

---

# Le traitement des Sols à la chaux et aux liants hydrauliques - Aspect Physico-Chimique

J. Eid<sup>1</sup>, S. Taibi<sup>1</sup>, A. Lefebvre<sup>2</sup>, J.E. Dandjinou<sup>3</sup>,

<sup>1</sup>Laboratoire Ondes & Milieux Complexes, CNRS UMR 6294 - Université du Havre, BP 540, 53 rue de Prony 76058 Le Havre cedex, joanna.eid@doct.univ-lehavre.fr

<sup>2</sup>Cematerre, 4196 Route des Entreprises 76700 Gonfreville l'Orcher

<sup>3</sup>Auxitec, 171 Boulevard Amiral Mouchez, 76086 Le Havre Cedex

---

*RÉSUMÉ. Le traitement des sols à la chaux est utilisé depuis des décennies dans le domaine des routes comme dans le domaine de la construction. Des réactions physico-chimiques se passent entre les feuillettes d'argile et les ions libérés par l'ajout du liant hydraulique. Différentes études ont cherché à expliquer ces réactions avec différentes mesures, en particulier le pH et la diffractométrie. Le but de cette étude est de suivre ces réactions en utilisant le pH et la conductivité électrique (CE). Un limon naturel a été mélangé avec différents pourcentages de chaux et/ou de ciment. La variation de la conductivité électrique CE en fonction du temps de cure révèle mieux que le pH, les différentes réactions qui se passent. CE est ainsi un paramètre plus pertinent pour la description du traitement des sols aux liants hydrauliques.*

*ABSTRACT. Soil treatment with lime has been used for decades in the field of roads as in the field of construction. Physico-chemical reactions occur between the layers of clay and the ions released by the addition of the hydraulic binder. Various studies have attempted to explain these reactions with different physical measurements, particularly pH and X-ray diffraction. The purpose of this study was to follow the reactions using the pH and electrical conductivity (CE). Natural clay was mixed with different percentages of lime and / or cement. The variation of the electrical conductivity CE as a function of cure time reveals better than the pH, the various reactions that occur. CE is a more relevant parameter for describing soil treatment with hydraulic binders.*

*MOTS-CLÉS : Réactions chimiques, pH, Conductivité électrique CE, liants hydrauliques, réactions pouzzolaniques.*

*KEY WORDS: chemical reactions, pH, electrical conductivity CE, binders, pouzzolaniques reactions.*

---

## 1. Introduction

Dès les premiers siècles de la civilisation humaine, l'argile est un matériau de base de forte importance. Il était utilisé dans la construction de grandes œuvres par diverses civilisations. Au 18ème siècle, la chaux hydraulique et le mortier ont été découverts. Suite à cette innovation, le secteur du bâtiment a évolué de la construction de maisons en pierre, en brique et en terre crue à la construction de grandes tours en béton armé.

Les constructions prodigieuses construites par nos ancêtres ont fait preuves d'une résistance et d'une durabilité pendant de très longs siècles. De nos jours, la pollution et la production des gaz à effet de serre constituent un problème majeur pour l'avenir de notre société. D'où la nécessité de retourner vers ses matériaux plus écologiques, à comprendre leur secret pour les adapter à nos besoins actuels.

Cematerre est un nouveau matériau de construction à base de terre crue (80 % de limon de Gonfreville l'Orcher) mélangé avec du ciment (7.5 %), de la chaux (2.5%) et de l'eau. Ce produit a été mis au point et sa mise en œuvre a été brevetée par un industriel Havrais Mr. Alain Lebfevre. Ce béton de terre présente de bonnes caractéristiques mécaniques et thermiques. Il est un très bon isolant thermique et un régulateur de température et d'humidité au sein du bâtiment.

L'interaction d'un liant (chaux ou ciment) avec les particules fines d'un sol induit une suite de phénomènes physico-chimiques complexes à cinétique très variable modifiant les propriétés mécaniques du sol. Cela se traduit notamment par une amélioration de sa maniabilité, de sa résistance à la compression et de sa portance. Ces évolutions sont le résultat d'une succession de deux types de réactions physico-chimiques suivantes (Lasledj, 09 ; Khattab et al., 07 ; Al-Rawas & Goosen, 06):

- A court terme, des échanges cationiques entre  $\text{Ca}^{2+}$  apporté par la chaux ou la portlandite du ciment et les cations interfoliaires des minéraux argileux du sol, suivi d'une floculation/agglomération des particules argileuses
- A moyen et long terme, des produits cimentaires secondaires (silicates et aluminates de calcium hydratés C-S-H/C-A-H/C-S-A-H) se forment et changent la structure des particules. On parle alors de réactions pouzzolaniques qui se poursuivent à très long terme dans des stades avancés de l'interaction.

