

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département :.....
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم:.....
المرجع:.....

Thèse présentée en vue de l'obtention
Du diplôme de
Doctorat en sciences en : GENIE CIVIL
Option : MATERIAUX DE CONSTRUCTION

**Effet des ajouts minéraux sur la durabilité des
briques de terre comprimée**

Présentée par :
IZEMMOUREN Ouarda

Soutenue publiquement le 11/12 /2016

Devant le jury composé de :

CHEBILI Rachid	Professeur	Président	Université de Biskra
GUETTALA Abdelhamid	Professeur	Rapporteur	Université de Biskra
MEZGHICHE Bouzidi	Maitre de Conférences 'A'	Examineur	Université de Biskra
CHABIL Houcine	Professeur	Examineur	Université de Constantine
BOUHICHA Mohamed	Professeur	Examineur	DGRDT
ZEGHICHI Leila	Professeur	Examineur	Université De M'SILA

REMERCIEMENTS

Avant tout je tiens à adresser mes vifs et sincères remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur GUETTALA Abdelhamid, Professeur à l'université de Biskra, pour son entière disponibilité, ses orientations, ses conseils tout au long de cette étude.

J'exprime mes vifs remerciements au Monsieur DAOUDI Aziz, président directeur-général du Centre d' Etudes et de Services Technologiques de l'industrie des Matériaux CETIM à Boumerdès (Algérie), pour son entière disponibilité, sa collaboration pour les essais de DRX et le broyage des matériaux.

J'adresse mes chaleureux remerciements au Monsieur CHEBILI Rachid, Professeur à l'université de Biskra, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance

Je tiens aussi à remercier Monsieur CHABIL Houcine, Professeur à l'université de Constantine, Professeur BOUHICHA Ahmed, Madame ZEGHICHI Leila, Professeur à l'université de M'sila et Monsieur MEZGHICHE Bouzidi docteur à l'université de Biskra, d'avoir accepté d'être membre du jury de thèse.

Je tiens également à remercier Monsieur le Recteur de l'université de Biskra ainsi que le Doyen de la faculté.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur le chef de département, le professeur BOUZIANE Toufik pour son aide et ses encouragements.

Enfin, je remercie très chaleureusement mes parents, ma sœur, mes frères, mes collègues et tous ceux qui m'ont aidé à finaliser ce travail.

RESUME

L'utilisation des ajouts minéraux avec la chaux dans la stabilisation des briques de terre comprimée (BTC) amène à l'amélioration de leurs propriétés mécaniques et de leur durabilité vis-à-vis de l'eau, qui reste un problème majeur menaçant les constructions en terre. Dans ce contexte, il semblerait avantageux d'utiliser la pouzzolane naturelle et la poudre de verre comme ajout avec la chaux pour stabiliser les (BTC). Cela permet non seulement de valoriser la pouzzolane naturelle et de consommer le déchet de verre mis en décharge, mais également de diminuer un dégagement de gaz à effet de serre.

L'objectif principal de ce travail est d'étudier l'effet de l'utilisation des ajouts minéraux, notamment la pouzzolane naturelle et la poudre de verre sur les propriétés mécaniques et la durabilité des (BTC).

Dans ce cadre, on a utilisé deux types de sols, trois teneurs en chaux (6, 8 et 10 %) du poids du mélange sec, quatre teneurs en ajouts minéraux (10, 20, 30 et 40) du poids de la chaux. Les échantillons ont été soumis aux essais des résistances mécaniques de traction et de résistances en compression sèche et humide et aussi aux essais de la durabilité : absorption totale et capillaire, séchage/ mouillage, gonflement et abrasion.

Les résultats obtenus ont montré que, l'addition de 30 % de la pouzzolane naturelle et poudre de verre améliorent les performances mécaniques et la durabilité des (BTC) stabilisées par la chaux. Cette étude a montré aussi que, la cure par vapeur des briques stabilisées par la chaux et la pouzzolane à 75°C pendant 24 heures accélère la cure et donne des résistances mécaniques et durabilité considérablement plus fortes par rapport aux (BTC) curées à 28 jours en atmosphère humide.

Mots Clés : Brique de terre comprimée; pouzzolane naturelle ; poudre de verre ; résistance; durabilité; cure par vapeur.

ملخص

إن استعمال الإضافات المعدنية مع الجير في تثبيت لبنات التربة المضغوطة (ب.ت.م) يؤدي إلى تحسين خصائصها الميكانيكية وديمومتها اتجاه الماء الذي يبقى مشكل كبير يهدد البنايات الترابية، وفي هذا السياق من الايجابي استعمال البوزولان الطبيعي و مسحوق الزجاج كإضافات مع الجير لتثبيت لبنات التربة المضغوطة وهذا يسمح ليس فقط في تثمين البوزولان الطبيعي واستهلاك زجاج النفايات ، ولكن أيضا في تقليل الغازات المسببة للاحتباس الحراري.

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير استعمال الإضافات المعدنية خاصة البوزولان الطبيعي و مسحوق الزجاج على الخصائص الميكانيكية و ديمومة (ب.ت.م).

في هذا الإطار قمنا باستخدام نوعين من التربة، ثلاث نسب من الجير (6 و 8 و 10%) من وزن الخليط الجاف و أربع نسب من الإضافات المعدنية (10 و 20 و 30 و 40%) من وزن الجير. و قد تم اختبار العينات لتجارب المقاومة الميكانيكية للشد و الضغط الجاف و الرطب و كذلك لتجارب الديمومة : الامتصاص الكلي و الشعيري ، التجفيف و الترطيب ، الانتفاخ و الكشط.

أظهرت النتائج أن إضافة البوزولان الطبيعي و مسحوق الزجاج بنسبة 30 % أدى إلى تحسين الخصائص الميكانيكية و ديمومة (ب.ت.م) المثبتة بالجير، كما أظهرت هذه الدراسة إن تصلب اللبنة المثبتة بالبوزولان الطبيعي مع الجير بالبخر تحت درجة حرارة 75 د. م لمدة 24 ساعة أدت إلى تسريع التصلب و إعطاء مقاومة ميكانيكية و ديمومة جد عالية مقارنة باللبنات المتصلبة لمدة 28 يوم تحت جو رطب.

الكلمات المفتاحية : لبنات التربة المضغوطة، البوزولان الطبيعي، مسحوق الزجاج، مقاومة، الديمومة التصلب بالبخر.

ABSTRACT

The use of mineral additives with lime in the stabilization of compressed earth bricks (CEB) improves their mechanical properties and durability against water, which remains a major problem threatening the earthen structures. In this context, it would seem advantageous to use natural pozzolana and glass powder with lime as addition to stabilize the (CEB). This not only valorization natural pozzolana and consume the waste glass sent to landfill, but also decrease a clearance of greenhouse gases.

The main objective of this work was to study the effect of the use of mineral additives, including natural pozzolana and glass powder on the mechanical properties and durability of the BTC.

In this context, we used two types of soil, three levels of lime (6, 8 and 10 %) of the weight of the dry mixture, four levels of mineral additives (10, 20, 30 and 40) of the weight of the lime. The samples have been submitted to testing the mechanical tensile strength as well as dry and wet compression strength and also to the testing of durability : total and capillary absorption, drying / wetting, swelling and abrasion.

The results showed that the addition of 30 % natural pozzolana and glass powder improves the mechanical performance and durability of the (CEB) stabilized with lime. This study also showed that brick steam curing stabilized with lime and pozzolana at 75 ° C for 24 hours accelerates the curing and gives considerably higher mechanical strength compared to (CEB) cures to 28 days in a humid atmosphere.

Keywords : compressed earth bricks; natural pozzolana; glass powder; Strength; durability; steam curing.

TABLE DES MATIERES

Remerciements.....	i
Résumé.....	ii
المخلص.....	iii
Abstract.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des figures.....	x
Liste des tableaux.....	xv
Liste des abréviations.....	xvii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
PREMIÈRE PARTIE :	
CHAPITRE 1 : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	
1.1 Introduction.....	6
1.2 Techniques d'utilisation de la terre en construction.....	6
1.3 Blocs de terre comprimée (BTC).....	7
1.3.1 Les utilisations des BTC.....	7
1.3.2 Exemples de constructions modernes en BTC.....	8
1.3.3 Avantages des BTC.....	10
1.4 La terre comme matériau de construction.....	11
1.4.1 Généralités sur les argiles et les minéraux argileux.....	11
1.4.2 Les argiles.....	11
1.4.3 Structure des minéraux argileux.....	11
1.4.4 Types et classification des argiles.....	12
1.5 Les propriétés du matériau terre en construction.....	15
1.5.1 Texture	15
1.5.2 Plasticité.....	16

1.5.3	Matière organique.....	16
1.5.4	Sulfates.....	17
1.6	Stabilisation.....	17
1.6.1	Stabilisation mécanique.....	17
1.6.2	Stabilisation physique.....	19
1.6.3	Stabilisation chimique.....	20
1.7	Stabilisation des sols par l'ajout de chaux.....	21
1.7.1	Processus physico-chimiques des réactions chaux-sol argileux	22
1.7.1.1	Hydratation et ionisation.....	22
1.7.1.2	Echange cationique.....	22
1.7.1.3	Floculation et agglomération.....	23
1.7.1.4	Réaction pouzzolanique.....	24
1.7.1.5	Carbonatation (formation de la calcite).....	25
1.7.2	Modification des propriétés des sols traités à la chaux.....	25
1.7.2.1	Evolution de la consistance du sol.....	25
1.7.2.2	L'optimum Proctor.....	27
1.7.3	L'influence de l'ajout de chaux sur les propriétés mécaniques du matériau Stabilisé.....	27
1.7.4	L'influence de l'ajout de chaux sur la durabilité des briques de terres comprimée.....	32
1.8	Les ajouts minéraux.....	34
1.8.1	Pouzzolane naturelle.....	35
1.8.1.1	Généralités.....	35
1.8.1.2	Caractéristiques chimiques et minéralogiques	35
1.8.1.3	Activité pouzzolanique.....	37
1.8.1.4	Utilisation.....	38
1.8.2	Laitier de haut fourneau.....	38
1.8.2.1	Généralités.....	38
1.8.2.2	Production du laitier granulé.....	38
1.8.2.3	Caractéristiques chimiques et minéralogiques.....	39
1.8.2.4	Réactivité hydraulique du laitier.....	40
1.8.2.5	Hydratation du laitier.....	41
1.8.2.6	Activation du laitier.....	42

1.8.2.7	Utilisation.....	42
1.8.3	Poudre de verre.....	42
1.8.3.1	Généralités	42
1.8.3.2	Structure et composition.....	42
1.8.3.3	Réaction pouzzolanique.....	43
1.8.3.4	Utilisation.....	43
1.9	Effet des ajouts minéraux sur les propriétés du sol.....	44
1.9.1	Pouzzolane naturelle.....	44
1.9.2	Laitier de haut fourneau.....	47
1.10	Effet des ajouts minéraux sur la résistance mécanique et durabilité des BTC.....	48
1.11	Conclusion.....	51

DEUXIÈME PARTIE : ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE 2 : MATERIAUX ET METHODES EXPERIMENTALES

2.1	Introduction	54
2.2	Matériaux utilisés.....	54
2.2.1	Sols.....	54
2.2.1.1	Origine des sols.....	54
2.2.1.2	Caractéristiques physiques des sols.....	54
2.2.1.3	Analyse chimique et minéralogique des sols.....	56
2.2.1.4	Matière organique.....	59
2.2.1.5	Analyse physico-chimique.....	59
2.2.2	Sable concassé.....	60
2.2.3	La chaux.....	61
2.2.4	Pouzzolane naturelle.....	61
2.2.5	Laitier.....	62
2.2.6	Poudre de verre.....	65
2.2.5	L'eau.....	66
2.3	Préparation des briques.....	66
2.3.1	Matériels spécifiques.....	66
2.3.2	Composition des mélanges.....	67
2.3.3	Malaxage des mélanges.....	70

2.3.4	Optimisation de la teneur en eau.....	70
2.3.5	Compactage des mélanges.....	71
2.4	Mode de cure.....	71
2.4.1	Cure au laboratoire.....	72
2.4.2	Cure par vapeur.....	72
2.5	Résistances mécaniques.....	72
2.5.1	Résistance à la traction simple.....	72
2.5.2	Résistance à la compression sèche.....	73
2.5.3	Résistance à la compression humide.....	74
2.6	Essai de la durabilité.....	74
2.6.1	Essai d'absorption capillaire.....	74
2.6.2	Absorption totale.....	75
2.6.3	Résistance à l'abrasion.....	76
2.6.4	Gonflement.....	76
2.6.5	Séchage/mouillage.....	77
2.7	Conclusion.....	78

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

3.1	Introduction.....	80
3.2	Effet du dosage d'ajout minéral sur les résistances mécaniques	80
3.2.1	Pouzzolane naturelle.....	82
3.2.1.1	Résistance à la compression sèche.....	82
3.2.1.2	Résistance à la compression humide.....	85
3.2.1.3	Coefficient de résistance à l'eau.....	87
3.2.1.4	Résistance à la traction sèche.....	89
3.2.2	Poudre de verre.....	91
3.2.2.1	Résistance à la compression sèche.....	91
3.2.2.2	Résistance à la compression humide.....	91
3.2.2.3	Coefficient de résistance à l'eau.....	94
3.2.2.4	Résistance à la traction sèche.....	96
3.2.3	Laitier granulé.....	98
3.2.3.1	Résistance à la compression sèche.....	98
3.2.3.2	Résistance à la compression humide.....	100

