

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 3

---

## Etude Expérimentale

- 3.1. *Introduction*
- 3.2. *Matériaux utilisés et préparation*
- 3.3. *Déroulement des essais*
- 3.4. *Conclusion*

### 3.1 Introduction

Un programme expérimental a été entrepris pour mieux comprendre l'effet des sulfates (monovalent ou divalent) sur le traitement des sols argileux stabilisés à la chaux, à la pouzzolane naturelle et par leur combinaison. Et pour cela, nous avons sélectionné deux types de sols argileux, un sol gris de forte plasticité et un sol rouge de plasticité moyenne. Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes caractéristiques des matériaux choisis pour cette étude ainsi que les protocoles expérimentaux des expériences effectuées. Toutes les analyses ont été réalisées avec des matériaux argileux réduits en poudre de granulométrie inférieure à 1 mm. Les protocoles expérimentaux employés s'appuient sur des normes ASTM (2000). Les essais ont été effectués au niveau du laboratoire de l'habitat et de la construction centre (LHCC) de Rouiba et Oued Smar (Alger).

### 3.2 Matériaux utilisés et préparation

#### 3.2.1 Sols naturels

##### 3.2.1.1 Lieu de prélèvement

Deux sols ont été utilisés dans cette étude, le premier est un sol argileux gris (SG), il a été prélevé à partir de 4m de profondeur, de provenance d'un projet de remblai situé approximativement à 18 km au Nord-est de la ville de Chlef (Fig. 3.1). Le deuxième est un sol argileux rouge (SR), il a été obtenu à partir de 5m de profondeur, de provenance d'un projet de l'Autoroute Est-Ouest situé approximativement à 25 km à l'Est de la ville de Chlef (Fig. 3.2).

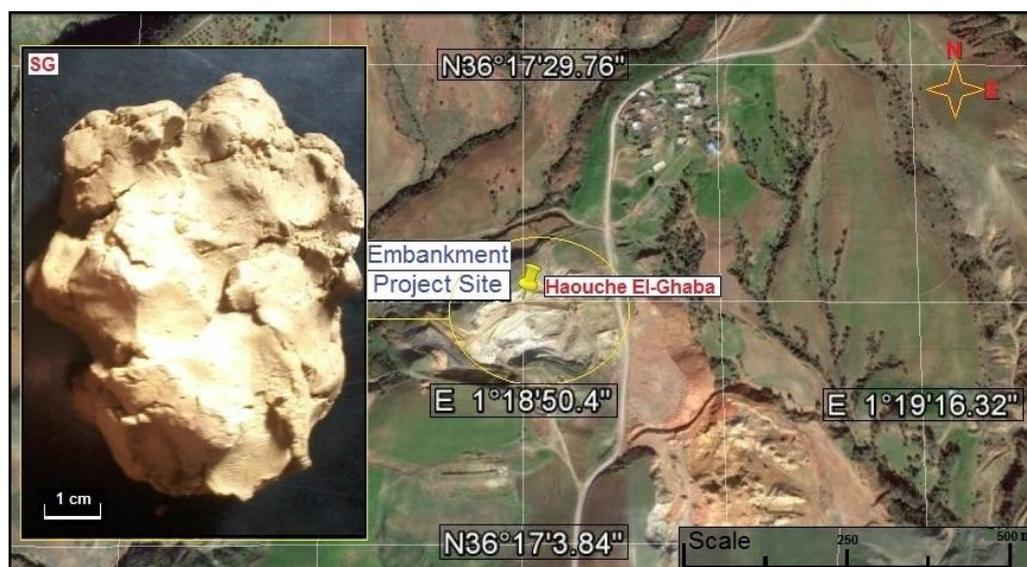


Fig. 3.1 — Prélèvement du sol argileux gris (SG) à partir d'un projet de remblai (Haouche El-Ghaba).



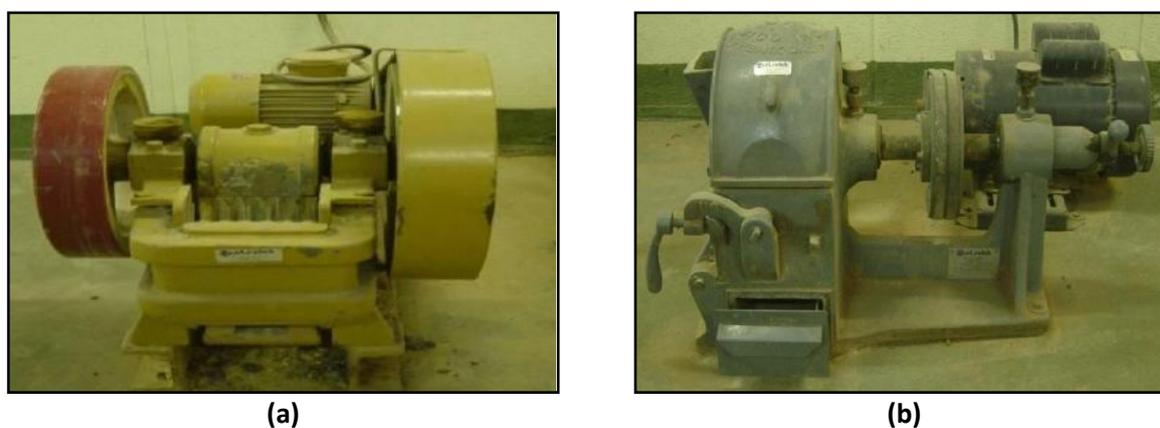
**Fig. 3.2** — Prélèvement du sol argileux rouge (SR) à partir d'un projet d'autoroute Est-Ouest (Harchoun, Algérie).

### 3.2.1.2 Préparation

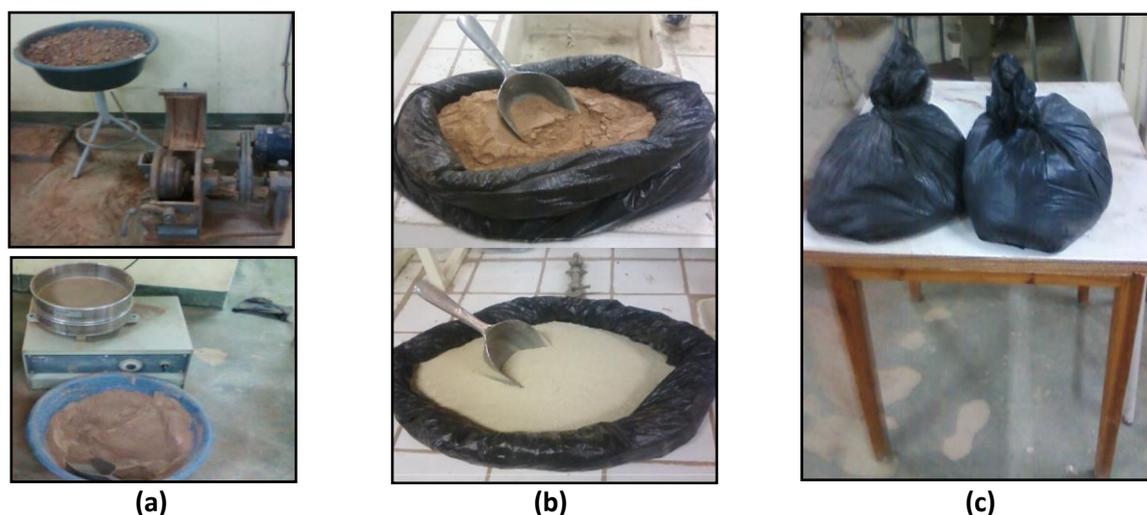
Après leur extraction, les sols ont été placés dans des sacs en plastique, transportés au laboratoire et passés à l'étuve à 50°C pendant 24h. Après séchage, les sols ont été ensuite concassés et broyés pour la préparation et exécution des essais géotechniques d'identification (ou de caractérisation) (Fig. 3.3 et Fig. 3.4).

### 3.2.1.3 Identification et caractérisation

Le Tableau 3.1 représente les différentes caractéristiques physico-mécaniques des sols fins étudiés ainsi que leur classification géotechnique (Harichane et al. 2011a). Ces caractéristiques ont été déterminées suivant les normes américaines (ASTM, 2000). Les propriétés chimiques sont reportées dans le Tableau 3.2 (NF EN 196-2, 2013). Tandis que les propriétés minéralogiques sont représentées dans le Tableau 3.3 et la Figure 3.5.



**Fig. 3.3** — Moyens utilisés pour la préparation des sols, (a): concasseur, (b): broyeur.



**Fig. 3.4** — Préparation des sols pour les essais au laboratoire, (a): broyage et tamisage au tamis 1mm, (b): sols après tamisage, (c): conservation hors humidité dans des sacs hermétiques.

