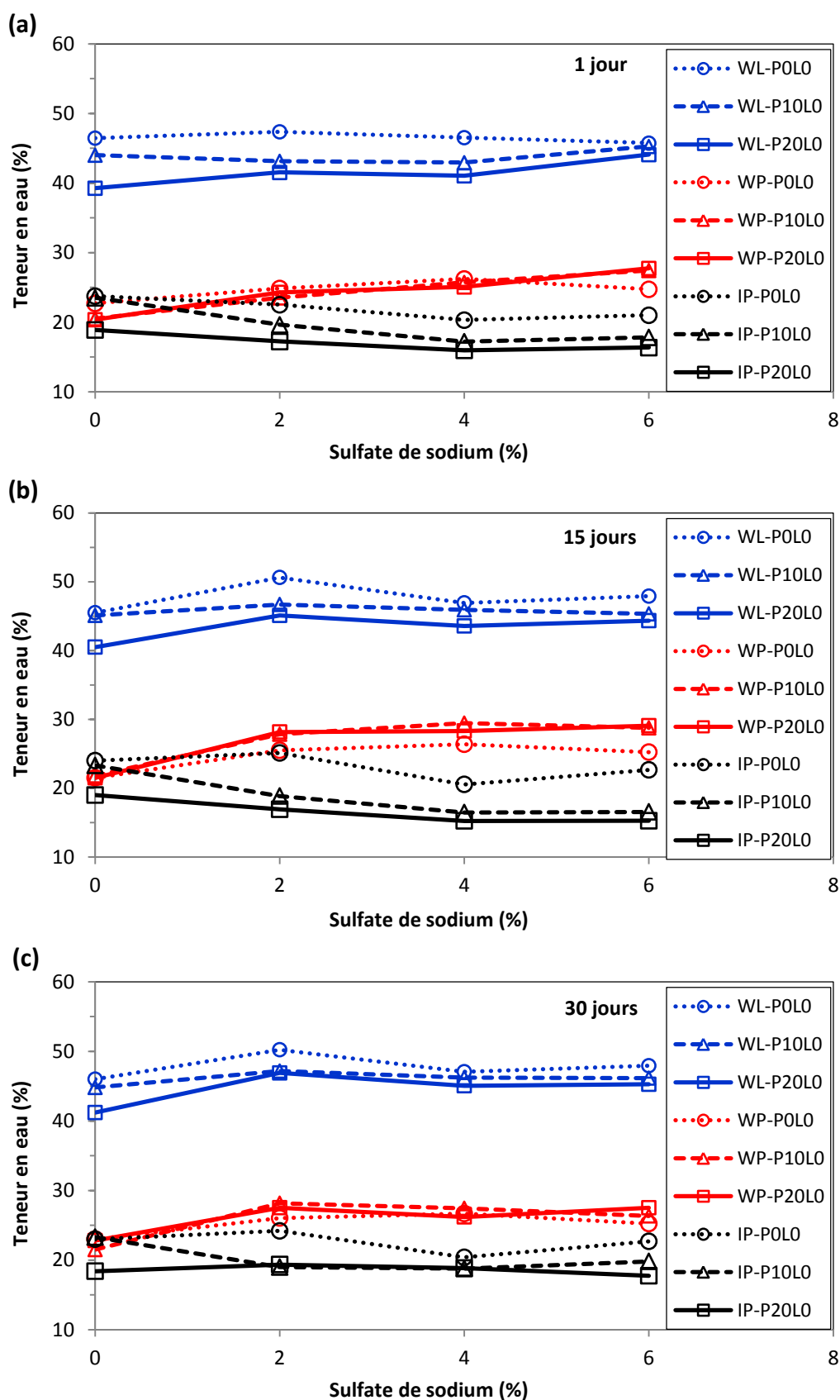


Fig. 4.11 — Effet de différentes teneurs en Na_2SO_4 sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé par l'utilisation de la pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