3.2.3.3	Coefficient de résistance à l'eau.....	100
3.2.3.4	Résistance à la traction sèche.....	103
3.3	Effet du dosage des ajouts dans le temps sur les résistances mécaniques et la durabilité.....	105
3.3.1	Résistances mécaniques.....	105
3.3.1.1	Résistance à la compression sèche.....	105
3.3.1.2	Résistance à la compression humide.....	107
3.3.1.2	Résistance à la traction sèche.....	109
3.3.2	Durabilité.....	111
3.3.2.1	Absorption totale.....	111
3.3.2.2	Absorption capillaire.....	113
3.3.2.3	Séchage/mouillage.....	115
3.3.2.2	Gonflement.....	118
3.3.2.3	Résistance à l'abrasion.....	120
3.4.....	Influence du mode de cure sur les résistances mécaniques et la durabilité des BTC.....	122
3.4.1	Influence de la période de cure à la vapeur sur les résistances mécaniques.	122
3.4.2	Influence des méthodes de cure sur les résistances mécaniques.....	124
3.4.3	Influence de la teneur en pouzzolane naturelle.....	125
3.4.3.1	Résistance à la compression sèche.....	125
3.4.3.2	Résistance à la compression humide.....	126
3.4.3.3	Coefficient de résistance à l'eau.....	127
3.4.3.4	Résistance à la traction sèche.....	128
3.4.3.5	Absorption capillaire.....	129
3.4.3.6	Absorption totale.....	130
3.4.3.7	Séchage/mouillage.....	131
3.4.3.8	Résistance à l'abrasion.....	132
3.5	Conclusion.....	133
	Conclusion Générale.....	137
	Perspectives.....	142
	Références bibliographiques.....	152
	Liste des publications et communications issues de la thèse.....	154

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 :	Mosquée Al Medy, Ryad, Arabie Saoudite.....	09
Figure 1.2 :	Centre de l'architecture de terre au Mali d'après.....	09
Figure 1.3 :	Logements semi-collectifs R+1 à Sidi Bel Abbès (Algérie),.....	09
Figure 1.4 :	Atelier électronique, Ecole, Auroville, Inde.....	09
Figure 1.5 :	Éléments structuraux: (a) et (b) les tétraèdres, (d) et (e) les octaèdres....	12
Figure 1.6 :	Structure cristalline de la kaolinite.....	13
Figure 1.7 :	Photographie au MEB d'une Kaolinite.....	13
Figure 1.8 :	Schéma de la structure de l'illite.....	14
Figure 1.9 :	Photographie au MEB d'illite.....	14
Figure 1.10 :	Forme structurale d'une structure TOT.....	14
Figure 1.11 :	Photographie au MEB d'une montmorillonite.....	14
Figure 1.12 :	Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques de construction en terre.....	15
Figure 1.13 :	Les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre.....	16
Figure 1.14 :	Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur les résistances mécanique.....	18
Figure 1.15 :	Influence de la granularité sur la compacité.....	19
Figure 1.16 :	Absorption totale en fonction de la teneur en sable.....	20
Figure 1.17 :	Schéma du mécanisme de réaction argile-chaux à court terme.....	23
Figure 1.18 :	Schéma du mécanisme de réaction chaux–argile.....	25
Figure 1.19 :	Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg.....	26
Figure 1.20 :	Évolution des limites d'Atterberg en fonction de la chaux et le temps de maturation à température ambiante.....	26
Figure 1.21 :	Influence de la teneur en chaux hydraulique sur les courbes Proctor....	27
Figure 1.22 :	Influence de la minéralogie d'argile sur la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et le temps de cure.....	28
Figure 1.23 :	Résistance à la compression et consommation de chaux d'un sol en fonction de la teneur en chaux et de temps de cure.....	29
Figure 1.24 :	Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en chaux sur	30

	les résistances mécaniques.....	
Figure 1.25 :	Evolution de la résistance à la compression des briques d'adobe en fonction de la teneur en chaux.....	30
Figure 1.26 :	Micrographies par MEB des briques d'adobes. (a) 0% chaux, (b) 4 % chaux, (c) 6% chaux, (d et e) 10 % chaux et (f) 12 % chaux.....	31
Figure 1.27 :	Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur l'absorption et sur la perte en poids.....	32
Figure 1.28 :	Muret avec des briques stabilisées par 8 % de la chaux après 48 mois d'exposition aux conditions naturelles.....	33
Figure 1.29 :	Muret avec des briques stabilisées par 12 % de la chaux après 48 mois d'exposition aux conditions naturelles.....	33
Figure 1.30 :	Effet de la stabilisation à la chaux sur deux murs en pisé (à gauche pisé stabilisé, à droite pisé non stabilisé).....	34
Figure 1.31 :	Classification des pouzzolanes présentée lors du 6ème congrès international sur la chimie du ciment de Moscou en 1974.....	36
Figure 1.32 :	Diagramme de Kiel.....	41
Figure 1.33 :	Prise du laitier vitrifié.....	41
Figure 1.34 :	Représentation schématique bidimensionnelle de silice (a) structure cristalline, réseau ordonné (cristobalite), (b) structure vitreuse, réseau amorphe.....	43
Figure 1.35 :	Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps de cure des différentes combinaisons pour les deux sols.....	45
Figure 1.36 :	Influence des stabilisants sur la résistance mécanique à la compression : (a) sol gris, (b) sol rouge.....	46
Figure 1.37 :	Influence de la teneur en perlite sur la perte en masse (essai séchage/mouillage) du sol.....	46
Figure 1.38 :	Evolution de la résistance à la compression simple en fonction de la teneur en laitier et concentration de sulfate (a): 1% et (b) 2% de SO ₃	47
Figure 1.39 :	Gonflement en fonction de la concentration de sulfate.....	48
Figure 1.40 :	Retrait linéaire en fonction de la concentration de sulfate.....	48
Figure 1.41 :	Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps de cure.....	50
Figure 1.42 :	Le taux d'augmentation de la résistance à la compression relative à 7	50

jours.....	
Figure 1.43 :	Perte en masse des briques en fonction des cycles gel/dégel..... 50
Figure 2.1 :	Granulométrie de deux types de sol..... 55
Figure 2.2 :	Diagramme de plasticité (la norme XP P 13-901)..... 56
Figure 2.3 :	Le diffractogramme de rayons X de SOLA..... 57
Figure 2.4 :	Le diffractogramme de rayons X de SOLK..... 58
Figure 2.5 :	Essai de mesure de pH..... 60
Figure 2.6 :	Analyse granulométrique du sable concassé..... 61
Figure 2.7 :	Pouzzolane broyé..... 62
Figure 2.8 :	Broyeur à boulet..... 62
Figure 2.9 :	Spectre de la DRX de la pouzzolane naturelle..... 63
Figure 2.10 :	Laitier broyé..... 63
Figure 2.11 :	Spectre de la DRX du Laitier..... 64
Figure 2.12 :	Verre broyé..... 65
Figure 2.13 :	Spectre de la DRX du verre..... 66
Figure 2.14 :	Moule utilisé pour la fabrication des BTC..... 67
Figure 2.15 :	Détermination du point de fixation de la chaux pour les deux types de sols (SOLA et SOLK..... 68
Figure 2.16 :	Optimisation de la teneur en eau..... 71
Figure 2.17 :	Conditions de cure: (a) cure par vapeur, (b) cure humide..... 72
Figure 2.18:	Essai de traction par fendage..... 73
Figure 2.19 :	Cassure des blocs par l'essai de traction (a) , Superposition des deux demi-blocs (interposition par un mortier de ciment) (b) , Essai d'écrasement de l'éprouvette (c) 73
Figure 2.20 :	Principe de l'essai d'absorption capillaire..... 75
Figure 2.21 :	Calcul de la surface de brossage..... 76
Figure 2.22 :	Etapas de l'essai de gonflement : (a) préparation des plots, (b) immersion dans l'eau, (c) mesure du gonflement..... 77
Figure 2.23 :	Eprouvette séchée dans l'étuve..... 78
Figure 2.24 :	Eprouvette émergée dans l'eau..... 78
Figure 3.1 :	Programme expérimentale..... 81
Figure 3.2 :	Résistance à la compression sèche du BTC à base de chaux sans ajout

	en fonction du dosage en chaux.....	83
Figure 3.3 :	Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression sèche des BAXP et BKXP pour différents dosages en chaux.....	84
Figure 3.4 :	Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression humide des BAXP et BKXP pour différents dosages en chaux.....	86
Figure 3.5 :	Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur le coefficient de résistance à l'eau des BAXP et BKXP pour différents dosages en chaux.....	87
Figure 3.6 :	Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la traction sèche des BAXP et BKXP pour différents dosages en chaux...	90
Figure 3.7 :	Influence du taux de la poudre de verre sur la résistance à la compression sèche des BAXV et BKXV pour différents dosages en chaux.....	92
Figure 3.8 :	Influence du taux de la poudre de verre sur la résistance à la compression humide des BAXV et BKXV pour différents dosages en chaux.....	93
Figure 3.9 :	Influence du taux de la poudre de verre sur le coefficient de résistance à l'eau des BAXV et BKXV pour différents dosages en chaux.....	94
Figure 3.10 :	Influence du taux de la poudre de verre sur la résistance à la traction sèche des BAXV et BKXV pour différents dosages en chaux.....	97
Figure 3.11 :	Influence du taux du laitier granulé sur la résistance à la compression sèche des BAXL et BKXL pour différents dosages en chaux.....	99
Figure 3.12 :	Influence du taux du laitier granulé sur la résistance à la compression humide des BAXL et BKXL pour différents dosages en chaux.....	101
Figure 3.13 :	Influence du taux du laitier granulé sur le coefficient de résistance à l'eau des BAXL et BKXL pour différents dosages en chaux.....	102
Figure 3.14 :	Influence du taux du laitier granulé sur la résistance à la traction sèche des BAXL et BKXL pour différents dosages en chaux.....	104
Figure 3.15 :	Influence du dosage en ajout sur la résistance à la compression sèche aux différents âges.....	106
Figure 3.16 :	Influence du dosage en ajout sur la résistance à la compression humide	108

	aux différents âges.....	
Figure 3.17 :	Influence du dosage en ajout sur la résistance à la traction sèche aux différents âges.....	110
Figure 3.18 :	Influence du dosage en ajout sur l'absorption totale aux différents âges.....	112
Figure 3.19 :	Influence du dosage en ajout sur l'absorption capillaire aux différents âges.....	114
Figure 3.20 :	Influence du dosage en ajout sur la perte en poids aux différents âges...	117
Figure 3.21 :	Influence du dosage en ajout sur le gonflement aux différents âges.....	119
Figure 3.22 :	Influence du dosage en ajout sur le coefficient d'abrasion aux différents âges.....	121
Figure 3.23 :	Variation des résistances en fonction du temps de cure par vapeur: (a) RCS, (b) RCH, (c) RTS.....	123
Figure 3.24 :	Influence du dosage en pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression sèche (cure par vapeur à 24 h).....	126
Figure 3.25 :	Influence du dosage en pouzzolane sur la résistance à la compression humide (cure par vapeur à 24 h).....	127
Figure 3.26 :	Influence du dosage en pouzzolane sur coefficient de résistance à l'eau (cure par vapeur à 24 h).....	128
Figure 3.27 :	Influence du dosage en pouzzolane sur la résistance à la traction sèche (cure par vapeur à 24 h).....	129
Figure 3.28 :	Influence du dosage en pouzzolane naturelle sur l'absorption capillaire.....	130
Figure 3.29 :	Influence du dosage en chaux sur l'absorption totale (cure par vapeur à 24 h).....	131
Figure 3.30 :	Influence du dosage en chaux sur la perte de masse (cure par vapeur à 24 h).....	132

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 :	Différents types d'usage pour les blocs de terre comprimée.....	08
Tableau 1.2 :	Comparaison entre les BTC et d'autres matériaux de maçonnerie.....	10
Tableau 1.3 :	Compositions Chimiques (%) de certaines pouzzolanes volcaniques incohérentes.....	36
Tableau 1.4 :	Composition minéralogique de certaines pouzzolanes volcaniques	37
Tableau 1.5 :	Composition chimique du laitier de haut fourneau.....	39
Tableau 1.6 :	Les valeurs du coefficient de résistance à l'eau.....	49
Tableau 2.1 :	Masse volumique des sols.....	54
Tableau 2.2 :	Limites d'Aterberg des sols.....	55
Tableau 2.3 :	Analyse chimique des sols.....	56
Tableau 2.4 :	Analyse minéralogique des sols.....	58
Tableau 2.5 :	Valeur du bleu de méthylène.....	59
Tableau 2.6 :	Valeurs de pH des sols.....	60
Tableau 2.7 :	Caractéristiques physiques du sable.....	60
Tableau 2.8 :	Analyse chimique et caractéristiques physiques de la chaux vive.....	61
Tableau 2.9 :	Analyse chimique et caractéristiques physiques de la pouzzolane.....	62
Tableau 2.10 :	Analyse chimique et caractéristiques physiques du laitier.....	64
Tableau 2.11 :	Analyse chimique et caractéristiques physiques du verre.....	65
Tableau 2.12 :	Codification des mélanges.....	68
Tableau 2.13 :	Composition des mélanges.....	69
Tableau 2.14 :	Optimisation de la teneur en eau.....	71
Tableau 2.15 :	Résistance à l'abrasion des BTC ((NF XP 13-901).....	76
Tableau 3.1 :	Coefficient de résistance à l'eau pour les BAXP.....	88
Tableau 3.2 :	Coefficient de résistance à l'eau pour les BKXP.....	89
Tableau 3.3 :	Coefficient de résistance à l'eau pour les BAXV.....	95
Tableau 3.4 :	Coefficient de résistance à l'eau pour les BKXV.....	96
Tableau 3.5 :	Coefficient de résistance à l'eau pour les BAXL.....	103
Tableau 3.6 :	Coefficient de résistance à l'eau pour les BKXL.....	103
Tableau 3.7 :	Taux d'augmentation de la résistance à la compression sèche.....	107