**Tableau 3.1** — Caractéristiques physico-mécaniques des sols.

Caractéristiques de base	Sol gris (SG)	Sol rouge (SR)
Teneur en eau naturelle (%)	32.9	13.8
Densité spécifique	2.71	2.84
Eléments passant au tamis 80 $\mu$ m (%)	85	97.5
Limite de liquidité (%)	82.8	46.5
Limite de plasticité (%)	32.2	22.7
Indice de plasticité (%)	50.6	23.8
Classification (USCS)	CH	CL
Teneur en eau optimale (%)	28.3	15.3
Densité sèche maximale (kN/m <sup>3</sup> )	13.8	16.9
Résistance à la compression non confinée (MPa)	0.34	2.54
Perte au feu (%)	17.03	7.13

**Tableau 3.2** — Propriétés chimiques des sols étudiés.

Nom chimique	Formule chimique	SG (%)	SR (%)
Oxyde de calcium	CaO	14.43	2.23
Oxyde de magnésium	MgO	1.99	2.14
Ferrite	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.56	7.22
Alumine	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.15	19.01
Silice	SiO <sub>2</sub>	43.67	57.02
Sulfite	SO <sub>3</sub>	0.04	0.19
Chlorure	Cl <sup>-</sup>	0.14	0.2
Potentiel d'hydrogène	pH	9.18	7.25
Oxyde de sodium	Na <sub>2</sub> O	0.34	0.93
Oxyde de potassium	K <sub>2</sub> O	1.96	3.17
Dioxyde de titane	TiO <sub>2</sub>	0.65	0.83
Phosphore	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.18	0.14

**Tableau 3.3** — Propriétés minéralogiques des sols étudiés.

Nom minéralogique	Formule chimique	SG (%)	SR (%)
Quartz	SiO <sub>2</sub>	20	32
Calcite	CaCO <sub>3</sub>	26	4
Albite	NaAlSi <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	-	8
Illite	2K <sub>2</sub> O.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .24SiO <sub>2</sub> .2H <sub>2</sub> O	16	24
Kaolinite	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	12	16
Montmorillonite	Al <sub>2</sub> ((Si <sub>4</sub> Al)O <sub>10</sub> )(OH) <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	20	-
Chlorite	Mg <sub>2</sub> Al <sub>4</sub> O <sub>18</sub> Si <sub>3</sub>	-	9
Minéraux ferrugineux et autres	-	6	7

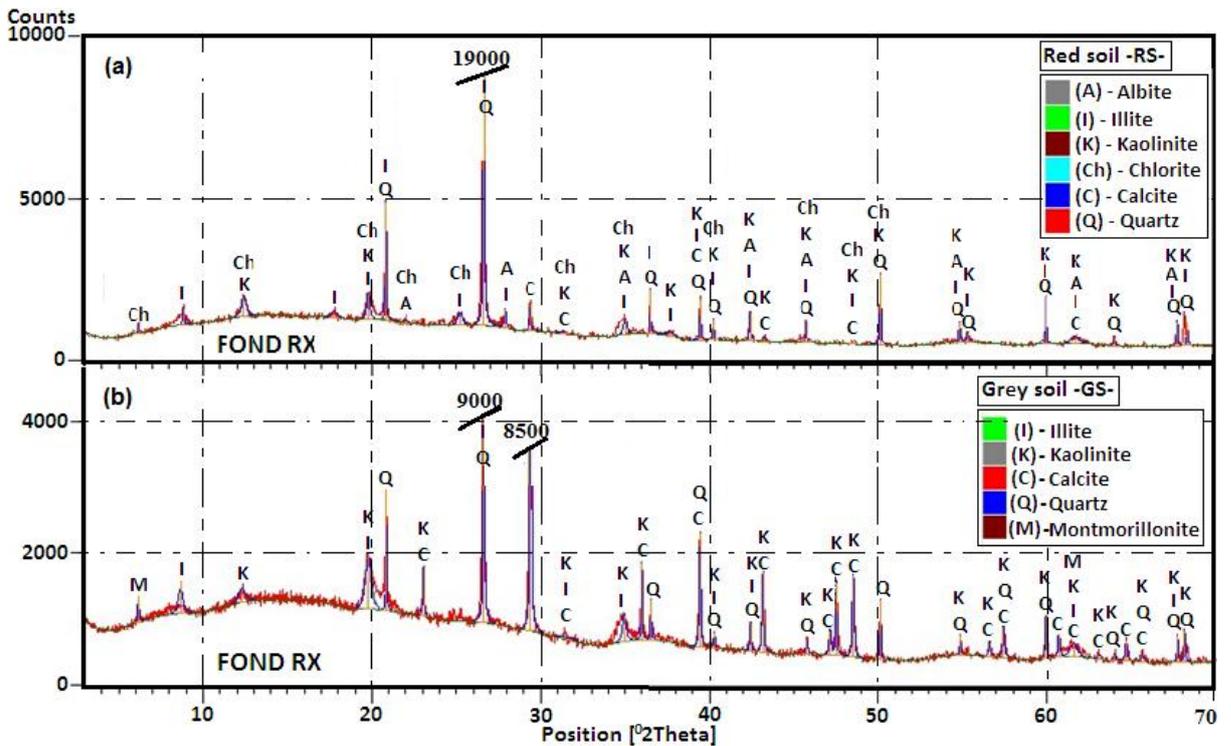


Fig. 3.5 — Les diagrammes diffractométriques présentant la composition minéralogique des sols étudiés, (a): sol argileux rouge, (b): sol argileux gris.

### 3.2.2 Pouzzolane naturelle

#### 3.2.2.1 Lieu de prélèvement

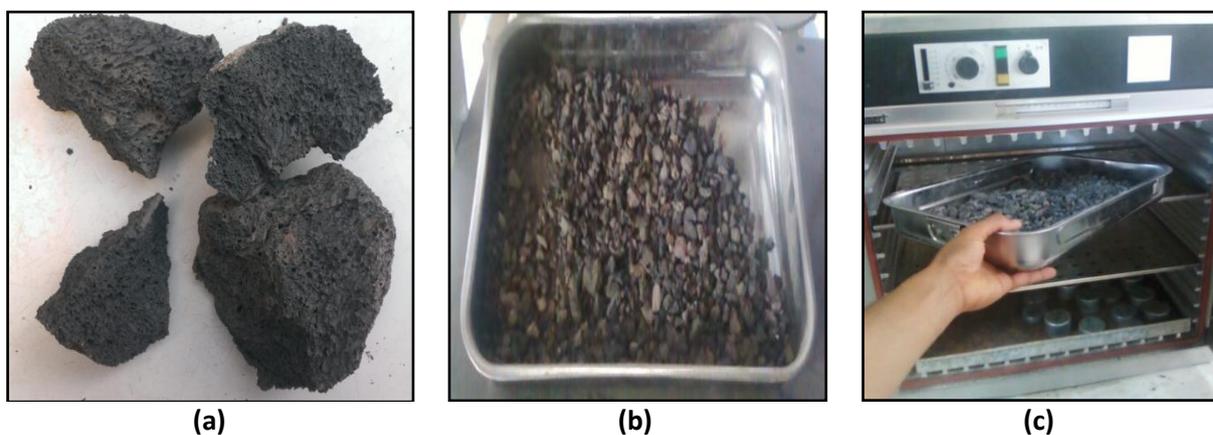
La pouzzolane naturelle utilisée dans cette étude est une roche d'origine volcanique. Elle a été procurée du gisement de Bou-Hamidi (Béni-Saf) situé dans l'Ouest du territoire national sous forme de roches concassées de type pierre ponce de diamètre variant de 10 à 20cm. (Fig. 3.6)



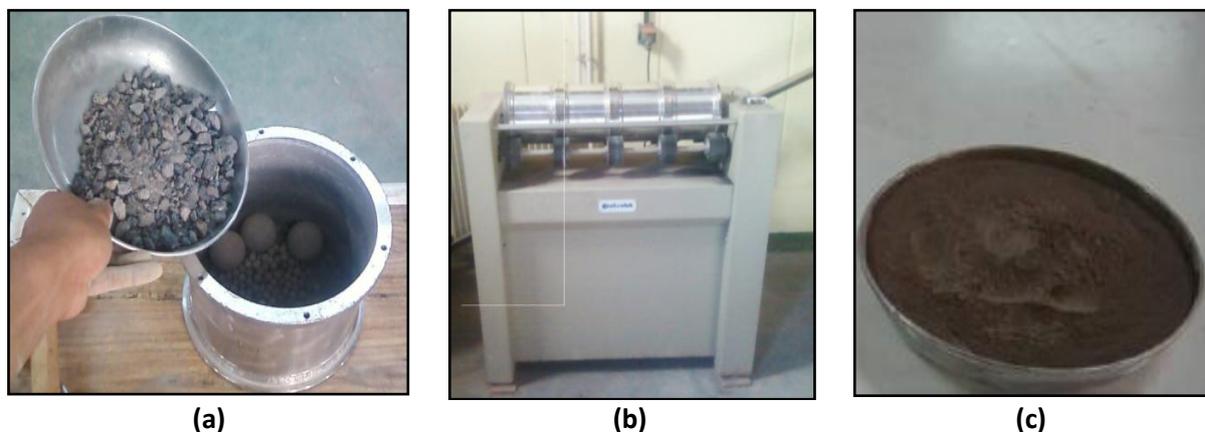
Fig. 3.6 — Le gisement volcanique de Bou-Hamidi (Béni-Saf, Algérie).