4.3.5 Traitement combiné de L-PN en présence du CaSO₄

4.3.5.1 Effet du CaSO₄ sur la limite de liquidité

Les Figures 4.12 et 4.13 illustrent les résultats de l'effet du CaSO₄.2H₂O sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle. En général, la forte diminution des valeurs de la W_L est obtenue lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées. Cependant, avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle, les échantillons des deux sols argileux stabilisés en présence de différentes teneurs en CaSO₄.2H₂O montrent une légère diminution des valeurs de la W_L par rapport aux échantillons des deux sols traités sans présence du CaSO₄.2H₂O. Par exemple, avec la combinaison 20%NP+8%L en tant qu'additif, la W_L des échantillons du SG contenant 6% du CaSO₄.2H₂O diminue de 62.2 jusqu'à 59.6% et de 61 jusqu'à 58.2% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.12a et c). Pour la même combinaison et la même teneur en CaSO₄.2H₂O, la W_L du SR diminue de 54.9 jusqu'à 51.7% et de 58.1 jusqu'à 47.8% après 1 et 30 jours de cure, respectivement (Fig. 4.13a et c). Il est à constater que la réduction des valeurs de la W_L avec la teneur croissante du CaSO₄.2H₂O et de la période de cure est plus prononcée avec le SR qu'avec le SG.

4.3.5.2 Effet du CaSO₄ sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet du CaSO₄.2H₂O sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sont présentés dans les Figures 4.12 et 4.13. Il est clair de voir que la W_P des échantillons des deux sols argileux traités augmente avec l'augmentation de la teneur en CaSO₄.2H₂O, de la teneur en chaux-pouzzolane naturelle et de la période de cure. En effet, l'addition de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle aux échantillons du SG contenant du CaSO₄.2H₂O montre une augmentation de la W_P par rapport aux échantillons stabilisés en absence du CaSO₄.2H₂O. Considérant que, les valeurs de la W_P des échantillons du SR traités avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sans présence du CaSO₄.2H₂O sont très élevées par rapport aux échantillons contenant du CaSO₄.2H₂O. Par ailleurs, l'effet combiné de chaux-pouzzolane naturelle fait augmenter la W_L d'une façon significative par rapport à l'utilisation de la chaux ou de la pouzzolane naturelle seule.