Tableau 3.8 :	Taux d'augmentation de la résistance à la compression humide.....	109
Tableau 3.9 :	Taux d'augmentation de la résistance à la traction sèche.....	111
Tableau 3.10 :	Taux de diminution de l'absorption totale.....	113
Tableau 3.11 :	Taux de diminution de l'absorption capillaire.....	115
Tableau 3.12 :	Taux de diminution de la perte en poids.....	118
Tableau 3.13 :	Taux de diminution du gonflement.....	120
Tableau 3.14 :	Le taux d'augmentation du coefficient d'abrasion.....	122
Tableau 3.15 :	Comparaison entre les résistances.....	124

LISTE DES ABRÉVIATIONS

AFNOR :	Association française de normalisation
ASTM :	American Society for Testing and Materials
BTC	Brique de terre comprimée
NP :	Pouzzolane naturelle
PV :	Poudre de verre
LG :	Laitier granulé
SOLA :	Sol d'El Alia
SOLK :	Sol d'El Kantara
BAX :	Brique à base d'un SOLA stabilisé par la chaux
BKX :	Brique à base d'un SOLK stabilisé par la chaux
BAXP:	Brique à base d'un SOLA stabilisé par la chaux et la pouzzolane naturelle
BKXP :	Brique à base d'un SOLK stabilisé par la chaux et la pouzzolane naturelle
BAXL :	Brique à base d'un SOLA stabilisé par la chaux et le laitier
BKXL :	Brique à base d'un SOLK stabilisé par la chaux et le laitier
BAXV :	Brique à base d'un SOLA stabilisé par la chaux et la poudre de verre
BKXV :	Brique à base d'un SOLK stabilisé par la chaux et la poudre de verre
RCS :	Résistance à la compression sèche
RCH :	Résistance à la compression humide
RTS :	Résistance à la traction sèche
DRX	Diffraction aux rayons X
MEB	Microscope à balayage électronique

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GENERALE

La terre crue demeure à travers l'histoire, un des principaux matériaux de construction utilisés. Elle est disponible en abondance, et sa transformation en matériau de construction requiert peu de dépenses énergétiques (très peu d'émission de CO₂). Ses grandes qualités plastiques et écologiques ont permis de l'utiliser comme un matériau de construction d'avenir.

Aujourd'hui, le patrimoine architectural en terre dans le monde témoigne de la solidité et la durabilité des constructions en terre. Cependant, les avantages de la terre comme matériau de construction ont été oubliés vu le développement de nouveaux matériaux comme le béton et l'acier. Mais devant les problèmes écologiques et économiques, plusieurs programmes et recherches scientifiques ont montré un intérêt pour la construction en terre. Ces recherches sont presque orientées vers l'amélioration des caractéristiques physico-mécaniques et particulièrement la durabilité du matériau terre vis-à-vis de l'eau, qui reste jusqu'à aujourd'hui un inconvénient majeur menaçant les édifices en terre.

Les techniques de construction en terre crue évoluent également aujourd'hui grâce aux différents modes de stabilisation. La technique des briques de terre comprimée (BTC) est une technique récente qui a permis de construire des bâtiments à plusieurs niveaux, grâce à des stabilisants qui permettent d'augmenter leur résistance ainsi que leur durabilité. La stabilisation des BTC a été pratiquée pendant longtemps par des liants hydrauliques tels que le ciment, la chaux et d'autres ajouts minéraux : les cendres volantes, le laitier de haut fourneau, la fumée de silice et d'autres pour augmenter leur insensibilité à l'eau.

Les Romains ont utilisé le mélange à base de pouzzolane et de chaux comme matériaux liant pour de nombreuses structures. Ces monuments romains sont en usage aujourd'hui dans de nombreux pays. Cela est attribuable à la forte durabilité de ce liant dans diverses conditions environnementales. Aujourd'hui, peu d'études utilisent la pouzzolane naturelle avec la chaux pour stabiliser les sols.

La poudre de verre présente une structure vitreuse dont la composition contient plus de 70 % de silice et peut être classée comme un matériau pouzzolanique. En effet, la poudre de verre est valorisée par plusieurs chercheurs (Idir, 2009 ; Shao et al., 2000 et Shi et al., 2005)

comme ajout cimentaire dans la production de divers types de béton; béton ordinaire, béton autoplçant et béton de haute performance. Ils ont permis de démontrer que la poudre de verre peut donc être considérée comme un excellent ajout cimentaire qui apporte des effets bénéfiques au béton. Cependant, à notre connaissance aucune recherche n'est faite sur l'utilisation de la poudre de verre comme ajout avec le ciment ou avec la chaux dans la stabilisation des sols ou dans la production des BTC. Néanmoins, plusieurs études (Wild, 1996 et Celik, 2013) ont utilisé le laitier granulé avec la chaux dans la stabilisation des sols contenant de sulfate, pour améliorer la durabilité des sols vis-à-vis de l'eau. Le choix de ces matériaux pouzzolanique comme addition avec la chaux pour stabiliser les BTC, est surtout recommandé en raison de leur réactivité.

Dans le cadre de la valorisation de pouzzolane naturelle et la poudre de verre, on a constaté en Algérie qu'il y a une quantité appréciable de pouzzolane naturelle. Leur utilisation se limite seulement au secteur de l'industrie cimentaire, qui l'utilise comme ajout actif à des taux de 15 à 20 % dans la fabrication des ciments composés. Le verre en Algérie est estimé par la possibilité de récupération de 50.000 tonnes/an, sans l'existence de circuit de récupération et de recyclage (Boucetta, 2014). Donc, l'intérêt de la valorisation de ces matériaux locaux dans la stabilisation des BTC, est justifié par leur faible coût et par leur abondance en quantités importantes.

L'objectif général de cette recherche est d'apporter une contribution significative à la valorisation de la pouzzolane naturelle et le verre de vitrage dans la stabilisation des BTC pour améliorer sa durabilité. Les objectifs spécifiques consistent à :

- Etudier l'effet du dosage des ajouts minéraux et à la nature des sols sur les résistances mécaniques des BTC stabilisé par différents dosage en chaux.
- Etudier l'effet du dosage dans le temps de différents ajouts sur les résistances mécaniques et la durabilité des BTC.
- Etudier l'effet des conditions de cure; cure par vapeur 75°C et cure à l'atmosphère humide des BTC stabilisées par la pouzzolane naturelle sur les propriétés mécaniques et durabilité des BTC.

La thèse est structurée en deux parties :

La première partie est composée d'un seul chapitre (chapitre 1), qui est consacré à la revue bibliographique, expose en premier lieu les techniques d'utilisation de la terre en construction, rappel sur les types d'argile mode de stabilisation et propriétés du matériau terre à stabiliser. En deuxième lieu, présente les études antérieures réalisées sur l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés mécaniques et durabilité des sols en particulier sur les briques de terre comprimée.

La deuxième partie, composée de deux chapitres (chapitre 2 et chapitre 3), est consacrée à l'étude expérimentale.

Le deuxième chapitre porte sur l'identification et la caractérisation des matériaux qui ont été utilisés dans cette étude (les sols, le sable concassé, la chaux et les ajouts). Ce chapitre présente aussi les mélanges, le mode de conservation et les procédures d'essai expérimentales utilisés dans cette étude.

Les résultats obtenus tout au long des différentes phases de l'étude sont exposés et analysés dans le chapitre 3.

Ces résultats montrent l'effet des ajouts minéraux (pouzzolane naturelle, poudre de verre et laitier) sur les caractéristiques mécaniques et durabilité des BTC stabilisé par la chaux. De plus, l'effet du temps et conditions de cure sur les caractéristiques mécaniques et durabilité des BTC stabilisées par la chaux et les ajouts.

Enfin, une conclusion générale résume les principaux résultats obtenus et propose des perspectives d'études complémentaires.

PREMIÈRE PARTIE

CHAPITRE 1 :

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

1.1 Introduction

La terre, utilisée depuis plus de onze millénaires, est sans aucun doute un des matériaux de construction les plus répandus et les plus anciens. La terre présente un intérêt écologique évident, où sa construction participe bien à la protection de l'environnement à l'industrie chimique (fabrication de ciment) où à l'économie énergétique (fabrication des briques cuites). De nombreuses techniques d'utilisation de la terre dans les constructions existent. Chacune de ces techniques est née dans des lieux géographiques différents, de climats variés et selon les matériaux disponibles. La technique de la brique de terre comprimée (BTC) offre aux constructions une certaine durabilité par rapport à la technique d'adobe. Aujourd'hui plusieurs études s'intéressent à étudier les propriétés mécaniques et durabilité du matériau terre. Afin d'atteindre ces performances, le matériau terre a été traité par des différentes additives. De ce fait, la compréhension des phénomènes liés aux processus physico-chimiques des réactions entre ces additives avec les composantes de la terre permettent de mettre en évidence le rôle de chacun de ces additives. Ainsi, les cinétiques des réactions chimiques.

1.2 Techniques d'utilisation de la terre en construction

La construction en terre crue est une technique de construction très ancienne et connue dans tout le monde étant donné qu'elle a été le premier matériau de construction utilisé par l'homme. Il existe différents modes de mise en œuvre de la terre crue. D'après Houben et Guillaud (1994) dénombre douze techniques, chaque technique utilise une terre bien précise. En effet, chacune d'elle a une formulation différente. Les cinq techniques de construction les plus répandues sont les suivantes : l'adobe, le torchis, la bauge, le pisé et les briques de terre comprimée (BTC).

- **L'adobe** : la technique des briques crues ou l'adobe consiste à mouler sans compactage des briques avec de la terre à l'état plastique, puis laisser sécher au soleil. Avec les briques d'adobe on peut réaliser différentes parties d'un ouvrage. On peut construire les murs extérieurs et intérieurs ainsi que des voûtes et coupes.
- **Le torchis** : le torchis est une technique de remplissage en terre crues, il s'agit d'une structure porteuse en bois garnie de terre à l'état plastique, le plus souvent mélangée avec des fibres de paille.

- **La bauge** : la technique de la construction en bauge consiste en édification de mur massif, souvent porteur, avec un mélange de terre, d'eau et de fibres végétales voire animales mis en œuvre par empilement de motte à l'état plastique, généralement sans l'aide de moule ou de coffrage.
- **Le pisé** : le pisé est un procédé de construction de mur en terre crue, compactée dans un coffrage en couches successives à l'aide d'un pilon. Le mur décoffré immédiatement après que la terre a été damée.

1.3 Blocs de terre comprimée (BTC)

Les blocs de terre comprimée est une évolution moderne du bloc moulé d'adobe, ce sont de petits éléments de maçonneries de forme parallélépipédique. Cette technique est utilisée pour compresser la terre sèche en utilisant une presse pour augmenter les résistances mécaniques du bloc, ainsi que leur résistance aux dommages causés par l'eau (Rigassi, 1995). Leurs dimensions varient selon les types de presses et les moules qui leur sont adaptés. C'est une technique récente : tout d'abord, les blocs étaient réalisés manuellement à l'aide de pilons en bois. La technique a ensuite évolué avec l'apparition de la première presse par François Cointeraux en XXVIIIe siècle. Le développement significatif de l'emploi des presses et de l'utilisation constructive et architecturale du bloc de terre comprimée n'a été finalement engagé qu'à partir de 1952 suite à l'invention de la petite presse « CINVA-RAM » imaginé par l'ingénieur Raul Ramirez. Les années 70 et 80 ont amené l'apparition d'une nouvelle vague de presses manuelles, mécaniques et motorisées et le développement aujourd'hui considérable d'un véritable marché de la production et de l'utilisation du bloc de terre comprimée (Rigassi, 1995).

1.3.1 Les utilisations des BTC

Les dimensions courantes des BTC sont adaptées à une grande souplesse d'emploi dans des solutions constructives variées, en maçonnerie porteuse ou renforcé et en maçonnerie de remplissage (tableau 1.1). Les briques de terre comprimée permettent aussi la réalisation des structures particulières (arcs, coupes et voûtes), pour des constructions à usage d'habitation ou industriel.