Ces deux phénomènes qui conditionnent le comportement hydromécanique du sol traité dépendent quant à eux de plusieurs paramètres tels que la température (Al-Mukhtar et al., 10) et l'humidité.

Le but de ce travail est de comprendre les interactions physico-chimiques et de les coupler à des mesures physiques, le pH et la conductivité électrique CE. L'objectif est de trouver un moyen pertinent pour suivre les réactions physico-chimiques qui se produisent entre une famille d'argile, le ciment et / ou de la chaux dans de l'eau déminéralisée de pH 7.

## 2. Matériaux et méthodes

### 2.1. Matériaux

Les matériaux utilisés sont d'une part un limon naturel et d'autre part des liants hydrauliques le ciment et la chaux. Le tableau 1 résume les caractéristiques physiques du limon naturel. Se basant sur les courbes granulométriques et les limites d'Atterberg, ce limon est classé sable-limoneux SL (SM) selon la classification LCPC-USCS.

<b>VBS</b> (valeur de bleu sols)	<b>0,5</b>
<b>W<sub>L</sub></b> (Limite de liquidité)	<b>20%</b>
<b>IP</b> (Indice de plasticité)	<b>6</b>
<b>Granulométrie</b>	
<b>Teneur en fines</b> (<80 μm)	<b>35%</b>
<b>Argile</b> (<2μm)	<b>0%</b>
<b>Limon</b> (2μm à 60 μm)	<b>25%</b>
<b>Sables</b> (0.06 mm à 2 mm)	<b>67%</b>
<b>Gravier</b> (>2mm)	<b>8%</b>
<b>D<sub>10</sub></b> (Diamètre à 10%)	<b>32 μm</b>
<b>C<sub>u</sub></b> (Coefficient d'uniformité)	<b>4,37</b>
<b>C<sub>c</sub></b> (Coefficient de courbure)	<b>0,94</b>

**Tableau 1.** Caractéristiques du Limon (Hibouche, 2013)

La chaux utilisée dans cette étude est une chaux calcique CL 90-Q fabriqué par la société Lhoist, elle répond aux exigences de la norme EN 459-1.

Le ciment est le ciment composé CEM V/A (S-V) 42,5, qui est un ciment gris, obtenu par la mouture de clinker Portland, de laitier de haut fourneau et de cendres volantes. Dans leur classe de résistance, ces ciments présentent une résistance normale à court terme. Le ciment composé répond aux exigences de la norme européenne EN 197-1. Sa composition est résumée dans le tableau 2. Les résistances mécaniques à la compression simple à court terme et à 28 jours sont résumées dans le tableau 3.

Type de ciment	Constituants principaux (% en masse)			Constituants secondaires (% en masse)
	Clinker Portland	Laitier de haut fourneau (S)	Cendres volantes (V)	
CEM V/A (S-V)	40 - 64	18 - 30	18 - 30	0 - 5

**Tableau 2.** Composition du ciment utilisé. (Hibouche, 2013)

Classe de résistance	Résistance à la compression (MPa)				Temps de début de prise (min.)
	Résistance à court terme		Résistance courante		
	2 jours	7 jours	28 jours		
42.5 N	≥ 10	-	≥ 42.5	≤ 62.5	≥ 60

**Tableau 3.** Résistances mécaniques à la compression simple du ciment utilisé. (Hibouche, 2013)

## 2.2. Méthodes

Le but cette étude est de comprendre les interactions physico-chimiques et de les coupler à des mesures physiques. Ces mesures sont d'une part macroscopique pH et conductivité électrique CE, et d'autre part microscopiques avec le microscope électronique à balayage et la diffractométrie aux rayons X.

### 2.2.1. Préparation des échantillons

Quatre mélanges ont été étudiés pour suivre l'évolution des réactions des composants au cours de leur maturation. Pour les 3 premiers mélanges, les liants sont ajoutés ensemble ou séparément au limon dans son état naturel à une teneur en eau initiale de l'ordre de 12%. Le quatrième mélange représente une pâte de Cématère, donc mélange de liants avec limon et eau. Les différents mélanges sont les suivant :

- Limon + 3 % de chaux.
- Limon + 8 % de ciment.
- Limon + 3 % de chaux + 8 % de ciment.
- Pâte de limon + 3 % de chaux + 8 % de ciment + eau déminéralisée pour obtenir  $w = 22\%$ .