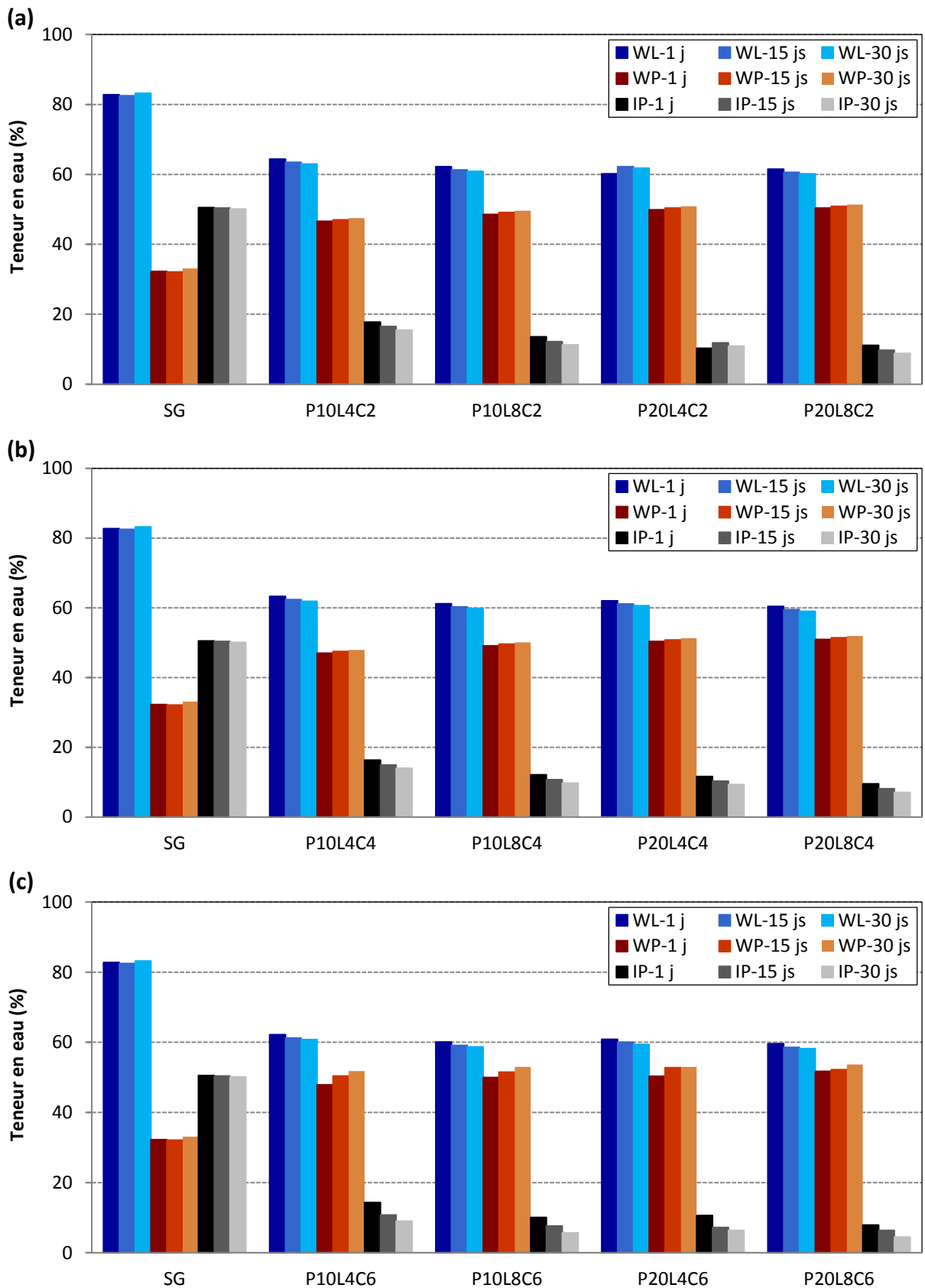


Fig. 4.12 — Effet de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé par l'utilisation la combinaison de chaux-pozzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

4.3.5.3 Effet du CaSO_4 sur l'indice de plasticité

Les Figures 4.12 et 4.13 illustrent les changements dans l'indice de plasticité (I_p) des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en présence de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Il s'avère que les fortes réductions dans les valeurs de l'indice de plasticité des échantillons des deux sols argileux stabilisés sont obtenues avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle lors de la cure en présence de différentes teneurs en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. En outre, une diminution significative de l'indice de plasticité des échantillons des deux sols argileux a été observée avec la cure et notamment avec la teneur croissante du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Par exemple, pour le cas du SG stabilisé avec 10% de NP et 4% de chaux et à près 1 jour de cure, l'indice de plasticité diminue de 19.2% jusqu'à 17.9, 16.3 et 14.3% respectivement avec la présence de 2, 4 et 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Fig. 4.12). En revanche, pour le même sol et après 30 jours de cure, l'indice de plasticité diminue de 16.3% jusqu'à 15.5, 14 et 8.9% en présence de 2, 4 et 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectivement (Fig. 4.12). En outre, la diminution de l'indice de plasticité des échantillons des deux sols argileux avec la teneur croissante du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et de la période de cure est considérablement importante lorsque la teneur en chaux-pouzzolane naturelle augmente. Par exemple, pour le cas du SG stabilisée avec 10% de pouzzolane naturelle et 4% de chaux et après 30 jours de cure, l'indice de plasticité diminue de 16.3% jusqu'à 15.5, 14 et 8.9% avec l'addition de 2, 4 et 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectivement (Fig. 4.12). En revanche, pour le même sol traité avec la combinaison de 20% de pouzzolane naturelle et 8% de chaux et pour la même période de cure, l'indice de plasticité diminue de 10.9% jusqu'à 8.8, 7.2 et 4.5% respectivement avec la présence de 2, 4 et 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Fig. 4.12). En général, les valeurs l'indice de plasticité des échantillons des deux sols argileux traités avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en présence du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sont très élevées par rapport aux échantillons traités en absence du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