Tableau 1.1 Différents types d'usage pour les blocs de terre comprimée (Rigassi, 1995)

6 PRINCIPALES CATEGORIES D'USAGE		
USAGE		TYPE DE BLOCS
maçonnerie porteuse		
maçonnerie de remplissage		
applications particulières	<ul style="list-style-type: none"> - ventilation - câblages - corniches - décoration - arcs et voûtes 	
maçonnerie renforcée		
systèmes constructifs particuliers : imbrication		
systèmes constructifs particuliers : empilement à sec autobloquants		

1.3.2 Exemples de constructions modernes en BTC

On trouve aujourd'hui de nombreuses constructions en BTC à travers le monde. A titre d'exemple la mosquée Al Medy, en Arabie Saoudite (figure 1.1), a été réalisée en sept semaines. Construit sans coffrage, cette mosquée est de 420 m² de superficie, couverte d'un toit voûté et un minaret de 18 mètres de hauteur.



Fig. 1.1 : Mosquée Al Medy, Ryad, Arabie Saoudite (Auroville)

La figure 1.2 représente le Centre de l'Architecture de Terre au Mali, le bâtiment à une structure simple, les murs et les voûtes en berceau sont faits en BTC et ne sont pas collés ou peints, ceux-ci sont très bien adaptés aux conditions régionales.



Fig.1.2 : Centre de l'architecture de terre au Mali (Auroville)

On peut citer encore les logements semi-collectifs R+1 à Sidi Bel Abbes en Algérie (figure 1.3) et l'atelier électronique en Inde voir (figure 1.4).



Fig. 1.3 : Logements collectifs R+1 à Sidi Bel Abbes (Algérie), (Guettala, 2003)



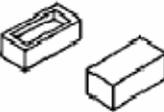
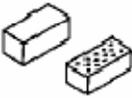
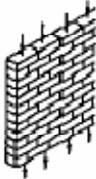
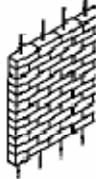
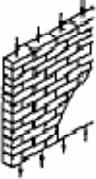
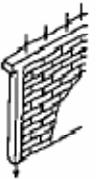
Fig.1.4 : Atelier électronique, Ecole, Auroville, Inde.

1.3.3 Avantages des BTC

Les BTC présentent certains avantages par rapport aux autres techniques de construction en terre crue et d'autres matériaux classiques de maçonnerie.

- Si on compare la technique des BTC à la technique des briques d'adobes, la première donne une résistance à la compression et une durabilité supérieure à celle des adobes, suite à l'utilisation des presses et de variété de moules pour la production des BTC, les briques à une surface régulière et lisse ainsi à des formes diverses.
- Si on compare la technique des BTC à la technique de pisé, la première donne une grande souplesse dans la conception architecturale. Ainsi, les BTC permettent d'échelonner la fabrication sur une période plus longue, tout en diminuant la fissuration des murs grâce à un retrait de séchage s'effectuant sur chaque brique et non sur toute la longueur du mur
- Si on compare maintenant les briques de BTC avec les briques cuites, les premiers offrent des performances thermiques supérieures et ne demandent aucune énergie de cuisson comparées aux briques cuites. Le tableau (1.2) présente la comparaison entre les BTC et d'autres matériaux de maçonnerie.

Tableau 1.2 : Comparaison entre les BTC et d'autres matériaux de maçonnerie (Rigassi, 1955)

Caractéristiques	Unité	BTC	Briques cuites	Adobes	Bloçs en béton
FORME ET TAILLE					
Type					
L x l x h	cm	29,5 x 14 x 9	22 x 10,5 x 6,5	40 x 20 x 10	40 x 20 x 15
ASPECT					
- Surface - Intérêt esthétique		lisse moyen à bon	rugueuse à lisse bon à excellent	irrégulière pauvre	rugueuse moyen
PERFORMANCES					
- Résistance en compression	Mpa	1 à 4	0,5 à 6	0 à 5	0,7 à 5
- Dilatation thermique réversible	%	0,02 à 0,2	0 à 0,02	-	0,02 à 0,05
- Isolation thermique	W/m°C	0,81 à 1,04	0,7 à 1,3	0,4 à 0,8	1,0 à 1,7
- Masse volumique apparente	kg/m ³	1 700 à 2 200	1 400 à 2 400	1 200 à 1 700	1 700 à 2 200
- Durabilité		faible à très bonne	faible à excellente	faible	faible à très bonne
EMPLOI EN MAÇONNERIE					
		porteur 	porteur 	porteur 	remplissage 
		sans enduit	sans enduit	avec enduit	avec enduit

1.4 La terre comme matériau de construction

1.4.1 Généralités sur les argiles et les minéraux argileux

Généralement les sols sont constitués de minéraux suivants : le quartz, les argiles les feldspaths, les micas, les carbonates (calcite et dolomite), les oxydes et hydroxydes métalliques dont l'hématite, la goethite et la limonite pour le fer, le gypse. Ces minéraux se présentent généralement dans les sols sous forme :

- de grains polygonaux plus ou moins réguliers dont la taille se situe entre quelques microns et quelques millimètres ;
- de lamelles pour les argiles dont la plus grande dimension ne dépasse pas quelques microns;
- d'agrégats correspondant à des fragments de roches. Leurs formes résultent de la morphologie des minéraux les constituant (Cabane, 2004).

Les argiles contrairement aux autres minéraux présentent une cohésion, qui résulte d'interactions spécifiques avec l'eau (Cabane, 2004). Donc pour comprendre le comportement des sols argileux vis-à-vis de l'eau, il est nécessaire de connaître le comportement monominéral des argiles, leurs structures et leurs affinités à l'eau.

1.4.2 Les argiles

La proportion argileuse d'un sol est la partie granulaire inférieure à $2\mu\text{m}$. Ces argiles sont des phyllosilicates plus ou moins hydratés formés par l'association de feuillets et d'espace interfoliaires. Cet espace est constitué d'eau et suivant les différents types d'argile, l'empilement de ces différentes couches implique une nature différente des argiles (Cabane, 2004).

1.4.3 Structure des minéraux argileux

Les minéraux argileux sont généralement composés des phyllosilicates hydratés formés par l'association de feuillets, ceux-ci sont basés sur un ensemble de tétraèdres de silice SiO_4 . Ces tétraèdres partagent trois sommets entre eux suivant un plan dit hexagonal. Le sommet restant est partagé avec un octaèdre AlO_6 , comme montré sur la (figure 1.5). Il existe différentes combinaisons de tétraèdre et octaèdre suivant le type d'argile (Caillère et al., 1982; Cabane, 2004). La distance interfoliaires sépare deux feuillets successifs. Les substitutions d'atomes sont fréquentes dans les feuillets peut être désorganisés. D'autre part, il y a des

déséquilibres au niveau des charges; ce déséquilibre est compensé par l'adsorption de cations dans l'espace interfoliaire (capacité d'échange des argiles).

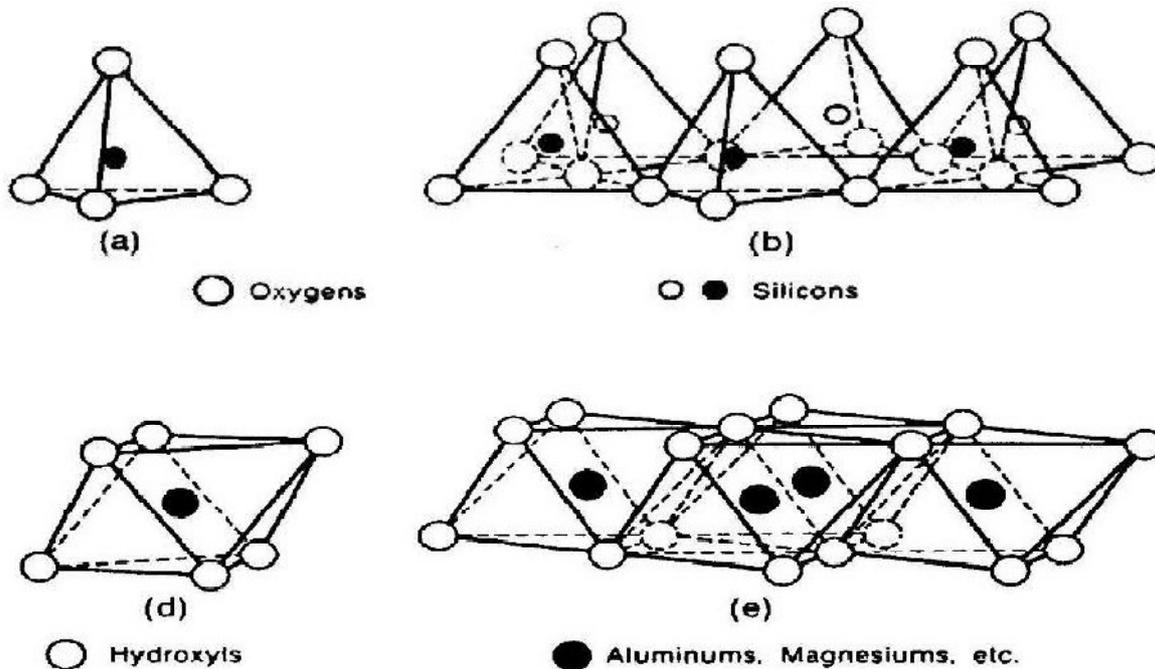


Fig. 1.5 : Eléments structuraux: (a) et (b) les tétraèdres, (d) et (e) les octaèdres. (Grim, 1959)

1.4.4 Types et classification des argiles

Différentes classifications des phyllosilicates ont été proposées. La première, établie par l'AIPEA (Association Internationale Pour l'Etude des Argiles, 1966-1972), se base sur la charge du feuillet et sur le nombre d'atomes métalliques en couche octaédrique. La deuxième, établie par Mering et Pedro (1969) prend en compte la localisation des substituants, leurs distributions et le type des cations compensateurs. La classification la plus classique est basée sur l'épaisseur et la structure du feuillet. On distingue ainsi quatre groupes :

- **Minéraux de type 1/1 ou T-O** : le feuillet est constitué d'une couche tétraédrique et octaédrique. Son épaisseur est d'environ 7 Å (angströms). Chaque feuillet est relié à un autre feuillet par l'intermédiaire des liaisons labiles de type hydrogène. La propriété de cette liaison est de permettre la cohésion du cristal tout en laissant la possibilité de clivage des différents feuillets.

- **Minéraux de type 2/1 ou T-O-T** : le feuillet est encadré par deux couches tétraédriques. Son épaisseur est d'environ 10 Å. Les couches tétraédriques peuvent soit

contenir des atomes de silicium et d'oxygène, soit présenter une substitution partielle des atomes de silicium par des atomes d'aluminium. Dans ce cas, les feuillets présentent un déficit en charges positives (substitution Si^{4+} par Al^{3+}).

- **Minéraux de type 2/1/1 ou T-O-T-O** : le feuillet est constitué d'une couche octaèdre encadrée par deux couches tétraédriques. Son épaisseur est d'environ 14 \AA .
- **Minéraux interstratifiés** : ces minéraux résultent du mélange régulier ou irrégulier d'argiles appartenant aux groupes ci-dessus. L'épaisseur du feuillet est variable. En général, les groupes d'argiles les plus importants sont les kaolinites, les illites et les smectites.

a- Kaolinites

Minéral à deux couches **T-O**. Le feuillet est neutre et l'espace interfoliaire est vide. L'unité structurale a une épaisseur de $7,2 \text{ \AA}$. Les feuillets sont liés par des liaisons hydrogène entre les atomes d'oxygène de la base de la couche **T** et les atomes d'hydrogène du groupement hydroxyle de la couche **O** du feuillet suivante. La structure est stable : l'eau ne peut s'adsorber qu'autour des particules et cette argile n'est pas gonflante.

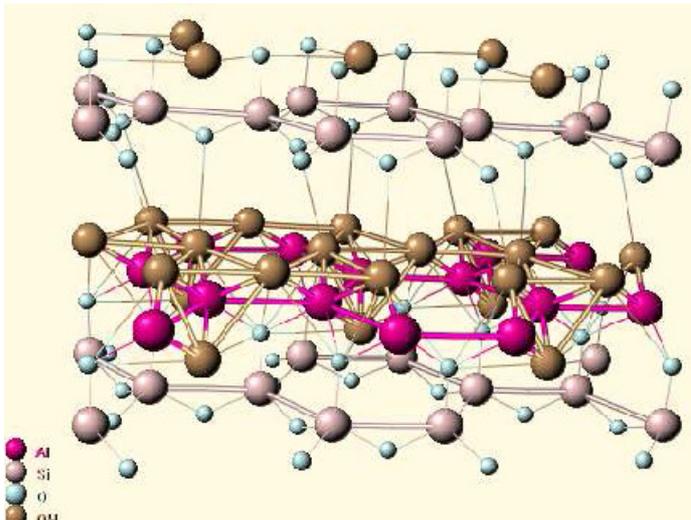


Fig. 1.6 : Structure cristalline de la kaolinite.
Bish and Von Dreele (1989) cité par
(El Ouahebi, 2013)

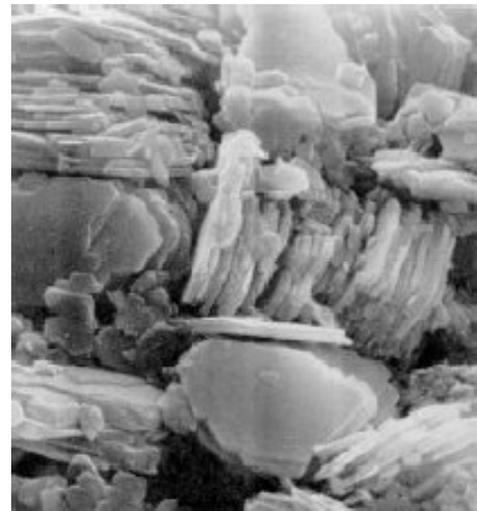


Fig.1.7 : Photographie au MEB
d'une Kaolinite. (Mitchel, 1993)

b- Illites

L'illite appartient à la famille des phyllosilicates **T-O-T** : les atomes de silicium dans les tétraèdres est remplacé par des atomes d'aluminium. Il y a une charge négative élevée compensée principalement par des ions K^+ avec de fortes liaisons. Cette liaison forte empêche

l'introduction de molécules d'eau entre les différents feuillets ce qui rend l'illite peu sensible à l'eau.