Les mélanges sont ensuite stockées dans des boîtes hermétiques afin d'éviter de mieux l'évaporation.

Les mesures de pH et CE sont effectuées à différents intervalles de temps à partir de la préparation comme suit, 1h, 1 jour, 3 jours, 7 jours, 14 jours, 28 jours, 45 jours et 90 jours ou plus.

### 2.2.2. Mesures macroscopiques

Les appareils utilisés pour la mesure du pH et de la conductivité électrique sont : sensION pH 3 et respectivement sensION EC 7.

A chaque échéance, 20g de limon traité est prélevé de chaque mélange auquel on ajoute 80g d'eau déminéralisée. Le pH et la CE sont mesurés trois fois afin d'obtenir une bonne représentativité.

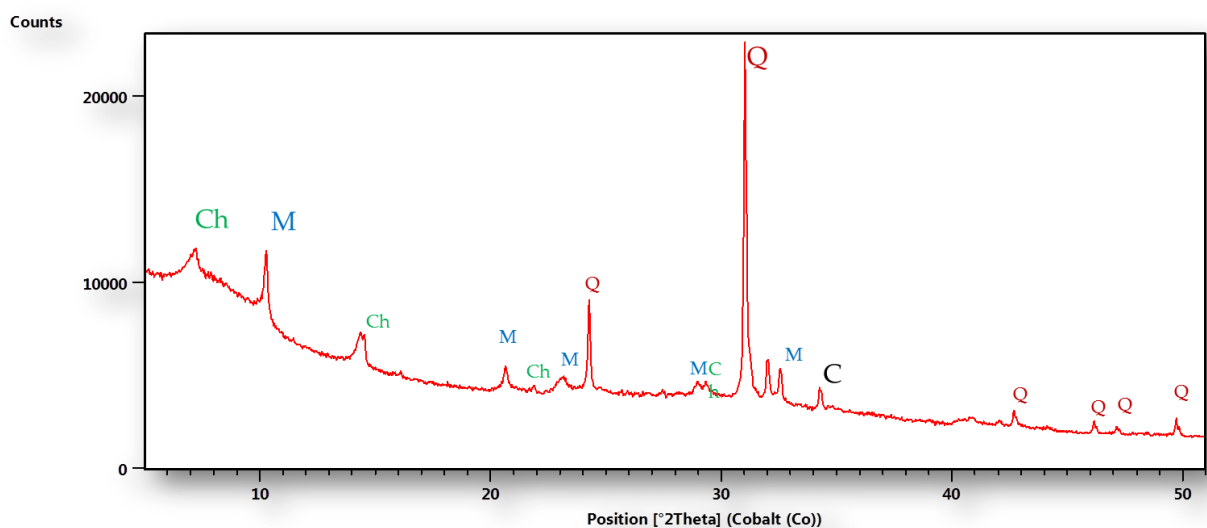
### 2.2.3. Mesures microscopiques

Le diffractomètre aux rayons X utilisé est le « PANalytical X'Pert<sup>3</sup> Powder » avec une source de Cobalt. Le balayage de  $2\theta$  est entre  $5^\circ$  et  $90^\circ$  avec un pas de  $0,0263^\circ$ , un filtre de 1 et un masque de 10 mm L'échantillon prélevé est broyé avec un mortier afin d'obtenir une poudre fine. La poudre est ensuite placée dans un porte échantillon circulaire de diamètre 2 cm.

Une partie des échantillons a été ensuite métallisé pour être examiné avec un microscope à balayage électronique.