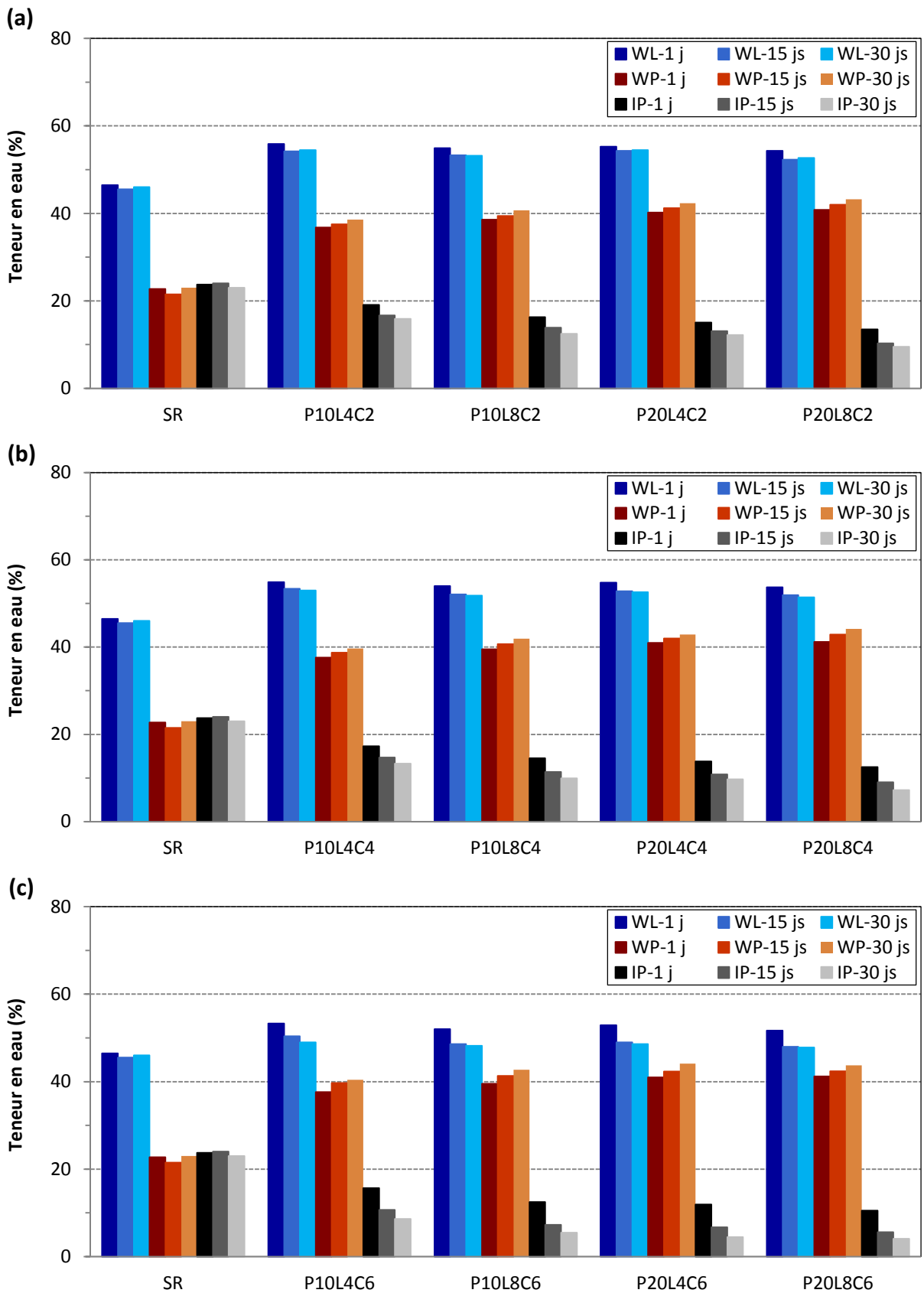


Fig. 4.13 — Effet de différentes teneurs en CaSO₄·2H₂O sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé par l'utilisation la combinaison de chaux-pozzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

4.3.6 Traitement combiné de L-PN en présence du Na_2SO_4

4.3.6.1 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de liquidité

Les résultats de l'effet du Na_2SO_4 sur la limite de liquidité (W_L) des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sont présentés sur les Figures 4.14 et 4.15. En général, la plus forte diminution de la W_L est obtenue lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées. Cependant, la W_L des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle augmente avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4 , la teneur en chaux-pouzzolane naturelle et de la période de cure, à savoir que le SR développe des valeurs bien plus grandes que celles développées par le SG (Figs. 4.14 et 4.15). Il est clair de constater que l'effet du Na_2SO_4 sur la W_L des échantillons des deux sols argileux traités avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est négligeable par rapport aux mêmes échantillons de sols traités à la chaux seule. Par comparaison, le $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ fait réduire la W_L des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle alors que le Na_2SO_4 fait l'augmenter.