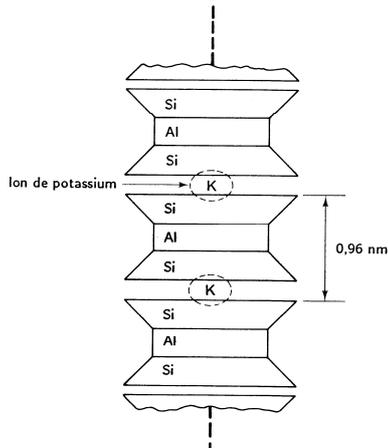
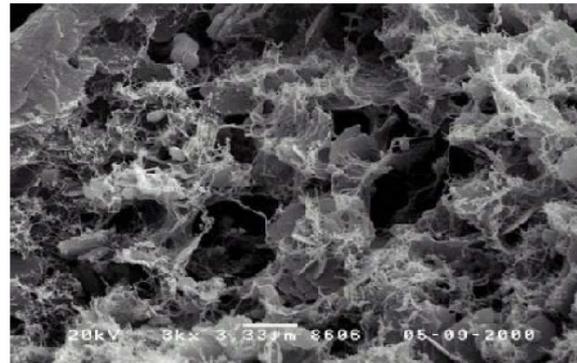


Fig. 1.8 : Schéma de la structure de l'illite, (Lambe, 1953).



Picture size 33 µ-m this picture from the weatherford laboratories

Fig.1.9 : Photographie au MEB d'illite. (Hibouche, 2013)

c- Smectites

Les smectites sont des phyllosilicates constitués de deux couches tétraédriques encadrant une couche octaédrique (phyllosilicates **T-O-T**). La montmorillonite est l'un des principaux sous groupes de cette famille. Les cations compensateurs sont soit le Na^+ ou soit le Ca^+ . Les liaisons interfoliaires ainsi formées sont beaucoup plus faibles ce qui permet à l'eau de s'introduire entre les différents feuillets et de réagir avec ces ions compensateurs. La montmorillonite est le minéral qui possède les propriétés de gonflement les plus importantes des argiles.

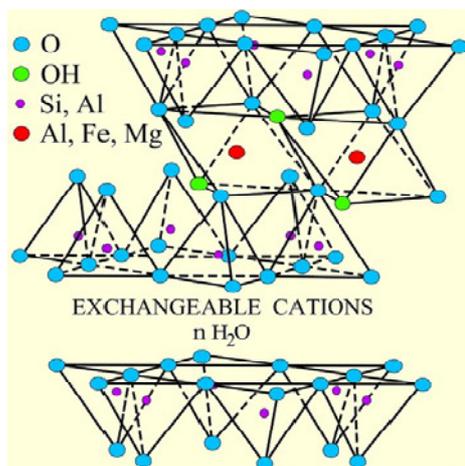


Fig.1.10 : Forme structurale d'une structure **T-O-T**. (Poppe et al, 2001)



Picture size 67 µ-m this picture from the weatherford laboratories

Fig.1.11: Photographie au MEB d'une montmorillonite. (Hibouche, 2013)

1.5 Les propriétés du matériau terre en construction

1.5.1 Texture

Les retours d'expérience sur les techniques de construction en terre permettent de définir des fuseaux granulaires de référence. Il est très important de respecter la teneur minimale en argile pour toutes les techniques voir la (figure 1.12). Il pourrait être établi à 5 %. Le pourcentage commun d'argile à toutes les recommandations était trouvé dans les gammes comprises entre 10 % et 22 % pour les BTC et entre 10 % à 15 % pour le pisé. Cependant, la teneur en limon entre 10 % à 25 % pour le BTC (Jiménez Delgado et al., 2007). Doat et al (1979), démontrent qu'une fraction trop importante en silt provoque après séchage des BTC un retrait trop important et qu'une fraction trop importante d'élément de taille plus grosse diminue les performances des BTC à cause du manque d'argile et de cohésion. Guettala et al. (1997), montrent qu'il est nécessaire de bien fragmenter le sol cohésif car il existe une taille critique pour les mottes de sols argileux. Au-delà d'une taille de 5 mm, ces mottes d'argiles diminuent les résistances mécaniques du sol traité.

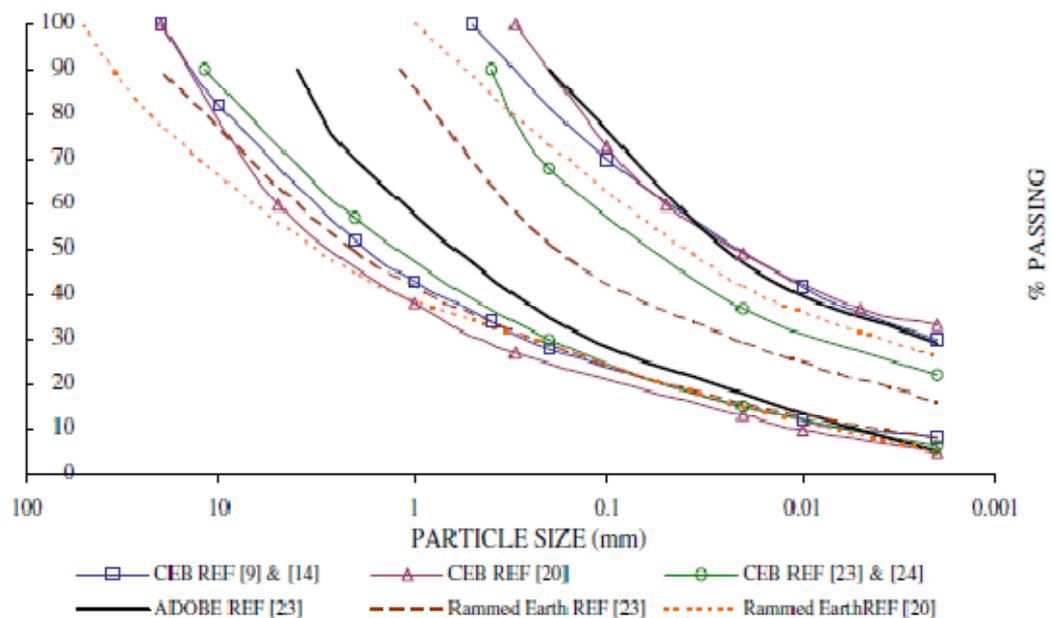


Fig.1.12 : Fuseaux granulaires adoptés pour différentes techniques de construction en terre. (Jiménez Delgado MC et al., 2007)

1.5.2 Plasticité

La plasticité est la capacité des matériaux de maintenir une déformation sans se rompre. Elle est l'un des états de la cohérence des sols. La figure 1.13 représente les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre. La plasticité est similaire pour le pisé et les blocs de terre comprimée, en revanche l'utilisation de la terre en adobe demande une limite de liquidité et un indice de plasticité plus important par rapport à des techniques de construction plus sèche comme le BTC ou le mur en pisé. En général, une bonne terre de construction ayant un indice de plasticité (IP) compris entre 16 à 28 % et une limite de liquidité (LL) entre 32 à 46 % (Jiménez Delgado et al., 2007).

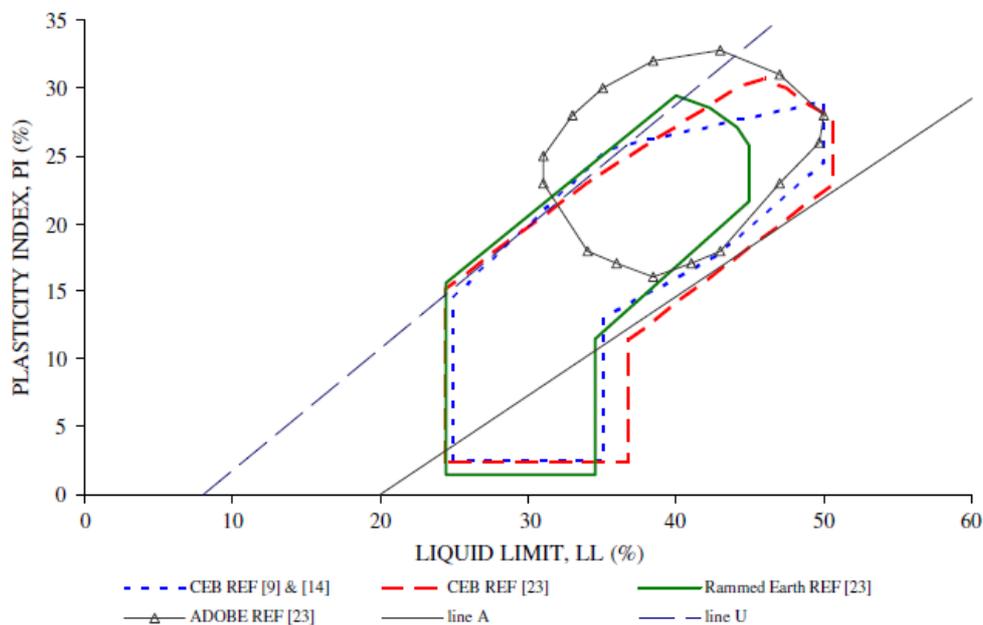


Fig.1.13 : Les zones des limites d'Atterberg de la construction en terre (Jiménez Delgado MC et al., 2007)

1.5.3 Matière organique

Dans le sol, le terme matière organique du sol regroupe l'ensemble des constituants organiques morts ou vivants, d'origine végétale, animale ou microbienne, transformés ou non, présents dans le sol. Leurs effets sont de retarder la réaction pouzzolanique car elles enveloppent la surface de l'argile et gênent ainsi la réaction chaux-argile. Selon Houben et Guillaud (2006) la matière organique supérieure à 1 % dans le sol représente un danger

potentiel. Vénuat (1980) a proposé un autre seuil de 2 % de la matière organique à ne pas dépasser pour le traitement d'un sol.

1.5.4 Sulfates

Les sols peuvent contenir des quantités variables de sulfate qui peuvent entraîner dans certaines conditions (taux de sulfate, solubilité du sulfate, répartition dans le sol) des gonflements par formation d'ettringite. Les minéraux de sulfure s'oxydent et réagissent avec d'autres minéraux contenus dans le sol pour former des sulfates. Cette transformation induit une augmentation du volume en raison des variations dans la structure atomique en plus d'adjonction d'eau à la structure minérale. Houben et Guillaud (2006) a conseillé de faire une étude spécifique pour les terres contenant plus de 2% à 3% de sulfates.

1.6 Stabilisation

C'est un ensemble de procédés permettant une amélioration des caractéristiques mécaniques et de la durabilité de la terre. Elle doit permettre :

- la réduction de la porosité ;
- la diminution du retrait et gonflement ;
- l'obtention d'une meilleure cohésion ;
- l'amélioration de la résistance à l'érosion et l'imperméabilisation de surface ;
- l'obtention de meilleures résistances à la compression sèche et humide, à la traction et au cisaillement.

On dénombre trois principaux procédés de stabilisation (stabilisation mécanique, physique et chimique).

1.6.1 Stabilisation mécanique

Elle s'opère par compactage de la terre qui modifie sa compressibilité et sa densité, sa perméabilité et sa porosité. Le compactage permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques mécaniques élevées, cependant ces matériaux restent très sensibles à l'eau. Mise au contact avec l'eau, les matériaux redeviennent plastiques et ne résistent plus du tout à la compression. C'est pourquoi le compactage est un moyen de stabilisation généralement associé à d'autres méthodes telles que la stabilisation chimique. Il est le plus souvent influencé par trois caractéristiques : le mode, l'énergie et la texture de la terre.

- *Mode de compactage*

Il existe quatre principales méthodes de compression : la compression statique, la compression dynamique par vibration, la compression dynamique par impact et la compression par pétrissage. À chacune de ces méthodes de compression correspond un mode de production ou de mise en œuvre du matériau terre (Houban et Guillaud 2006). Le compactage dynamique permet d'obtenir une résistance plus importante de 50 % par rapport à la vibro-compression et de 20 % par rapport à la compression statique (Bahar et al, 2004).

- *Energie de compactage*

Les recherches concernant l'énergie de compactage montrent qu'une plus grande énergie diminue la teneur en eau et augmente la densité sèche, mais que de trop fortes d'énergies peuvent être néfastes : effets de laminage du matériau.

L'étude menée par Guettala et al. (2002), montrent que les résistances mécaniques augmentent en fonction de la contrainte de compactage jusqu'à optimum de 17.5 MPa qui donnera la meilleure résistance, au-delà de cette valeur il y a une chute de résistance (figure 1.14).