## 3. Résultats

### 4.1. Identification des matériaux

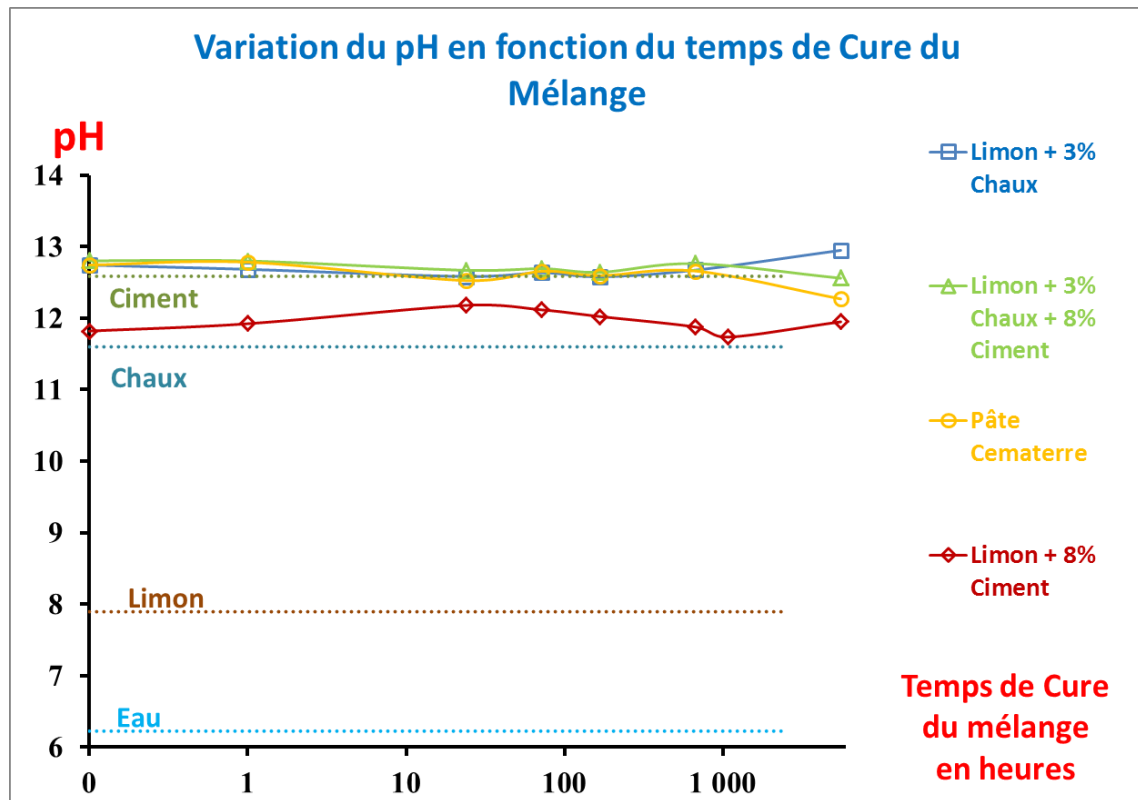


**Figure 1.** Limon tamisé à  $100\ \mu\text{m}$

Afin d'identifier les particules argileuses contenues dans le limon étudié, le matériau a été tamisé à  $100\ \mu\text{m}$ . La figure 1 ci-dessus représente le spectre de diffraction aux rayons X des particules fines du limon. Il est composé surtout de deux types d'argiles : la chlorite et la muscovite. Un essai de gonflement à l'éthylène glycol a été effectué afin d'identifier si le limon contenait des argiles gonflantes. Le résultat étant négative, ceci réconforte son utilisation dans la construction.

La chlorite est une argile de type TOT avec un espace interfoliaire de  $14\text{\AA}$  contenant un octaèdre. La muscovite fait partie de la famille des illites à  $10\text{\AA}$ , de type TOT avec un cation interfoliaire  $\text{K}^+$ .

## 4.2. Variation du pH



**Figure 2.** Variation du pH en fonction du temps de cure

La figure 2 présente la variation du pH en fonction du temps de cure des différents mélanges. Le pH initial des matériaux de base est aussi présenté en pointillé. On remarque que la variation du pH est très faible de l'ordre de  $\pm 0.3$ .

Les 3 mélanges contenant de la chaux, qu'on va nommer LCh, ont une valeur de pH initiale égale à 12.74, alors que le mélange contenant uniquement du ciment, qu'on va nommer LCi, démarre à une valeur inférieure égale à 11.82. Après plus que 200 jours de cure, les mélanges contenant de ciment tend vers une valeur égale à 12.27 alors que celui de la chaux augmente légèrement jusqu'à atteindre 12.95.