### 3.2.2.2 Préparation

Nous avons d'abord procédé à son concassage puis son étuvage à 105°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage au micro-Deval (Fig. 3.7). La roche a été broyée au laboratoire jusqu'à une surface spécifique de 420 m<sup>2</sup>/kg en se basant sur un broyage au micro-Deval (Fig. 3.8).



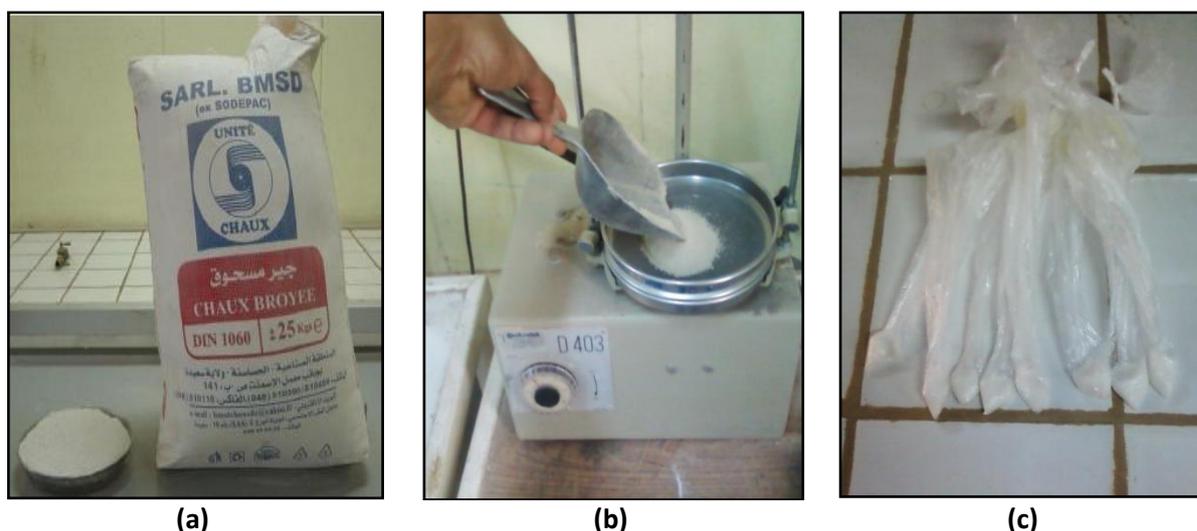
**Fig. 3.7** — Préparation de la pouzzolane naturelle pour l'essai micro-Deval, (a): fragments de pouzzolane naturelle, (b): pouzzolane naturelle concassée, (c): passage de la pouzzolane naturelle à l'étuve à 50°C pendant 24h.



**Fig. 3.8** — Broyage de la pouzzolane naturelle au micro-Deval jusqu'à une finesse de 420 m<sup>2</sup>/kg, (a): introduction de 1.5kg de PN concassée avec 3 boules et 1.5kg de billes dans chaque cylindre, (b): l'emplacement des cylindres et lancement de l'essai pendant 18h, (c): la PN après broyage.

### 3.2.3 Chaux

La chaux utilisée dans cette étude est une chaux vive produite par la société BMSD-SARL située dans la ville de Saïda (Sud-ouest du territoire national), un tamisage au tamis 0.4mm avant son utilisation a été procédé pour éliminer les grumeaux qui peuvent se former en présence d'une éventuelle humidité (Fig. 3.9). Les propriétés physico-chimiques de la chaux et de la pouzzolane naturelle sont présentées dans le Tableau 3.4 (Harichane et al. 2011a).



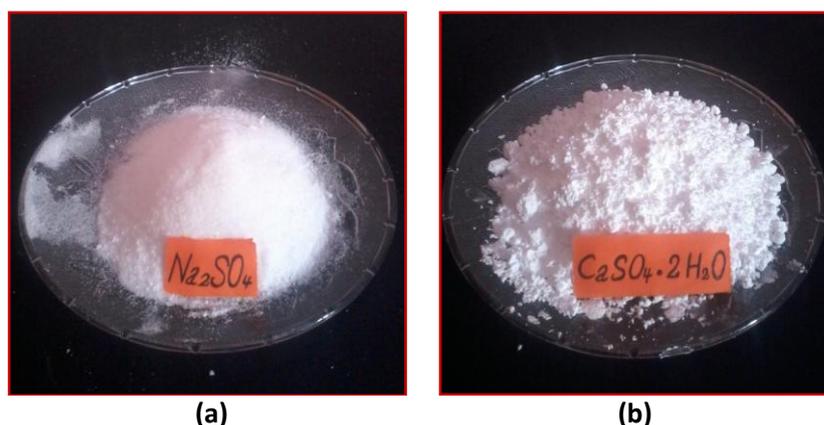
**Fig. 3.9** — Préparation de la chaux, (a): emballage utilisé pour la chaux vive de Saida, (b): tamisage au tamis 0.4mm, (c): pesage de la chaux et conservation dans des sacs hermétiques.

**Tableau 3.4** — Propriétés physico-chimiques des ajouts utilisés.

Nom chimique	Chaux (%)	Pouzzolane naturelle (%)
CaO	> 83.3	9.90
MgO	< 0.5	2.42
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 2	9.69
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	< 1.5	17.5
SiO <sub>2</sub>	< 2.5	46.4
SO <sub>3</sub>	< 0.5	0.83
Na <sub>2</sub> O	0.4 - 0.5	3.30
K <sub>2</sub> O	-	1.51
CO <sub>2</sub>	< 5	-
TiO <sub>2</sub>	-	2.10
P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.80
CaCO <sub>3</sub>	< 10	-
Apparence physique	Poudre blanche sèche	Poudre brune sèche
Densité spécifique	2	-
Plus de 90 µm (%)	< 10	-
Plus de 630 µm (%)	0	-
Matériau insoluble (%)	< 1	-
Densité apparente (g/l)	600 – 900	-
Perte au feu	-	5.34

### 3.2.4 Produits chimiques

Deux produits chimiques (éléments perturbateurs du traitement) ont été utilisés dans cette étude (Fig. 3.10). Le premier est un sulfate de sodium anhydre (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, sulfate monovalent) alors que le deuxième est un sulfate de calcium hydraté (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O, sulfate divalent). Les quantités prédéterminées de chacun de ces deux types de sulfates ont été mélangées à sec avec les deux sols sélectionnés sous forme d'une poudre fine (0/80µm). Les propriétés physico-chimiques de ces deux éléments chimiques sont représentées dans le Tableau 3.5.



**Fig. 3.10** — Les sulfates utilisés dans l'étude expérimentale, (a): sulfate de sodium anhydre ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), (b): sulfate de calcium hydraté ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ).

**Tableau 3.5** — Caractéristiques physico-chimiques des sulfates utilisés.

Propriétés	Sulfate de sodium	Sulfate de calcium
Couleur	Blanche	Blanche
Taille des particules	0/80 $\mu\text{m}$	0/80 $\mu\text{m}$
Formule chimique	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Masse molaire (g/mol)	142.042	136
Auuay (dried), (%)	99.5	> 99
pH (50g/L, 25°C)	5 à 8	-
Matière insoluble (%)	0.005	< 0.005
Chloride (Cl, %)	0.001	< 0.005
Phosphate ( $\text{PO}_4$ , %)	0.002	-
Calcium (Ca, %)	0.01	-
Fer (Fe, %)	0.0005	< 0.005
Sodium (Na, %)	-	< 0.005
Potassium (K, %)	-	< 0.005
Cuivre (Cu, %)	-	< 0.005

### 3.3 Déroulement des essais

#### 3.3.1 Combinaison des échantillons

Des essais au laboratoire concernant la plasticité et la résistance à la compression non confinée ont été effectués sur les deux sols argileux choisis. Plusieurs combinaisons de la pouzzolane naturelle et de la chaux ont été utilisées pour la stabilisation des deux sols. Les teneurs de la pouzzolane naturelle sont de 0, 10 et 20% tandis que celles de la chaux sont de 0, 4, 8%. Ces combinaisons ont été perturbées par 2, 4 et 6% de sulfate de sodium anhydre et d'un sulfate de calcium hydraté où les deux sulfates ont été ajoutés sous forme d'une poudre fine (0/80 $\mu\text{m}$ ) par rapport au poids du sol sec. Cela permet d'obtenir 72 combinaisons pour les deux types sols étudiés (Tableau. 3.6).