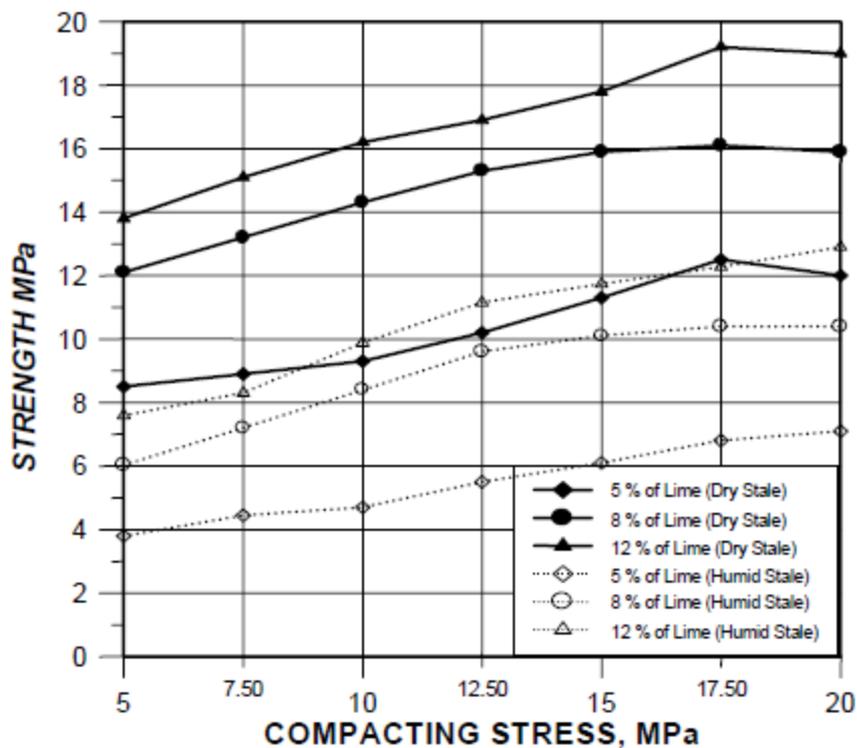


Fig. 1.14 : Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur les résistances mécaniques, (Guettala et al., 2002)

- *Texture de la terre*

Les granularités étroites ne donnent pas de fortes compacités alors que les granularités étalées donnent des courbes de compactage aplaties avec un maximum peu accentuées (figure 1.15).

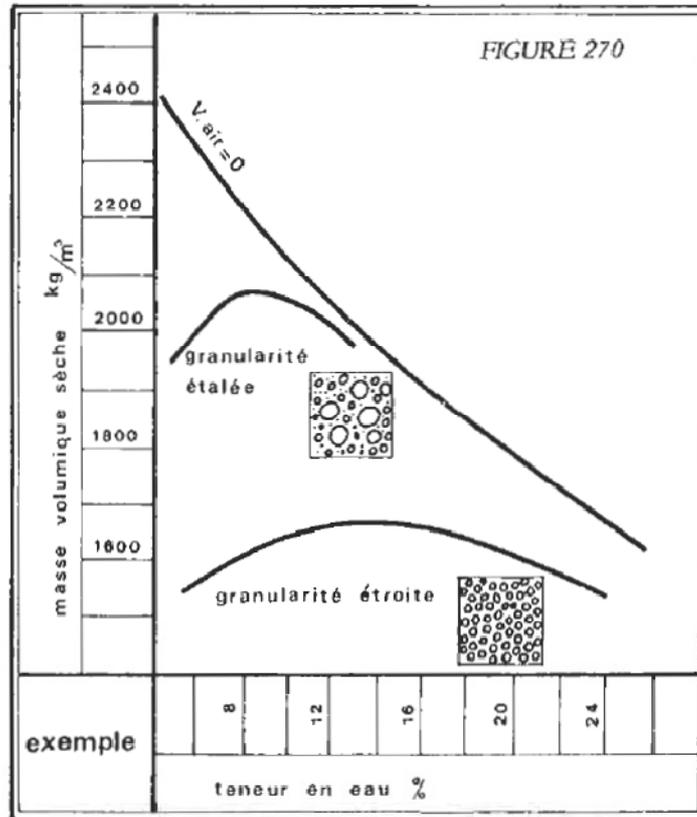


Fig. 1. 15 : Influence de la granularité sur la compacité (Houben et Guillaud, 1994)

1.6.2 Stabilisation physique

La stabilisation physique peut se faire de deux façons différentes : soit de modifier les propriétés des sols par une amélioration des caractéristiques du matériau par correction de la granularité. Dans ce cas on intervient directement sur la texture, le mélange obtenu conduit selon le cas, à la diminution de la plasticité du matériau de base par l'ajout de sable, ou à lui donner une certaine cohésion par l'ajout des fines. Soit d'ajouter des fibres végétales à des terres argileuses. Cela renforce la structure du matériau en l'empêchant de se fissurer au moment du retrait de l'argile lorsque la terre sèche.

Izemmouren et Guettala (2014), ont étudié l'influence de la concentration du sable sur la durabilité des briques de terre comprimée. La stabilisation des briques est obtenue par la correction granulométrique réalisée par deux types de sable concassé. Les résultats montrent

que les résistances mécaniques à l'état sec et humide augmentent en fonction de la concentration du sable. Cependant, pour l'absorption totale, la concentration du sable ne présente pas d'écart important par rapport à la terre seule mais, cette concentration à une valeur optimale (30 %) qui donne une absorption minimale pour les deux types de sol (figure 1.16)

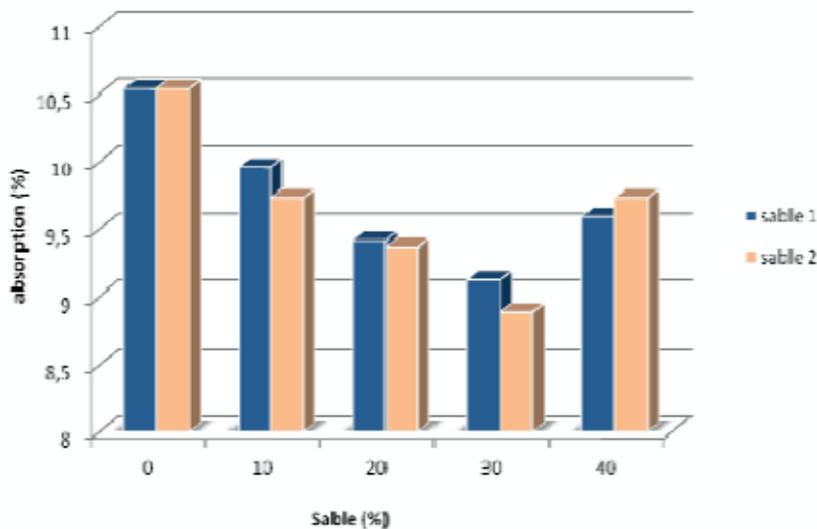


Fig.1.16 : Absorption totale en fonction de la teneur en sable.
(Izemmouren et Guettala, 2014)

1.6.3 Stabilisation chimique

La stabilisation chimique modifie les caractéristiques de la terre par l'intermédiaire de certains ajouts. Afin d'augmenter les caractéristiques mécaniques et de diminuer la sensibilité à l'eau, on a souvent recours à l'adjonction de liants hydrauliques (ciment, chaux et bitume) ou de produits chimiques, rendant les sols traités moins hydrophiles. De nombreux stabilisants chimiques existent et apportent des améliorations différentes à la terre selon leur propriété.

La stabilisation au ciment a été développée dès le début du XXe siècle dans les travaux publics pour la construction des routes. Depuis lors, la technique a largement évolué et se retrouve autant dans les travaux publics que dans le bâtiment. Ajouté à la terre, le ciment hydraté réagit d'une part avec lui-même en formant un mortier de ciment pur hydraté et d'autre part avec la fraction sableuse. Néanmoins, le ciment réagit également avec les argiles selon trois phases : premièrement, l'hydratation qui produit des gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile et la chaux libérée lors de ce processus d'hydratation du ciment qui réagit avec l'argile. Celle-ci est vite consommée par les argiles qui rentrent alors en dégradation.

Deuxièmement, le développement de l'hydratation qui accélère la dégradation des argiles ; les gels de ciment pénètrent en profondeur. La troisième phase est l'interpénétration des gels de ciment et des agglomérats d'argile dégradés qui favorisent une nouvelle structuration du matériau avec formation d'une matrice inerte sableuse liée au ciment, d'une matrice d'argile stabilisée et d'une matrice de terre non stabilisée (Houben et Guillaud, 1994).

Le ciment agit peu sur les particules fines d'argile, il convient donc mieux aux terres faiblement argileuses. Le dosage dépend de la terre utilisée, il varie entre 5 et 12 % pour obtenir des résultats satisfaisants. La stabilisation au ciment améliore les résistances et la durabilité de la terre. Cependant, il reste un matériau cher qui est de plus polluant. Encore les terres stabilisées au ciment ne sont pas réutilisables.

Dans le reste de ce chapitre, nous allons passer en revue la stabilisation des sols par la chaux, puis les différents ajouts minéraux utilisés dans la stabilisation des sols en particulier dans la stabilisation des briques de terre comprimée.

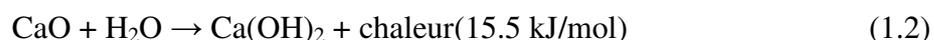
1.7 Stabilisation des sols par l'ajout de chaux

La chaux est parmi les matériaux les plus anciens, utilisés par les humains. Le premier usage documenté de la chaux comme matériau de construction remonte à environ 4000 ans av. J.-C., alors que les Égyptiens l'utilisaient pour plâtrer les pyramides. La stabilisation à la chaux des chaussées a été utilisée par les Romains et autres civilisations. Aujourd'hui, elle rencontre un intérêt croissant dans le domaine de la construction. On distingue différents types de chaux utilisés dans la stabilisation des sols.

- La chaux vive est obtenue par la calcination du calcaire (CaCO_3), à une température supérieure de 900°C . Celle-ci est dissociée à cette température en oxyde de calcium (CaO) ou chaux vive, dioxyde de carbone (CO_2) selon (l'équation 1.1)



- La chaux éteinte est obtenue après la réaction complète de la chaux vive avec de l'eau. La matière produite est appelée chaux éteinte ou chaux aérienne selon (l'équation 1.2)



- La chaux hydraulique est obtenue à partir de calcaires contenant plus de 6 % d'argile. A température entre 800 et 1500°C, le CaO du calcaire se combine avec des éléments des silicates de calcium, des aluminates et des fero-aluminates de calcium.

En principe, tous les types de chaux sont à employer, mais la préférence est néanmoins donnée aux chaux aériennes plutôt qu'aux chaux hydrauliques.

La chaux éteinte est couramment utilisée dans la stabilisation, par contre la chaux vive, son emploi est limité et il faut la manipuler avec précaution. Elle doit être maintenue à l'abri de l'humidité. Cependant, elle est très efficace par rapport à la chaux éteinte vu qu'elle apporte plus d'ions calcium (Houben et Guillaud, 1994).

1.7.1 Processus physico-chimiques des réactions chaux-sol argileux

Plusieurs études consacrées au traitement des sols argileux montrent que deux effets importants apparaissent lors de l'ajout de chaux. Un effet à court terme qui se traduit par une floculation des particules, et un effet à long terme qui résulte de la formation de composés hydratés, aux propriétés liantes suite à une réaction pouzzolanique.

1.7.1.1 Hydratation et ionisation

Lors du mélange de la chaux vive (CaO) au sol, l'hydratation de la chaux vive se traduit selon (l'équation 1.2).

Cette réaction est exothermique et produit la portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Ensuite, hydroxyde de calcium peut être dissout par la réaction d'ionisation suivante:



La réaction entraîne la libération d'ions calcium (Ca^{2+}) et hydroxydes (OH^-) en solution. Ces derniers vont entraîner une augmentation plus ou moins importante du pH du sol en fonction de la quantité de chaux ajoutée. Le pH peut atteindre une valeur de 12,6 au maximum (Marrot, 2010).

1.7.1.2 Echange cationique

Dans le sol, les argiles ainsi que les matières organiques ont la propriété de fixer l'ion calcium. Pour les argiles, la capacité d'échange cationique correspond aux échanges des cations interfoliaires (Cabane, 2004), qui dépend de plusieurs paramètres qui sont la nature de minérale argileux, la nature des cations à remplacer et leurs concentrations. Les cations de

valence élevée remplacent facilement ceux de la faible valence. Pour des cations de même valence, le plus gros peut être facilement remplacé. Les cations peuvent classer par ordre croissant de potentiel de remplacement (Little, 1995):



Dans le cas des smectites, l'effet immédiat de la substitution du sodium par du calcium est la réduction du potentiel expansif de ces argiles (Cabane, 2004).

1.7.1.3 Floculation et agglomération

L'échange cationique entraîne une modification de la densité de la charge électrique superficielle des particules argileuses. Ce phénomène s'explique par la formation de ponts $Ca(OH)_2$ ou $CaOH^+$ entre les feuillets d'argile. Les feuillets sont déstructurés à cause des interactions électrostatiques, et une structure plutôt sphérique s'instaure (figure 1.17). Cette floculation - agglomération change la texture de l'argile et améliore la consistance des argiles (indice de plasticité) (Cabane 2014).