4.3.6.2 Effet du Na_2SO_4 sur la limite de plasticité

Les résultats de l'effet du Na_2SO_4 sur la limite de plasticité (W_P) des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle sont présentés dans les Figures 4.14 et 4.15. En présence du Na_2SO_4 , la W_P des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle augmente avec la teneur en Na_2SO_4 , la teneur en chaux-pouzzolane naturelle, et la période de cure (Figs. 4.14 et 4.15). Par comparaison, il est à observer que l'augmentation de la W_P des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle est plus prononcée avec le Na_2SO_4 qu'avec le $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Par exemple, après 30 jours de cure, la W_P du SG stabilisé avec la combinaison de 20% de pouzzolane naturelle et 8% de chaux augmente de 50.1% jusqu'à 51.4, 51.9 et 53.7% en présence de 2, 4 et 6% du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectivement. En revanche, pour le même sol stabilisé avec la même combinaison et pour la même période de cure, la W_P augmente de 50.1% jusqu'à 81.3, 89.8 et 93.6% en présence de 2, 4 et 6% du Na_2SO_4 , respectivement.

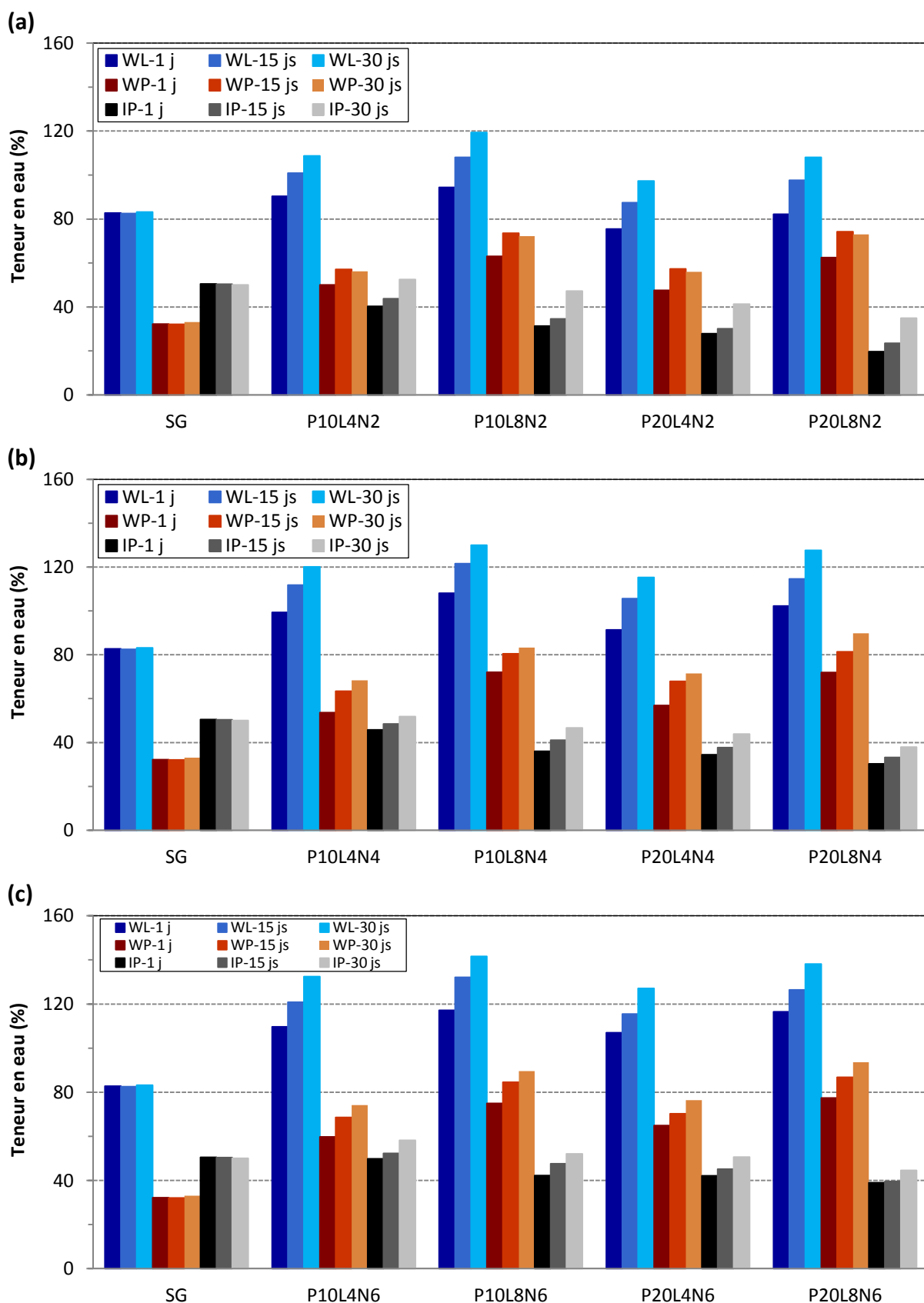


Fig. 4.14 — Effet de différentes teneurs en Na₂SO₄ sur les limites d'Atterberg du SG stabilisé par l'utilisation la combinaison de chaux-pozzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

4.3.6.3 Effet du Na_2SO_4 sur l'indice de plasticité

Les Figures 4.14 et 4.15 illustrent les changements dans l'indice de plasticité (I_p) des deux sols argileux stabilisés avec la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en présence de différentes teneurs en Na_2SO_4 . L'utilisation de la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle en tant qu'additif en présence du Na_2SO_4 affecte fortement l'indice de plasticité des deux sols argileux traités. En effet, l'indice de plasticité du SG diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux-pouzzolane naturelle alors qu'il augmente avec l'augmentation de la teneur en Na_2SO_4 