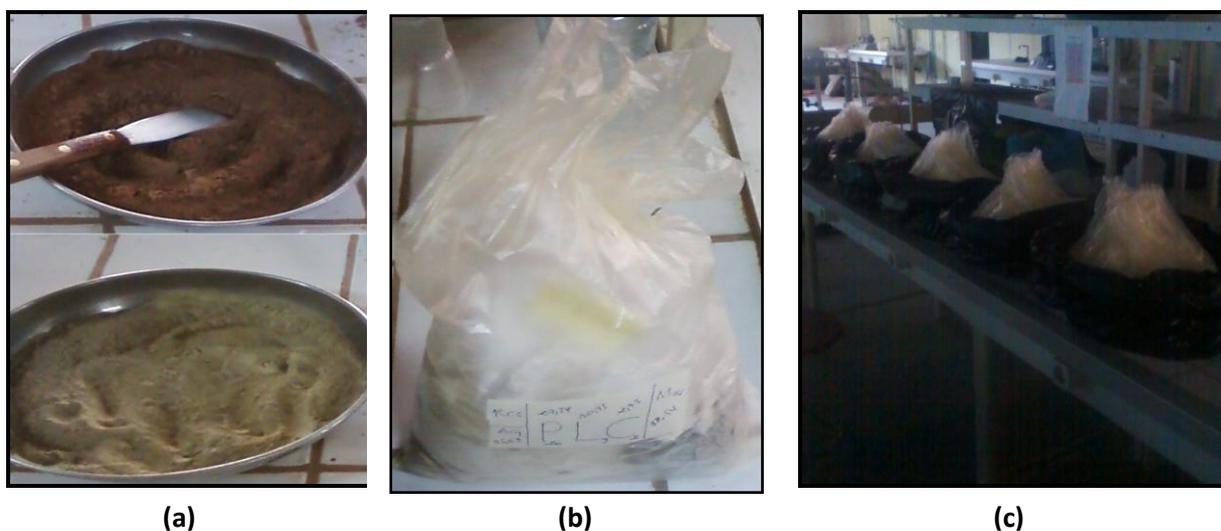
Afin que les éprouvettes de sols confectionnées et destinées à soumettre les essais d'écrasement ou de cisaillement atteignent une densité maximale, nous avons procédé à évaluer quantitativement la masse des sols, la masse des additifs (chaux, pouzzolane naturelle

et sulfates) et la masse de l'eau par rapport aux paramètres de compactage ( $\gamma_{dmax}$  et  $\omega_{opt}$ ) déterminées par l'essai de Proctor standard normal.

**Tableau 3.6** — Combinaisons des échantillons des sols stabilisés avec ou sans présence des sulfates.

D	EM (%)				D	EM (%)				D	EM (%)				D	EM (%)			
	S	NP	L	Ca		S	NP	L	Ca		S	NP	L	Na		S	NP	L	Na
RS / GS	100	0	0	0	P0L0C4	96	0	0	4	P0L0N2	98	0	0	2	P0L0N6	94	0	0	6
P0L4	96	0	4	0	P0L4C4	92	0	4	4	P0L4N2	94	0	4	2	P0L4N6	90	0	4	6
P0L8	92	0	8	0	P0L8C4	88	0	8	4	P0L8N2	90	0	8	2	P0L8N6	86	0	8	6
P10L0	90	10	0	0	P10L0C4	86	10	0	4	P10L0N2	88	10	0	2	P10L0N6	84	10	0	6
P20L0	80	20	0	0	P20L0C4	76	20	0	4	P20L0N2	78	20	0	2	P20L0N6	74	20	0	6
P10L4	86	10	4	0	P10L4C4	82	10	4	4	P10L4N2	84	10	4	2	P10L4N6	80	10	4	6
P20L4	76	20	4	0	P20L4C4	72	20	4	4	P20L4N2	74	20	4	2	P20L4N6	70	20	4	6
P10L8	82	10	8	0	P10L8C4	78	10	8	4	P10L8N2	80	10	8	2	P10L8N6	76	10	8	6
P20L8	72	20	8	0	P20L8C4	68	20	8	4	P20L8N2	70	20	8	2	P20L8N6	66	20	8	6
P0L0C2	98	0	0	2	P0L0C6	94	0	0	6	P0L0N4	96	0	0	4	D : Designation EM : Echantillon Mélangé S : Sol NP : Pouzzolane Naturelle L : Lime (Chaux) Ca : CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O Na : Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> SR : Sol Rouge (Non traité) SG : Sol Gris (Non traité)				
P0L4C2	94	0	4	2	P0L4C6	90	0	4	6	P0L4N4	92	0	4	4					
P0L8C2	90	0	8	2	P0L8C6	86	0	8	6	P0L8N4	88	0	8	4					
P10L0C2	88	10	0	2	P10L0C6	84	10	0	6	P10L0N4	86	10	0	4					
P20L0C2	78	20	0	2	P20L0C6	74	20	0	6	P20L0N4	76	20	0	4					
P10L4C2	84	10	4	2	P10L4C6	80	10	4	6	P10L4N4	82	10	4	4					
P20L4C2	74	20	4	2	P20L4C6	70	20	4	6	P20L4N4	72	20	4	4					
P10L8C2	80	10	8	2	P10L8C6	76	10	8	6	P10L8N4	78	10	8	4					
P20L8C2	70	20	8	2	P20L8C6	66	20	8	6	P20L8N4	68	20	8	4					

Les quantités de sols, d'additifs et de sulfates ont été pesées et mélangées manuellement à l'état sec jusqu'à ce que les mélanges aient une couleur plus homogène que possible. Les mélanges obtenus ont été introduits dans des sachets en plastique, préservés et stockés dans un endroit à température ambiante, comme indique sur la Figure 3.11.



**Fig. 3.11** — Différentes étapes de la préparation des échantillons, (a): malaxage et homogénéisation à sec après pesage, (b): conservation dans des sacs hermétique, (c): stockage dans un endroit sec.

### 3.3.2 Propriétés étudiées

#### 3.3.2.1 Limites d'Atterberg

La limite de plasticité ( $W_P$ ), la limite de liquidité ( $W_L$ ) et l'indice de plasticité ( $I_P$ ) ont été obtenus conformément à la norme ASTM D4318 (2000). Les variations de l'indice de plasticité des sols argileux non traités avant et après les mélanges ajoutés ont ensuite été étudiées. Les sols séchés à l'air (passant au tamis 400 $\mu$ m) ont d'abord été mélangés avec la quantité prédéterminée de sulfate de sodium, de pouzzolane naturelle et de chaux ou la combinaison des deux dans un état sec. De l'eau distillée a été ajoutée au mélange obtenu (Fig. 3.12). Pour laisser l'eau diffuser et passer à travers le mélange de sol, les pâtes des échantillons mélangés avec les additifs sans sulfates ont été laissées au repos dans un récipient hermétique pendant des périodes de cures de 1, 15 et 30 jours avant le test. Après ce traitement, la pâte a été remélangée et malaxée pendant au moins 15 min avant d'effectuer le premier essai.

Cependant, les pâtes des échantillons contenant du sulfate de sodium ou de calcium ont été obéis à trois essais après des périodes de cures de 1, 15 et 30 jours en vue d'évaluer l'effet du temps de la diffusion du sulfate de sodium (TDN) et de calcium (TDC) sur l'évolution de la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité des deux sols argileux en fonction du temps. D'après Cuisinier et al. (2011), le facteur temps révèle une importance capitale pour atteindre une diffusion maximale et homogène que possible des sulfates dans le sol. D'ailleurs, la forme de l'élément chimique avec laquelle est introduit dans le sol joue également un rôle très important. D'ailleurs, Harris et al. (2004) ont montré que la diffusion de 700 ppm de sulfate ajouté au sol sous une forme dissoute dans l'eau est bien plus forte que sous une forme de poudre fine ou grossière.