#### 4.3. Variation de CE

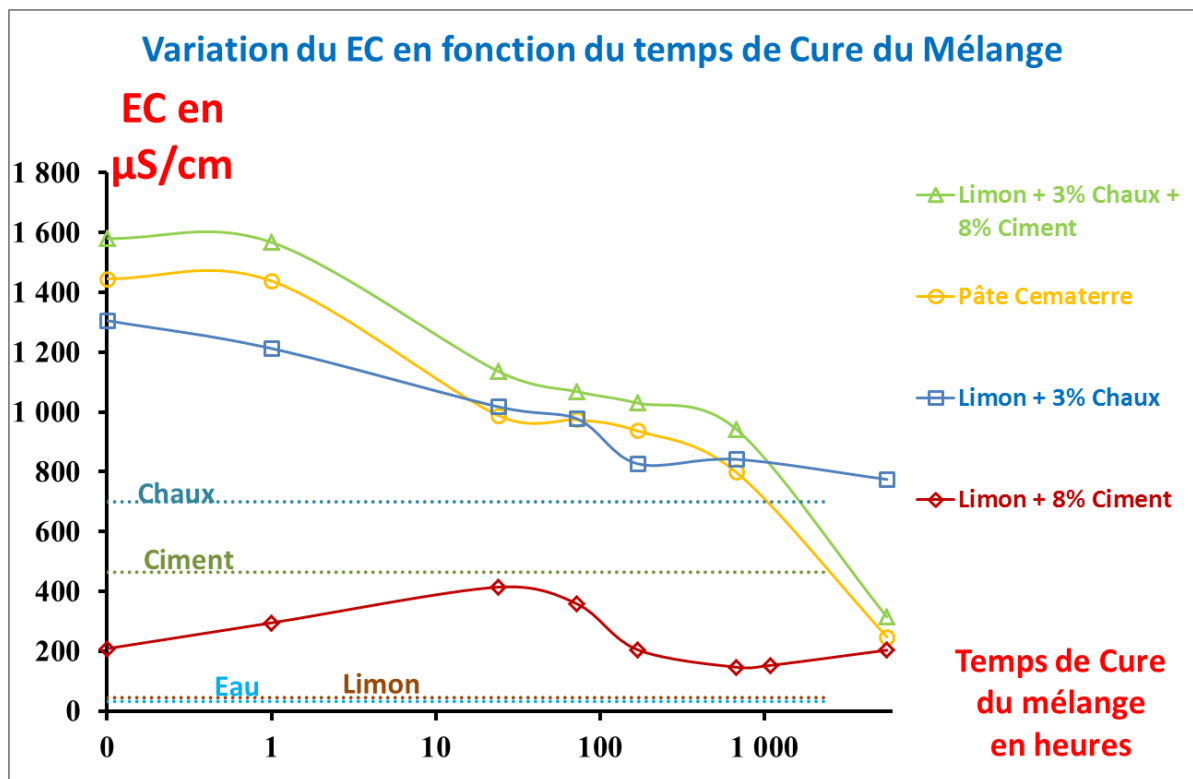


Figure 3. Variation du CE en fonction du temps de cure

La figure 3 présente la variation de la conductivité électrique en fonction du temps de cure des différents mélanges. De même CE des matériaux de base est présentée en pointillé. La variation de la conductivité électrique se passe dans un domaine plus large que celui du pH ; elle varie entre 146  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et 1600  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Comme dans le cas du pH, les 3 mélanges contenant de la chaux (LCh) ont une valeur de CE initiale de l'ordre de 1400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  alors que celui contenant uniquement du ciment (LCi) démarre avec une valeur beaucoup plus faible de l'ordre de 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Les mélanges LCh décroît avec le temps de cure alors que LCi croît jusqu'à 1 jour puis décroît et atteint un palier autour de 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Les LCh contenant du ciment continue à décroître après 45 jours jusqu'à rejoindre le LCi avec une conductivité autour de 200  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

#### 4. Synthèse et conclusion

Cette étude a permis de montrer que la conductivité électrique est un paramètre plus pertinent que le pH pour suivre les réactions chimiques qui se passent entre l'argile et le liant hydraulique.

On remarque un effet de l'ajout de la chaux aux mélanges. Ce dernier joue un rôle plus dominant que celui du ciment. La chaux impose le pH et la CE aux mélanges à court terme. A long terme, les mélanges contenant du ciment changent de comportement et rejoignent le comportement des mélanges contenant uniquement du ciment.

#### 5. Bibliographie

[ALM 10] AL-MUKHTAR M., LASLEDJ A., ALCOVER J.F., « Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20°C », *Applied Clay Science*, vol. 50, n° 2, 2010, p. 191-198.

[ALR 06] AL-RAWAS A. A., « Expansive soils : recent advances in characterization and treatment », *Taylor and Francis group/Balkema*, London, 2006

[HIB 14] HIBOUCHE A., Sols traités aux liants. Performances hydro-mécaniques et hygro-thermiques. Applications en BTP, Thèse de doctorat, Université du Havre, 2014.

[KHA 07] KHATTAB S.A.A., AL-MUKHTAR M., FLEUREAU J.M., « Long-term characteristics of a lime treated plastic soil », *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 19, n° 4, 2007, p. 358-366.

[LAS 09] LASLEDJ A., traitement des sols argileux à la chaux : processus physico-chimique et propriétés géotechniques, Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2009.