et de la période de cure. Par exemple, dans le cas du SG et après 30 jours de cure, la combinaison de 10% de pouzzolane naturelle et 4% de chaux fait augmenter de manière significative l'indice de plasticité de 16.3% jusqu'à 48, 51.8 et 58.2% en présence de 2, 4 et 6% du Na_2SO_4 , respectivement (Fig. 4.14). Cependant, pour le même sol et pour la même période de cure, la combinaison de 20% de pouzzolane naturelle et 8% de chaux fait augmenter l'indice de plasticité encore plus de 10.9% jusqu'à 26.7, 37.9 et 44.6% en présence de 2, 4 et 6% du Na_2SO_4 , respectivement (Fig. 4.14). En revanche, pour le cas du SR, l'indice de plasticité diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux-pouzzolane naturelle et de la teneur en Na_2SO_4 alors qu'il augmente avec la période de cure. Par exemple, dans le cas du SR et après 30 jours de cure, la combinaison de 10% de pouzzolane naturelle et 4% de chaux fait augmenter l'indice de plasticité de 17.6% jusqu'à 32.4, 26.2 et 22.4% en présence de 2, 4 et 6% Na_2SO_4 , respectivement (Fig. 4.15). Cependant, pour le même sol et pour la même période de cure, la combinaison de 20% de pouzzolane naturelle et 8% de chaux fait augmenter l'indice de plasticité encore plus de 11.1% jusqu'à 32.9, 28.4 et 22.9% en présence de 2, 4 et 6% du Na_2SO_4 , respectivement (Fig. 4.15). Les résultats obtenus montrent que la présence du Na_2SO_4 provoque un effet presque marginal sur l'indice de plasticité du SR alors qu'il engendre un effet indésirable sur l'indice de plasticité du SG. Il est très clair de constater que dans tous les cas de traitement, les différences dans les valeurs de l'indice de plasticité entre le Na_2SO_4 et le $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ sont plus prononcées avec le SG qu'avec le SR. En général, l'amélioration de la consistance des deux sols argileux stabilisés dépend du type et de la teneur en additif ajouté, du type et de la teneur en sulfate utilisé, de la période de cure et enfin de la composition minéralogique du sol stabilisé.