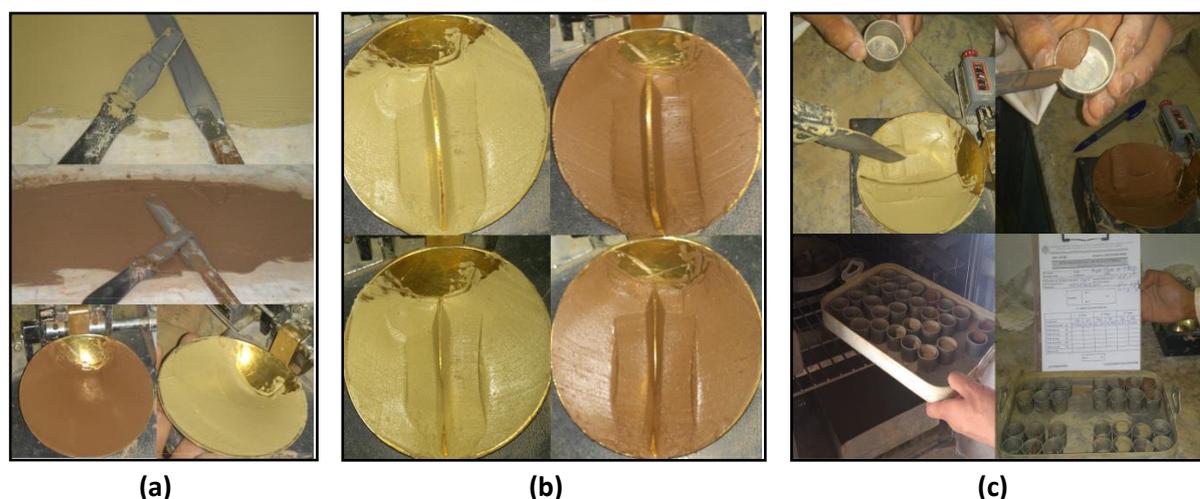


**Fig. 3.12** — Préparation de la pâte du sol avec de l'eau distillée en présence ou en absence du sulfate pendant 1, 15 et 30 jours, (a): sol argileux rouge, (b): sol argileux gris.

### 3.3.2.1.1 Limite de liquidité

La totalité du matériau est malaxée afin d'obtenir une pâte homogène et presque fluide. Après chaque période de cure (1, 15 et 30 jours) en procédant à remplir une coupelle propre et sèche, avec une spatule, d'une masse de pâte d'environ 70g. Cette pâte est étalée en plusieurs couches afin d'éviter d'emprisonner des bulles d'air, présente en fin d'opération un aspect symétrique par rapport à l'axe vertical de la coupelle (Fig. 3.13a). Ensuite, on partage la pâte en deux parties au moyen de l'outil à rainurer. On actionne la came de façon à soumettre la coupelle à une série de chocs à une cadence de 2 coups pas seconde. On note le nombre de chocs ( $N_C$ ) nécessaires pour que les lèvres de la rainure se rejoignent sur une longueur d'environ 13 mm (Fig. 3.13b). L'opération complète est effectuée au moins quatre fois sur la même pâte mais avec une teneur en eau différente à chaque fois. L'essai n'est poursuivi que lorsque  $N_C$  est compris entre 15 et 35. Les nombres de chocs de la série d'essais doivent encadrer 25 et l'écart entre deux valeurs consécutives doit être inférieur ou égale à 10. Enfin, on prélève à partir de la coupelle à l'aide d'une spatule, environ 5 g de pâte, de chaque côté des lèvres de la rainure pour en déterminer la teneur en eau par dessiccation à l'étuve (Fig. 3.13c).

La limite de liquidité ( $W_L$ ) est la teneur en eau du matériau qui correspond conventionnellement à une fermeture sur 13 mm des lèvres de la rainure après 25 chocs. Elle est calculée à partir de l'équation de la droite moyenne ajustée sur les couples de valeurs expérimentales ( $N_C$ ,  $W_L$ ) pour au moins quatre couples de valeurs. La  $W_L$  est obtenue pour une valeur de  $N_C$  égale à 25 coups. Elle est exprimée en pourcentage et arrondie au nombre entier le plus proche.

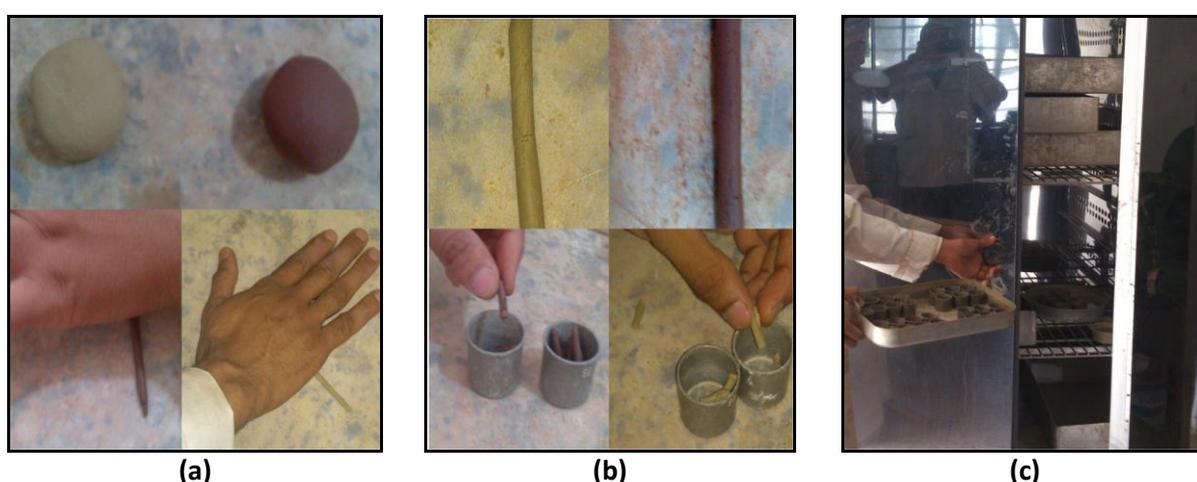


**Fig. 3.13** — Détermination de la limite de liquidité, (a): étalement de la pâte et remplissage de la coupelle, (b): pratiqué la rainure et créer une serré de chocs jusqu'à la fermeture des lèvres à 13 mm, (c): prélèvement d'échantillon et dessiccation à l'étuve.

### 3.3.2.1.2 Limite de plasticité

On forme une boulette de la pâte préparée auparavant et la rouler sur une plaque lisse à la main de façon à obtenir un rouleau qui est aminci progressivement jusqu'à ce qu'il atteigne 3 mm de diamètre. La limite de plasticité est obtenue lorsque, simultanément, le rouleau se fissure et que son diamètre atteint 3 mm. Une fois les fissures apparues, on prélève la partie centrale du rouleau et la placer dans une capsule de masse connue, la peser immédiatement et l'introduire dans l'étuve afin de déterminer sa teneur en eau (Fig. 3.14a-c).

Par définition, la limite de plasticité ( $W_P$ ) est la teneur en eau conventionnelle d'un rouleau de sol qui se fissure au moment où son diamètre atteint 3 mm. Cette limite de plasticité est la moyenne arithmétique des teneurs en eau obtenues à partir de trois essais. La valeur est exprimée en pourcentage.



**Fig. 3.14** — Détermination de la limite de plasticité, (a): formation d'une boulette de pâte et la rouler à la main pour former un rouleau, (b): amincissement du rouleau jusqu'à ce qu'il se fissure à 3 mm de diamètre et prélèvement d'échantillon, (c): dessiccation à l'étuve à 105°C pendant 24h.

### 3.3.2.1.3 Indice de plasticité

D'après Atterberg (1911), l'indice de plasticité est la gamme des teneurs en eau, à l'intérieur de laquelle le sol se comportait comme un matériau plastique. L'indice de plasticité ( $I_P$ ) est donc égal à la différence entre les valeurs de la limite de liquidité et de la limite de plasticité.

$$I_P = W_L - W_P$$

### 3.3.2.2 Compactage

Les caractéristiques de compactage Proctor normal ou modifié d'un sol sont dénommées respectivement la teneur en eau optimale et la masse volumique sèche maximale. Ces deux dernières sont des caractéristiques très utilisées pour identifier les sols et pour définir les spécifications de compactage qui leurs sont applicables lorsqu'ils sont utilisés dans la construction des remblais, des couches de forme et des assises de chaussées routières.

Les caractéristiques de compactage Proctor d'un sol sont déterminées à partir des essais dits: essai Proctor Normal ou essai Proctor Modifié. Les deux essais sont identiques dans leur principe, sauf que les valeurs des paramètres qui définissent l'énergie de compactage appliquée sont différentes.