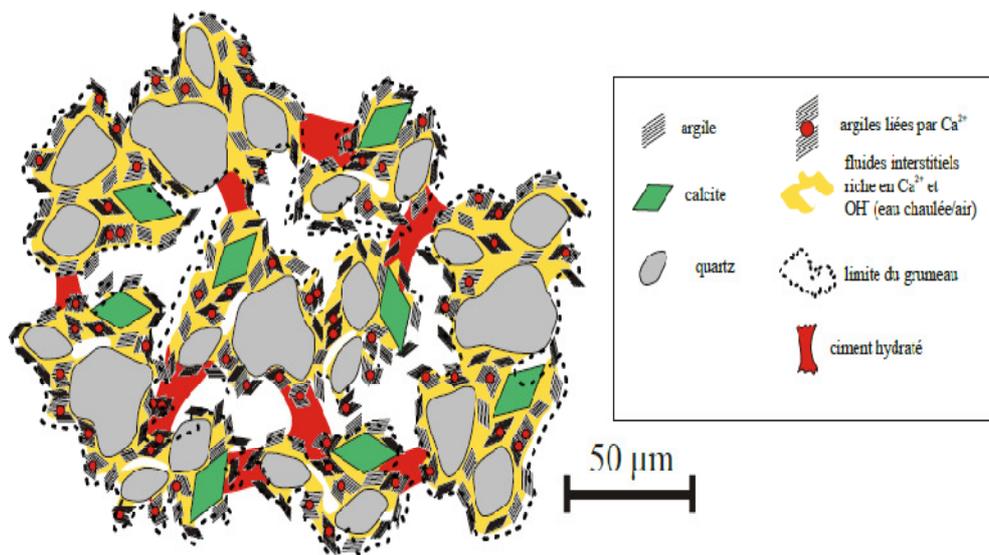


Fig. 1.17 : Schéma du mécanisme de réaction argile-chaux à court terme. (Cabane, 2004)

1.7.1.4 Réaction pouzzolanique

La dissolution de la chaux dans l'eau du sol (libération des cations Ca^{2+} et anions OH^-) permet la saturation de la solution en calcium avec une élévation de pH. En milieu basique et saturé en cation de calcium, les argiles sont attaquées et libèrent l'alumine et la silice qui

réagissent avec le calcium en présence d'eau et les hydroxyles provenant de la chaux pour former des aluminates de calcium hydratés (CAH), des silicates de calcium hydratés (CSH) et des silicates d'aluminate de calcium hydratés (CASH). Ces composés hydratés se rencontrent généralement dans les ciments suite à l'hydratation de silicates de calcium (C_3S , C_2S) et d'aluminates de calcium (C_3A , C_4AF). Ces réactions sont dites réactions pouzzolaniques. Elles sont conditionnées par la saturation initiale du sol en chaux. Eades et Grim (1966) ont trouvé qu'il existe un dosage en chaux minimal, nommé « Point de Fixation de la Chaux » (PFC), pour initier les réactions pouzzolaniques. Selon la norme ASTM D6276-99a, le PFC est le dosage en chaux correspondant à une valeur de pH de 12,4 pour le mélange de sol - chaux.

Plusieurs auteurs (Arabi et Wild ; 1998 et Rao et Shivananda 2005 ; lasladj 2009 ; cabane, 2004), ont montré que la cinétique de cette réaction pouzzolanique est très lente à température ambiante plusieurs mois et années avant que ses effets puissent être appréciés. Cependant, la cinétique est influencée par plusieurs paramètres dont la température de durcissement, le dosage et la nature minéralogique de la fraction argileuse et la teneur en eau ajoutée au sol.

- La température de maturation : les études effectuées par (Boardman et al. (2001) ; Rao et Shivananda (2005) ; Lasladj (2009) ; Cabane, 2004) montrent que la température élevée de cure accélère la cinétique des réactions pouzzolaniques. Cependant, au-dessus de $45^{\circ}C$, les produits de la réaction sont dénaturés. La prise est ralentie voire arrêtée lorsque la température est inférieure à environ $5^{\circ}C$ (Thompson, 1968 ; Bell, 1996), et reprend lorsque la température commence à s'élever à nouveau. AL-Mukhtar et al. (2010 b) a étudié l'effet de la température sur la cinétique des réactions pouzzolaniques d'un sol argileux expansif traité par la chaux. Il montre que la température de cure entre $20^{\circ}C$ à $50^{\circ}C$ multiplie la vitesse de réaction pouzzolanique par 6.
- La nature minéralogique de la fraction argileuse : les différents types d'argile ne réagissent pas de même cinétique avec la chaux (Eades et Grim 1960 ; Cabane 2004). En effet, la réactivité chimique des argiles est mesurée par la quantité d'hydrates (C-S-H et C-A-H) solubles par l'acide, la montmorillonite subit des réactions plus vite que l'illite et la kaolinite.
- Etat hydrique du sol : une teneur en eau élevée favorise la réaction pouzzolanique par la mobilité des ions et la formation des minéraux uniformes dans une surface plus ou moins étendue autour des gains de chaux (Locat 1990 ; Bell 1996) voir (figure 1.18).

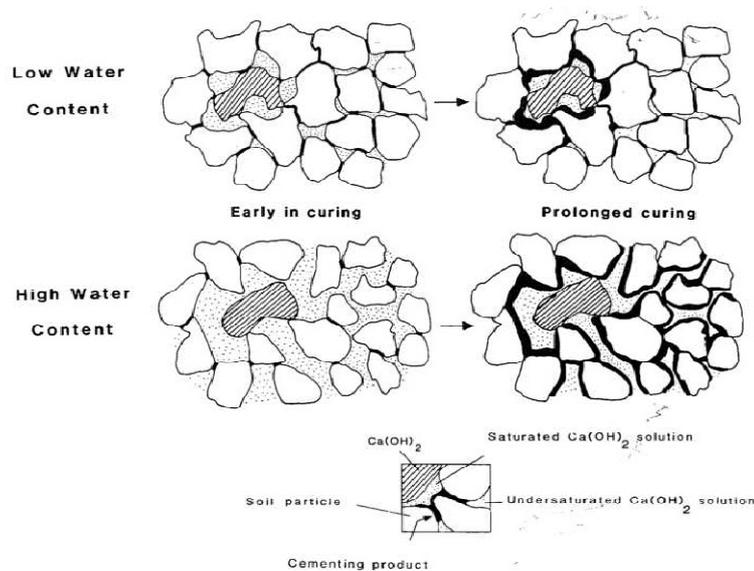


Fig. 1.18 : Schéma du mécanisme de réaction chaux–argile (Locat et al., 1990)

1.7.1.5 Carbonatation (formation de la calcite)

La chaux réagit avec le CO_2 atmosphérique pour former le calcite CaCO_3 . Cette réaction provoque une réduction des propriétés liantes à cause de la consommation d'une partie de la chaux disponible pour la réaction pouzzolanique (Diamond et Kinter, 1965; Khattab, 2002; Cabane, 2004).

1.7.2 Modification des propriétés des sols traités à la chaux

1.7.2.1 Evolution de la consistance du sol

L'ajout de chaux provoque rapidement, en quelques minutes, la floculation des argiles. Cette action entraîne une amélioration de la consistance qui se traduit par une augmentation de la limite de plasticité s'accompagnant ou non d'une augmentation de la limite de liquidité. Cette modification provoque un déplacement du domaine de plasticité vers des teneurs en eau plus importantes (Cabane, 2004). Le décalage de l'indice de plasticité est lié à la nature des minéraux argileux du sol, la teneur en eau et le dosage en chaux.

Bell (1996) a étudié l'évolution de la plasticité lors du traitement à la chaux de trois types de sol: le quartz et de deux types de sols argileux, composés en majorité de kaolinite pour le premier et de montmorillonite pour le second (figure 1.19). Il a conclu que l'augmentation de la limite de plasticité de l'argile traitée à la chaux dépend de sa minéralogie

argileuse. L'augmentation forte de limite de plasticité pour la montmorillonite, moins forte pour la kaolinite et changement non significatif pour le quartz.

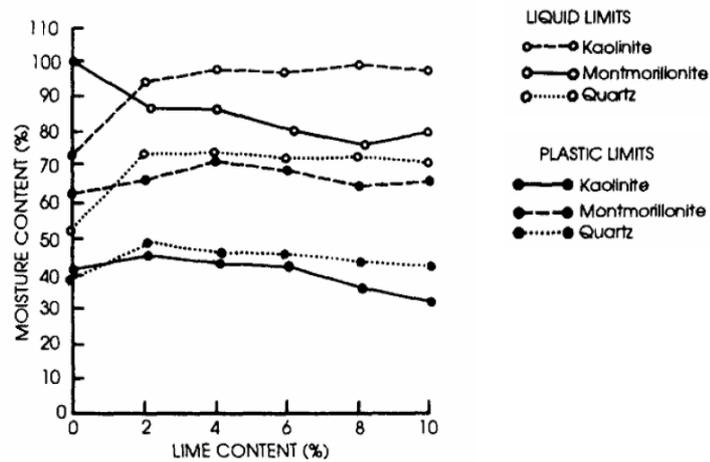


Fig. 1. 19 : Influence de la chaux sur les limites d'Atterberg (Bell, 1996)

L'étude de Lasledj (2009) sur l'argile très plastique (Impersol) traitée à la chaux a montré que l'indice de plasticité diminue avec la quantité de chaux ajoutée jusqu'à 6 % puis diminue plus faiblement avant de se stabiliser pour des pourcentages plus élevés. De plus, le temps de durcissement du sol traité a peu d'effet sur les variations de l'indice de plasticité (figure 1.20).

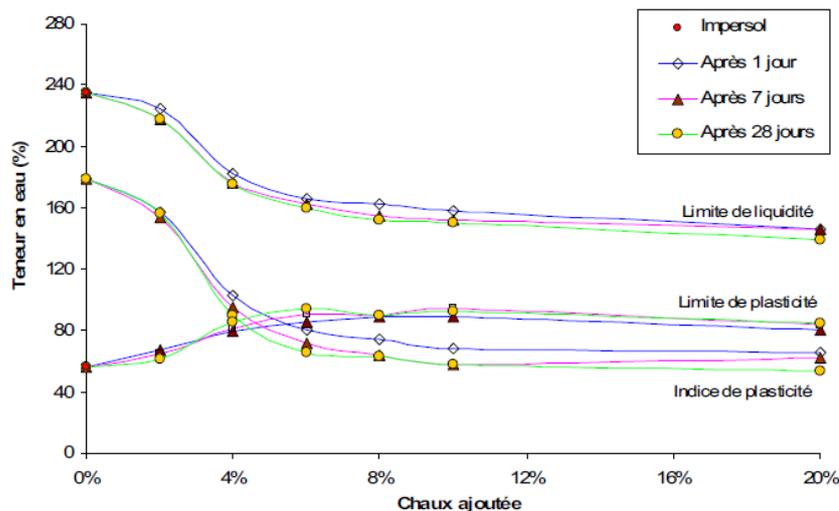


Fig.1 20 : Evolution des limites d'Aterberg en fonction de chaux et de temps de maturation à température ambiante (Lasladj, 2009)

1.7.2.2 L'optimum Proctor

Après l'ajout de chaux au sol, les courbes de compactage Proctor deviennent plus aplaties, ce qui est traduit par un décalage de la teneur en eau optimale de compaction vers des teneurs en eau plus importantes et une diminution des masses volumiques sèches.

Attoh Okine (1995), explique la diminution de la masse volumique sèche par la réorganisation des particules argileuses causées par de floculation/agrégation. Cette modification dépend de la quantité de chaux ajoutée. Siddique et al. (2013) ont étudié l'influence de chaux hydraulique sur la courbe Proctor (figure 1.21).

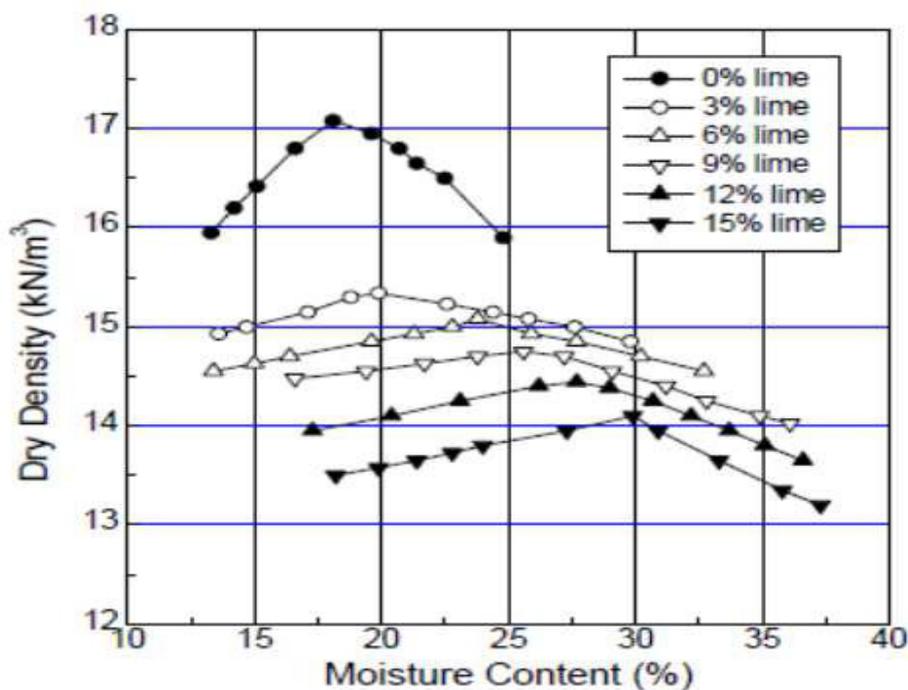


Fig. 1.21 : Influence de la teneur en chaux hydraulique sur les courbes Proctor.