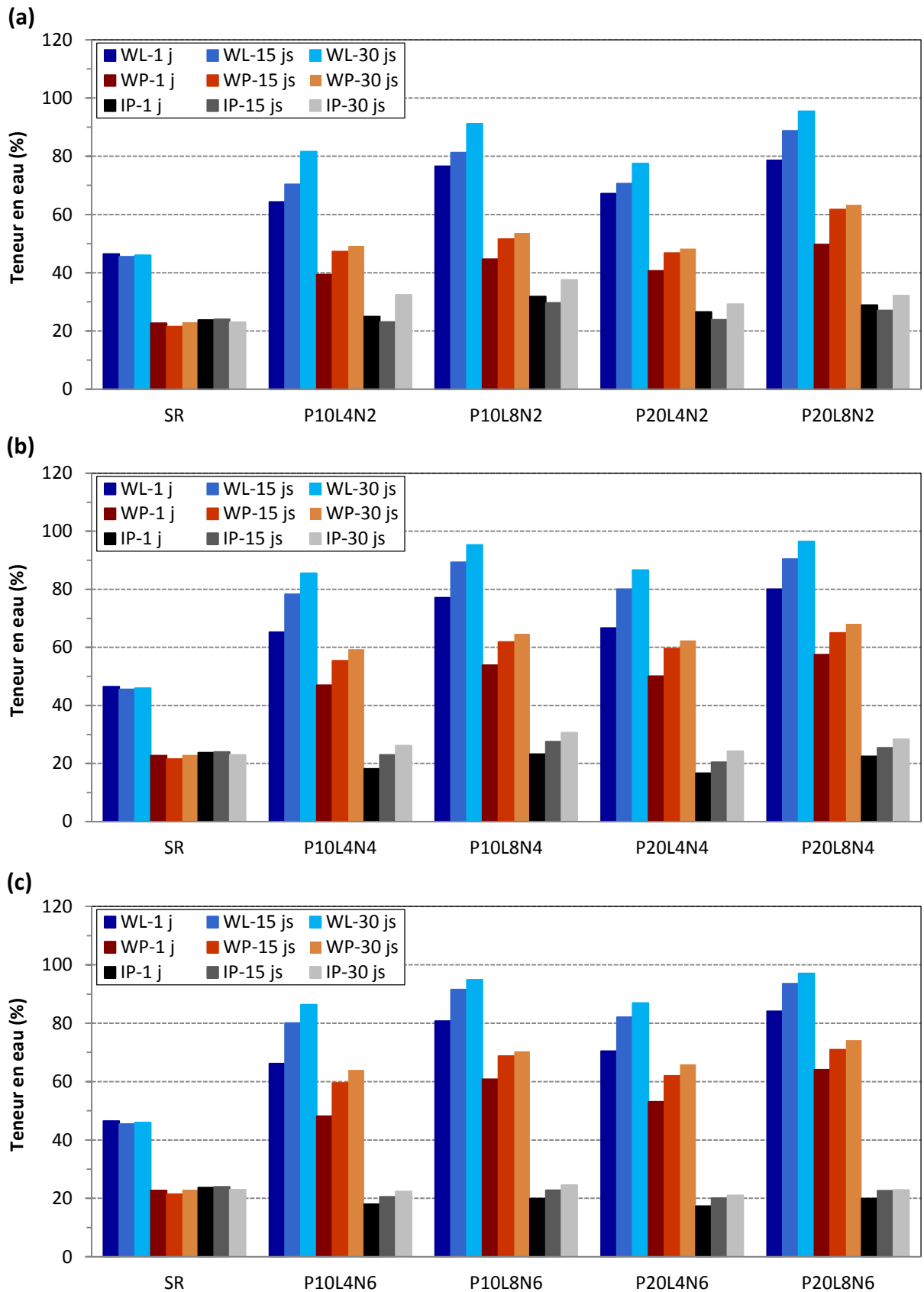


Fig. 4.15 — Effet de différentes teneurs en Na₂SO₄ sur les limites d'Atterberg du SR stabilisé par l'utilisation la combinaison de chaux-pouzzolane naturelle pour différentes périodes de cure.