Le principe de cet essai consiste à humidifier un sol à plusieurs teneurs en eau et le compacter selon un procédé et une énergie conventionnelle. Pour chacune des valeurs de la teneur en eau considérée, on détermine la masse volumique sèche du sol et on établit la courbe des variations de cette masse volumique en fonction de la teneur en eau. Les essais de compactage sont réalisés conformément à la norme ASTM D698 (2000).

Il convient de réduire le sol en une mouture 0/1 mm. L'échantillon sec réduit est répandu dans un bac, homogénéisé et divisé en six parts aussi semblables que possible. Chacune de ces parts est ensuite humidifiée en introduisant la quantité d'eau voulue, à l'aide d'un pulvérisateur, tout en maintenant le malaxage. Celui-ci peut se faire manuellement ou plus avantageusement à l'aide d'un malaxeur électrique. Les échantillons préparés sans et avec additifs (chaux, pouzzolane naturelle et sulfates) sont introduits dans des boîtes étanches et en les conservant pendant une heure avant l'exécution de l'essai de compactage.

Dans cette présente étude, les paramètres de compactage adoptés pour la préparation des éprouvettes des sols à soumettre aux essais de la résistance au cisaillement et de la compression non confinée sont présentés dans le Tableau 3.7 (Harichane et al. 2011a).

**Tableau 3.7** — Références de compactage des sols étudiés.

Désignation	Sol argileux gris		Sol argileux rouge	
	Densité sèche maximale (kN/m <sup>3</sup> )	Teneur en eau optimale (%)	Densité sèche maximale (kN/m <sup>3</sup> )	Teneur en eau optimale (%)
P0L0	13.8	28.3	16.9	15.3
P0L4	13.2	30.4	16.4	17.8
P0L8	12.9	31.1	16.2	17.4
P10L0	14.0	27.6	17.1	14.3
P20L0	14.3	25.8	17.1	13.8
P10L4	13.3	26.8	16.5	16.6
P20L4	13.6	29.0	16.4	18.7
P10L8	13.3	29.8	16.1	17.7
P20L8	13.6	28.2	16.0	18.2

### 3.3.2.3 Résistance à la compression non confinée

Afin d'évaluer l'effet des additifs (chaux et pouzzolane naturelle) en présence ou non des sulfates (Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> et CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) sur la capacité de portance des sols fins argileux, des essais de résistance en compression non confinée ont été effectués sur des échantillons de sols conformément à la norme ASTM D2166 (2000).

### 3.3.2.3.1 Préparation des combinaisons et confections des éprouvettes

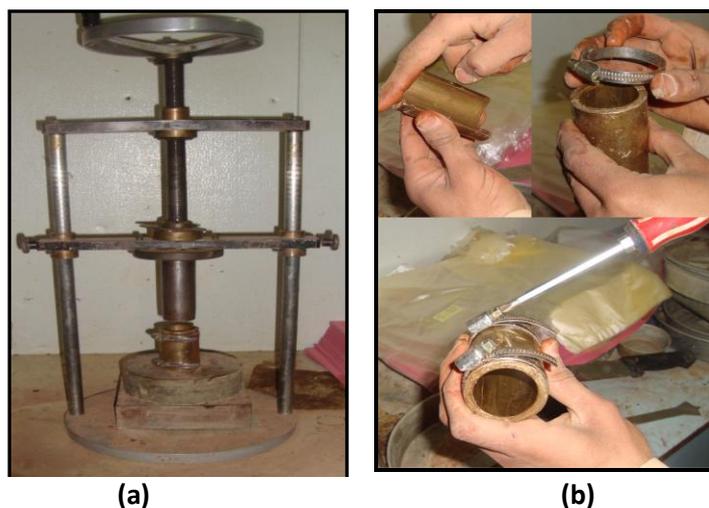
Les échantillons traités et non traités sont préparés à la teneur en eau optimale et compactés à la densité sèche maximale. Les mélanges ont été directement mélangés avec la quantité d'eau désirée et mixés manuellement jusqu'à ce que le mélange devienne homogène. Ensuite, les mélanges ont été conservés dans des sacs hermétiques et stockés à température ambiante pendant une heure. Ces dispositions garantissent l'homogénéité de la teneur en eau dans le mélange. La Figure 3.15a-c montre les étapes respectives de la préparation du sol avant d'entamer la phase de confection.



**Fig. 3.15** — Préparation des combinaisons pour la confection et le compactage, (a): humidification, (b): malaxage, (c): conservation pendant une heure.

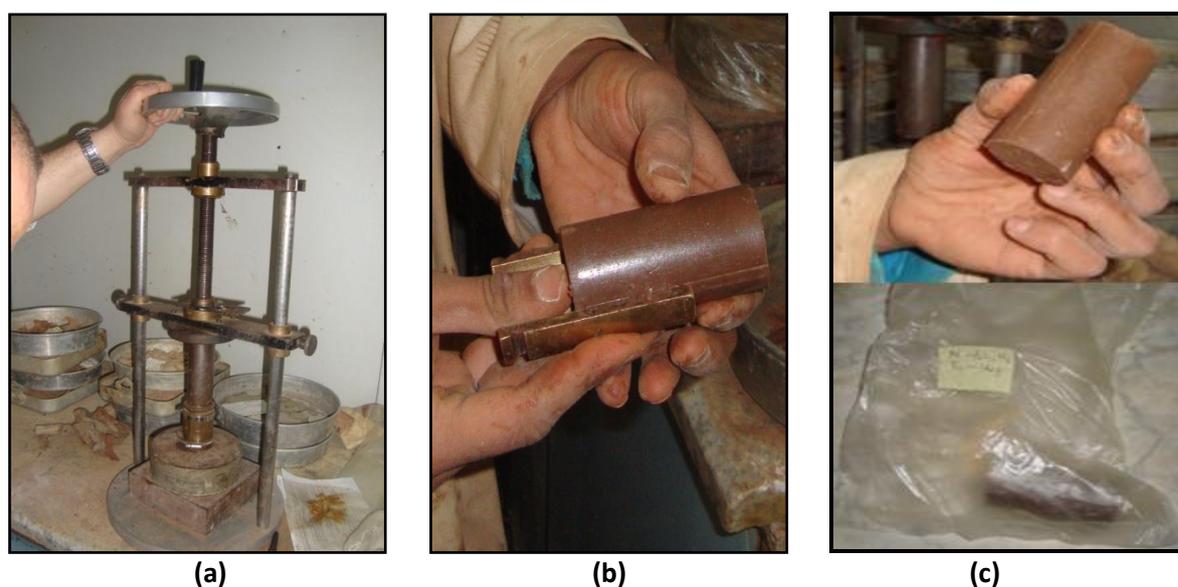
Afin que les échantillons soient compactés à la densité maximale désirée, les mélanges ont été confectionnés par compression statique et reconstitués sous forme d'éprouvettes de 3.8 cm de diamètre et de 7.6 cm de la hauteur tout en utilisant une presse statique manuelle qui consiste à appliquer par l'intermédiaire d'un piston, un effort vertical exercé sur le mélange à confectionner dans un moule formé en deux parties symétriques. Les parois intérieures du moule doivent être enduites d'une couche de graisse afin de réduire les frottements mélange-moule et d'éviter la rupture de l'éprouvette lors du démoulage. L'extraction de l'éprouvette

du moule peut se faire manuellement en glissant l'une de ses deux parties par rapport à l'autre. On détermine ensuite son poids et ses dimensions (Fig. 3.16).



**Fig. 3.16** — Confection des éprouvettes, (a): Presse statique manuelle destinée à la confection des éprouvettes, (b): moule cylindrique formé en deux parties symétriques.