4.4 Conclusion

De nombreux essais ont été entrepris au 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 Na_2SO_4) sur les limites d'Atterberg (W_L , W_P et I_P) des deux sols argileux (SG et SR) traités par l'utilisation de la chaux (L), de la pouzzolane naturelle (PN) et de leur combinaison (L-PN). En se basant sur les résultats des tests effectués, les conclusions suivantes peuvent être dégagées :

- La W_L des échantillons des deux sols argileux traités diminue avec la teneur en chaux additionnée alors qu'elle augmente avec la période de cure. De plus, la plus forte diminution des valeurs de la W_L est obtenue lorsque la chaux et la pouzzolane naturelle sont combinées. Cependant, l'addition de la pouzzolane naturelle seule n'importe qu'un effet marginal sur la W_L par rapport à l'addition de la chaux.
- L'addition de la pouzzolane naturelle seule provoque une réduction négligeable dans les valeurs de la W_P . Contrairement à l'utilisation de la pouzzolane naturelle seule, des grandes valeurs de la W_P ont été achevées pour les deux sols argileux étudiés où elle augmente avec la période de cure et également avec l'augmentation de la teneur en chaux ou combinée avec la pouzzolane naturelle.
- L'addition de la pouzzolane naturelle aux sols argileux fait réduire légèrement leur indice de plasticité. Cependant, il existe une diminution significative dans les valeurs de l'indice de plasticité des deux sols argileux étudiés lorsque la chaux est utilisée en tant qu'additif. En outre, une nouvelle baisse des valeurs de l'indice de plasticité est rapportée avec la combinaison des deux.
- La W_L des deux sols argileux non traités diminue considérablement avec l'augmentation de la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ et de la période de cure alors qu'il y a un effet marginal en présence seule du Na_2SO_4 .
- Le Na_2SO_4 fait augmenter d'une façon significative la W_L des deux sols argileux traités à la chaux ou avec la chaux-PN alors qu'elle diminue en présence du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. De plus, la W_L des deux sols argileux traités à la chaux ou avec la chaux-PN en présence du Na_2SO_4 augmente d'une façon considérable avec l'augmentation de la teneur en chaux (ou chaux-PN) additionnée et de la période de cure. Contrairement à la présence du Na_2SO_4 , la W_L diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux additionnée et de la période de cure si une fois le $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ est présent.
- Le $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ fait diminuer la W_L des deux sols argileux traités avec l'addition de pouzzolane naturelle notamment avec la période de cure. En revanche, en présence du

Na_2SO_4 , la W_L des mêmes sols augmente fortement avec l'augmentation de la période de cure alors qu'elle diminue avec l'augmentation de la teneur en pouzzolane naturelle.

- Quelque soit la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ additionnée pour différentes périodes de cure, les différences dans les valeurs de la W_L entre la chaux et la pouzzolane naturelle sont plus prononcées avec le SR qu'avec le SG alors que les différences dans les valeurs de la même propriété (W_L) entre les deux mêmes additifs (chaux et PN) sont plus prononcées avec le SG qu'avec le SR.
- Quelque soit la teneur et le type du sulfate utilisé, la W_P des deux sols argileux stabilisés augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux ou chaux-PN, de la teneur en sulfate ajouté et de la période de cure.
- L'augmentation de la W_P des deux sols argileux traités à la chaux ou avec la chaux-NP est plus prononcée avec le Na_2SO_4 qu'avec le $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. En outre, les effets causés par ces deux types de sulfates sur la W_P sont négligeables lorsque la pouzzolane naturelle est utilisée toute seule en tant que stabilisant.
- La présence du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ dans les deux sols argileux traités avec l'addition de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison fait réduire considérablement leur indice de plasticité. Contrairement au $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, la présence du Na_2SO_4 fait augmenter leur indice de plasticité.
- Les augmentations et les diminutions de l'indice de plasticité dépendent de plusieurs facteurs à savoir : la teneur et le type de l'additif utilisé, la teneur et le type du sulfate en présence, la période de cure (la durée d'exposition aux sulfates) et la composition minéralogique des sols qui peut jouer un rôle très important dans les réactions chimiques avec les sulfates.
- Dans tous les cas des traitements effectués, il s'avère que les ions calcium (Ca^{2+} venant de l'addition de la chaux ou du $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) produisent des effets bénéfiques alors que les ions sodium (Na^+ , venant de l'addition du Na_2SO_4) apportent des effets indésirables sur les limites d'Atterberg des deux sols argileux stabilisés.