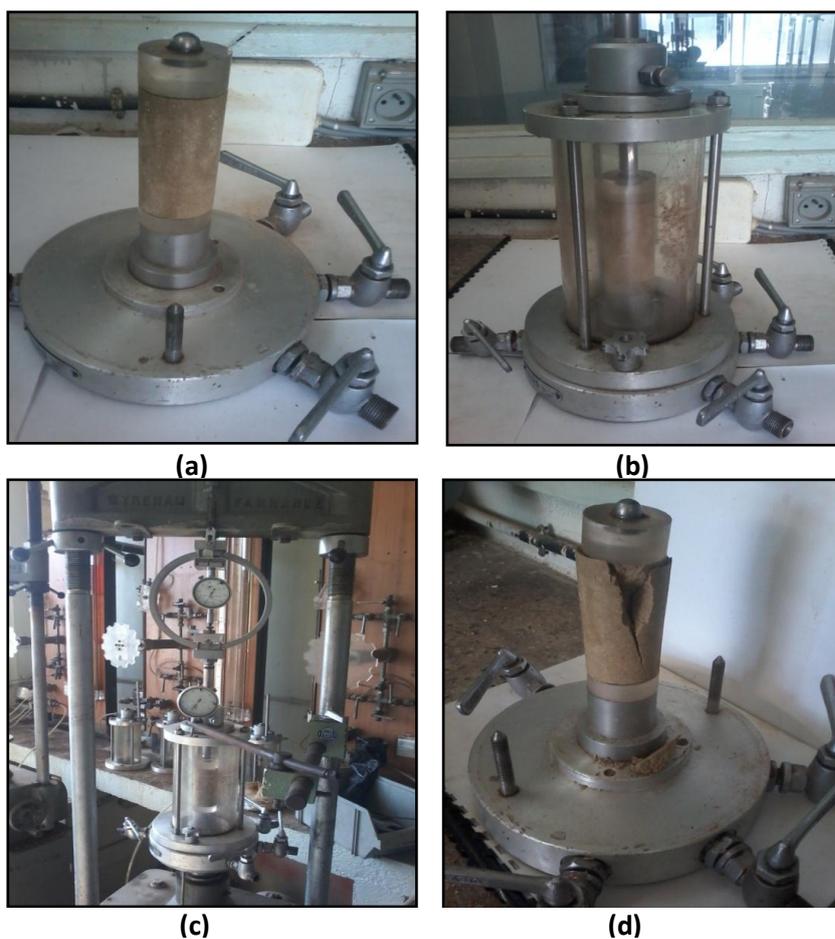
Après démoulage, les échantillons ont été immédiatement stockés dans des sachets en plastique pour prévenir d'éventuelles pertes d'humidité et de les éloigner de tout contact avec le  $\text{CO}_2$  qui est le responsable de la carbonatation de la chaux pendant la maturation. De plus, les échantillons sont confectionnés pour différentes périodes de cure (7-120 jours). La maturation à  $20^\circ\text{C}$  est assurée au laboratoire à température contrôlée. Le mode opératoire du compactage est illustré dans la Figure 3.17.



**Fig. 3.17** — Confection des éprouvettes par compactage statique, (a): compactage, (b): démoulage, (c): éprouvette compactée et conservée dans un sachet en plastique.

### 3.3.2.3.2 Ecrasement des éprouvettes

A la fin de la période de cure, des essais de résistance à la compression non confinée sont effectués. La valeur de la résistance à la compression est la moyenne de deux essais effectués sur chaque type d'échantillon. L'évolution de la résistance à la compression simple est étudiée en fonction de la quantité des ajouts utilisés (0, 4 et 8% de la chaux et 0, 10 et 20% de PN), de la concentration en sulfates (0, 2, 4 et 6% de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ou  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) et du temps de maturation (7-120 jours). La résistance à la compression statique non confinée a été déterminée à l'aide d'une presse triaxiale avec une vitesse de chargement de 1 mm/min. Le mode opératoire est présenté dans la Figure 3.18.



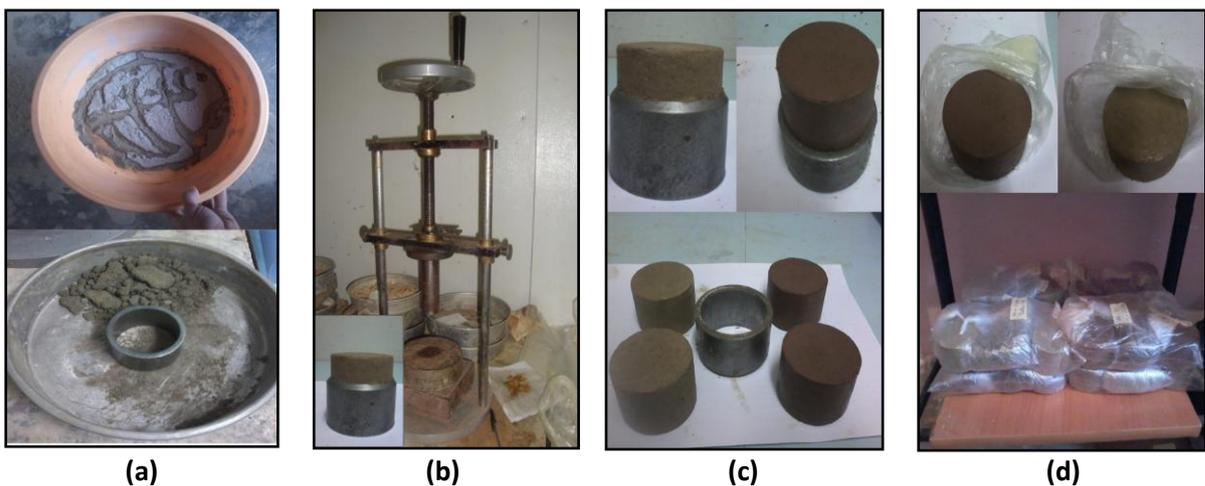
**Fig. 3.18** — Procédure d'écrasement, (a): éprouvette à écraser, (b): installation de l'éprouvette dans la cellule, (c): installation de la cellule dans la presse statique, (d): éprouvette après écrasement.

### 3.3.2.4 Résistance au cisaillement

Afin d'évaluer l'effet des additifs (chaux et pouzzolane naturelle) en présence ou non des sulfates ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$  et  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) sur la résistance des sols fins argileux, des essais de résistance au cisaillement direct non consolidé non drainé (UU) ont été effectués sur des éprouvettes de sols conformément à la norme ASTM D6528-00 (2000).

### 3.3.2.4.1 Préparation des combinaisons et confections des éprouvettes

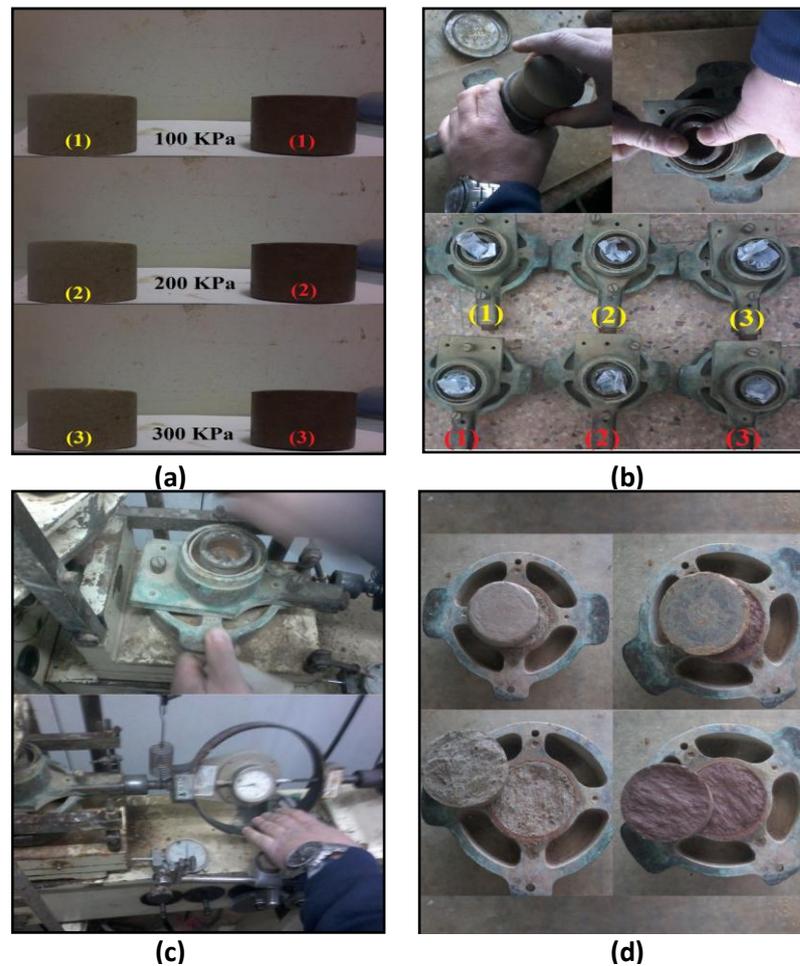
Les échantillons traités et non traités ont été préparés à la teneur en eau optimale et compactés à la densité sèche maximale. En suivant les mêmes étapes décrites dans la section (3.3.2.3.1) pour la préparation des mélanges destinés pour la confection et la conservation des éprouvettes à soumettre aux essais de cisaillement direct. Les mélanges ont été confectionnés par compression statique et reconstitués sous forme d'éprouvettes de 6 cm de diamètre et de 4 cm de hauteur en utilisant une presse statique manuelle. L'extraction de l'éprouvette du moule peut se faire manuellement à l'aide d'un piston en bois de diamètre égal à 5,8 cm. On détermine ensuite le poids de l'éprouvette et ses dimensions. Après démoulage, les éprouvettes confectionnées ont été immédiatement stockés dans des sachets en plastique pour prévenir d'éventuelles pertes d'humidité et loin de tout contact avec le CO<sub>2</sub> pour éviter le maximum possible leur carbonatation. Les éprouvettes ont été conservées à 20°C pendant des périodes de cures de 7, 30, 60 et 120 jours (Fig. 3.19).



**Fig. 3.19** — Préparation des éprouvettes par compactage statique, (a): humidification, (b): confection, (c): démoulage, (d): préservation des éprouvettes dans des sacs hermétique.

### 3.3.2.4.2 Cisaillement des éprouvettes

A la fin de la période de cure, des essais de résistance au cisaillement direct non consolidé non drainé sont effectués. La valeur de la résistance au cisaillement est la moyenne de deux essais effectués sur chaque type d'échantillon. L'évolution de la résistance au cisaillement est également étudiée en fonction de la quantité des ajouts utilisés (0, 4 et 8% de la chaux et 0, 10 et 20% de PN), de la concentration en sulfates (0, 2, 4 et 6% de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ou CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) et du temps de maturation (7-120 jours). La résistance au cisaillement à la boîte de Casagrande a été déterminée à l'aide d'un appareil de cisaillement avec une vitesse de chargement de 1 mm/min. Le mode opératoire de cet essai est présenté dans la Figure 3.20.



**Fig. 3.20** — Procédure de cisaillement, (a): éprouvettes à cisailier, (b): installation de l'éprouvette dans la boîte de Casagrande, (c): installation de la boîte de Casagrande dans l'appareil de cisaillement, (d): éprouvette après cisaillement.

### 3.3.2.5 Essais sur la minéralogie (DRX) et la microstructure (MEB)

#### 3.3.2.5.1 Diffraction aux rayons X et de Microscopie électronique à balayage

Les deux essais de DRX et MEB ont été effectués afin d'étudier respectivement l'aspect minéralogique et macrostructural des échantillons des deux sols argileux stabilisés avec l'utilisation de la chaux, de la pouzzolane naturelle et de leur combinaison. La formation éventuelle des composés de cimentation et/ou de l'ettringite minérale peut être observée avec des diagrammes de DRX alors que les changements de la macrostructure produite par des additifs et/ou des sulfates utilisés peuvent être observés avec des images MEB.

#### 3.3.2.5.2 Préparation des échantillons et exécutions des essais

Un diffractomètre de type *Philips PW3020* (Fig. 3.21a) a été utilisé pour l'analyse au DRX. Après les écrasements d'éprouvettes, les petits fragments issus des éprouvettes fracturées de l'essai de la résistance à la compression non confinée ont été récupérés et puis séchés pendant 1 jour à 40 °C (Fig. 3.21b-d). Avant l'exécution de l'essai, les échantillons de sol prélevés ont

été broyés en poudres fines, passées à travers un tamis de 400  $\mu\text{m}$  et puis conservées dans des sacs en plastique hors humidité afin de les utiliser comme échantillons pour les tests de DRX (Fig. 3.21e-h).

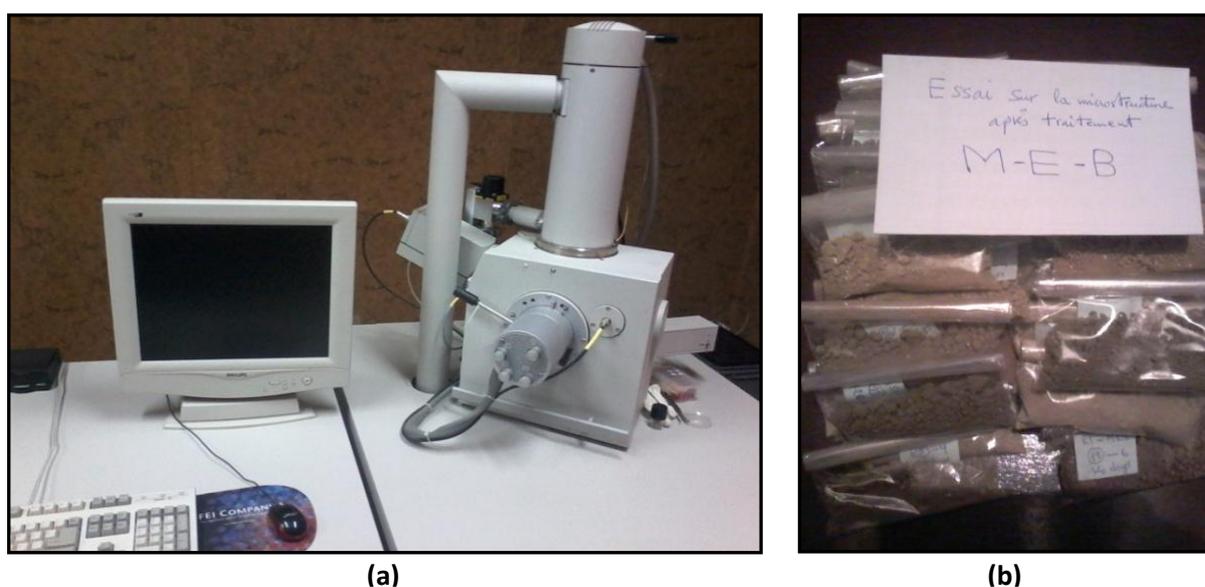


**Fig. 3.21** — Analyse minéralogie par diffraction des rayons X, (DRX), (a): diffractomètre de type Philips PW3020, (b): éprouvette du sol rouge (ex: P20L8N4 après 60 jours de cure) avant et après écrasement, (c): récupération des petits fragments après écrasement, (d): séchage pendant 24 heures à 40°C, (e): broyeur, (f): tamiseuse, (g): poudre fine de l'échantillon P20L8N4, (h):conservation hors humidité.

Les motifs de diffraction ont été effectués en utilisant un rayonnement (Cu-K $\alpha$ ) avec un angle de Bragg ( $2\theta$  de) de gamme variant entre  $4^\circ$  et  $60^\circ$  avec une vitesse d'exécution de  $0.83.10^{-2}/2$  sec. Après 60 jours de cure, l'examen de la formation éventuelle d'ettringite et des composés de cimentation a été effectué sur des échantillons de sol argileux traités et non traités. En outre, le contrôle de la formation des composés de cimentation et d'ettringite minérale a également été effectué sur des échantillons de sol contenant 4% du sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et de calcium ( $\text{CaSO}_4.2\text{H}_2\text{O}$ ).

Cependant, la MEB de type *FEI XL30 ESEM* (Fig. 3.22a) a été utilisé pour les tests de MEB. la MEB consiste en un faisceau d'électrons balayant la surface de l'échantillon à analyser qui, en réponse, réémet certaines particules. Ces particules sont analysées par différents détecteurs qui permettent de reconstruire une image en trois dimensions de la surface.

Les échantillons de sol (Fig. 3.22b) ont été insérés par résine époxy, fixés et puis balayés par une faible résolution MEB. L'examen d'éventuels changements dans la macrostructure a été réalisé uniquement sur certains échantillons de sol afin d'expliquer les variations possibles dans les propriétés physiques et mécaniques des deux sols stabilisés.



**Fig. 3.22** — (a): Microscopie électronique à balayage (MEB) de type FEI XL30 ESEM, (b): échantillons des deux sols à analyser.

### 3.4. Conclusion

Les matériaux sélectionnés dans ce travail de thèse ont été d'abord identifiés et caractérisés tout en déterminant leurs propriétés physico-mécaniques, chimiques et minéralogiques qui permettent enfin, de commenter, d'interpréter et de se comparer aux résultats issus du programme expérimental entrepris. Les échantillons ont été préparés selon la nature et le type d'essai tout en respectant les normes ASTM (2000). Les différents effets apportés par

l'utilisation du sulfate monovalent (sulfate de sodium,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) et divalent (sulfate de calcium,  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) sur le comportement physico-mécanique et minéralogique des deux sols argileux stabilisés par l'addition des additifs minéraux à savoir la chaux et la pouzzolane naturelle ont été étudiés. Les résultats de différents essais réalisés seront présentés, analysés et discutés dans le Chapitre suivant à savoir : les limites d'Atterberg, la résistance à la compression non confinée, la résistance au cisaillement direct non consolidé non drainé (UU), la minéralogie par les diagrammes de DRX et les changements de la microstructure à l'aide des images de MEB.