(Siddique A, 2013) cité par (Flament C, 2013)

Ils ont montré que l'augmentation de la teneur en chaux provoque un décalage de la teneur en eau optimale de compaction vers des teneurs en eau plus importantes et une diminution des masses volumiques sèches.

1.7.3 L'influence de l'ajout de chaux sur les propriétés mécaniques du matériau stabilisé

Dans les études géotechniques, plusieurs travaux ont été menés pour étudier l'influence de l'ajout de chaux sur la résistance à la compression des différents sols. Il en ressort que l'ajout de chaux permet d'augmenter la résistance à la compression grâce à la formation du gel hydraté. Plusieurs paramètres influent sur la performance mécanique : la

nature des minéraux argileux, le dosage en chaux, la contrainte de compactage, le temps de cure et la température.

Le Roux (1996) trouve que la kaolinite donne la meilleure augmentation de la résistance mécanique par rapport à l'illite et à la montmorillonite, et ce malgré une réaction moins active comparée à la montmorillonite.

Bell (1996) arrive aux mêmes conclusions que le Roux. Il a étudié le comportement mécanique caractéristique de deux argiles (kaolinite et montmorillonite) et les comparant avec le quartz traité à la chaux (Figure 1.22). La montmorillonite donne des résistances à la compression faible par rapport à la kaolinite. Les fortes résistances sont atteintes pour quartz.

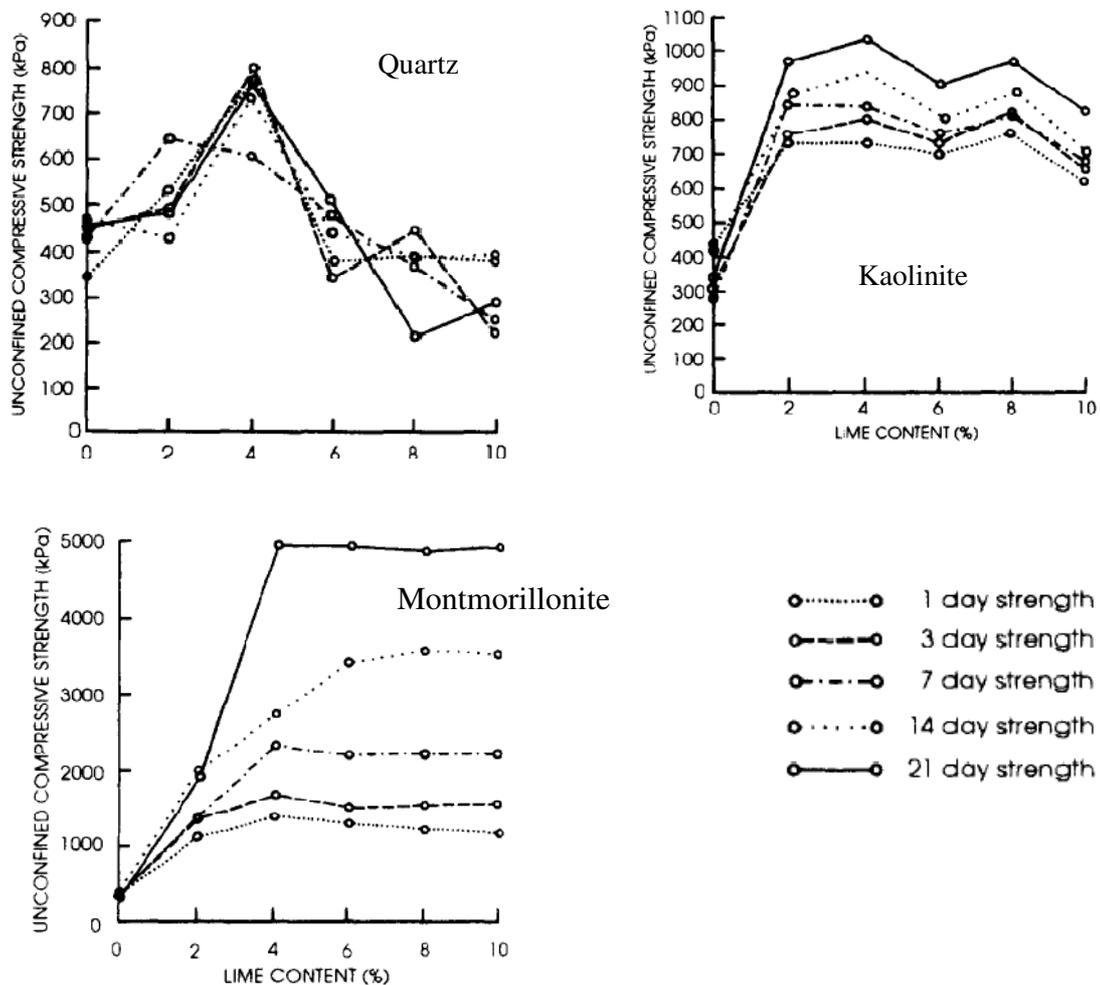


Fig. 1 22 : Influence de la minéralogie d'argile sur la résistance à la compression en fonction de la teneur en chaux et le temps de cure. (Bell, 1996)

Plusieurs auteurs (Bell, 1996 ; Little, 1995) montrent que la résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux et le temps de cure. Al-Mukhtar (2010 a), a expliqué l'augmentation de la résistance en fonction du temps avec l'augmentation de la consommation de chaux. Après 7 jours, la consommation de chaux est peu importante malgré la variation du dosage testé (figure 1.23). A 90 jours et pour un dosage en chaux de 20 %, environ (18 %) de la chaux est consommée, La consommation lente de la chaux met en évidence la lenteur de la réaction pouzzolanique engendrée par la chaux.

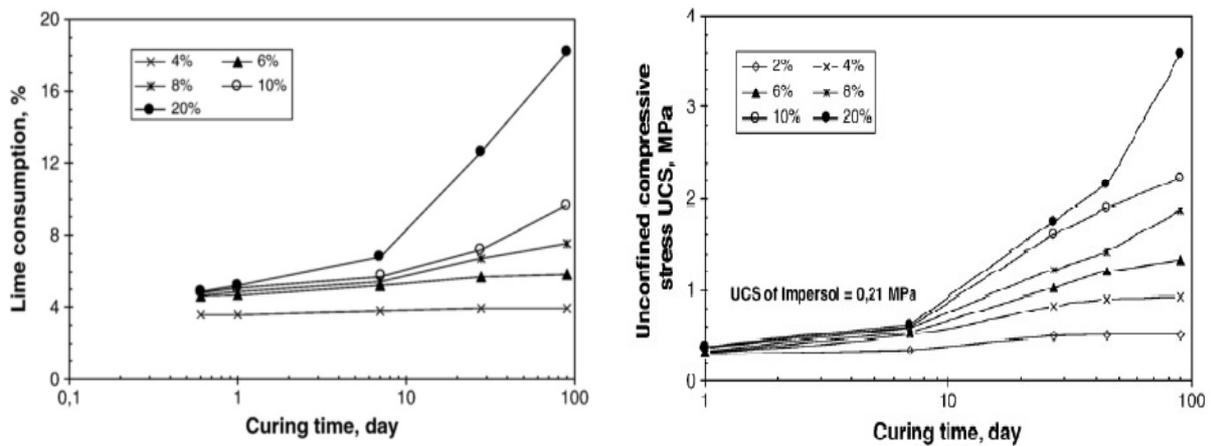


Fig. 1 23 : Résistance à la compression et consommation de chaux d'un sol en fonction de la teneur en chaux et de temps de cure d'après (Al-Mokhtar et al., 2010a)

L'augmentation de la température de cure des sols stabilisés à la chaux permet d'accélérer les réactions pouzzolaniques (AL-Mukhtar et al, 2010b). Après 90 jours, un pourcentage de 6 % en chaux permet de doubler les résistances à la compression d'un sol pour un passage de 20°C à 50°C.

En ce qui concerne la construction d'éléments à base de terre crue. Guettala et al. (2002) ont observé lors de leur étude effectuée sur des blocs de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra, que la résistance à la compression à l'état sec et humide augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux et de la contrainte de compactage. Cette augmentation est de l'ordre de 70 % quand la contrainte varie de 5 à 20 MPa.

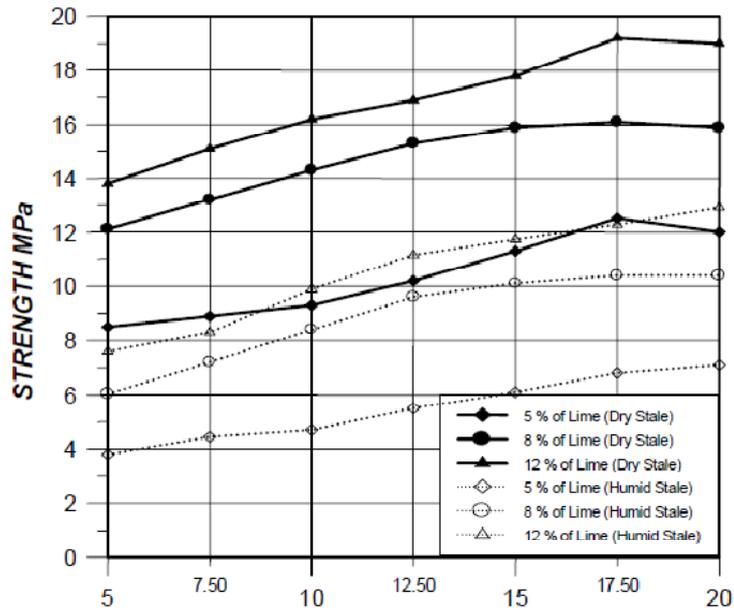


Fig. 1 24 : Influence de la contrainte de compactage et de la teneur en chaux sur les résistances mécaniques (Guettala et al., 2002).

Cependant, Millogo et al. (2008) ont constaté que la résistance à la compression des briques d'adobe (figure 1.25) augmente avec l'augmentation de l'ajout de chaux, en revanche les teneurs plus élevées de chaux supérieures à 10 % du poids de mélange n'ont pas d'effet bénéfique sur la résistance. Ces constats sont justifiés par la microstructure (figure1.26).

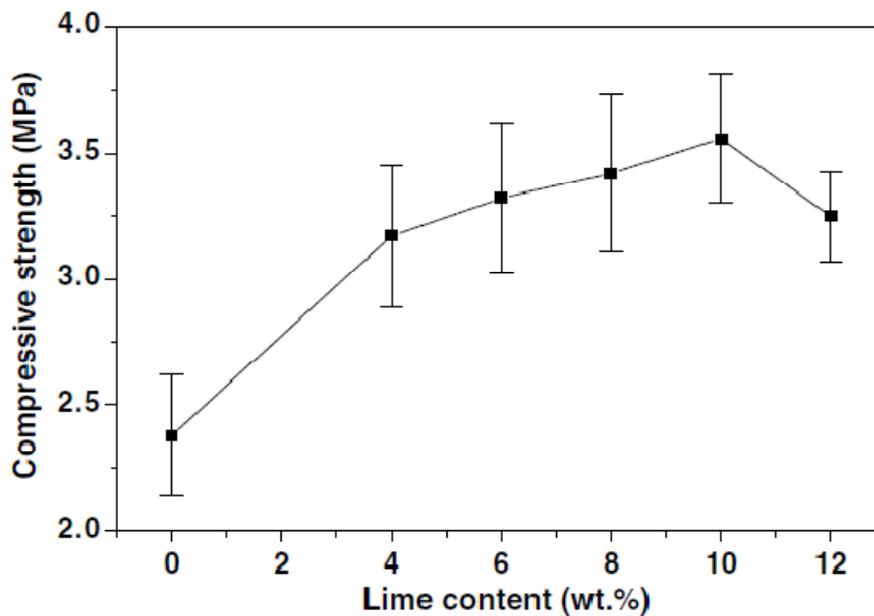


Figure 1.25 : Evolution de la résistance à la compression des briques d'adobe en fonction de la teneur en chaux. (Millogo, 2008)

Lorsque la teneur en chaux est augmentée à 6 %, la silice libre a disparu et la liaison entre les particules a été développée, conduisant ainsi à l'apparition d'une microstructure homogène. Dans ce cas les particules isolées sans relief (figure 1.26 e), identifiées comme CSH ont été développées. Comme la teneur en chaux a dépassé 12 %, la portlandite et la calcite qui manifestent des domaines aussi lumineux (Figure. 1.26 f) zone **H** ont été largement formés. L'excès de la carbonatation a donné lieu à l'apparition d'une hétérogène microstructure.

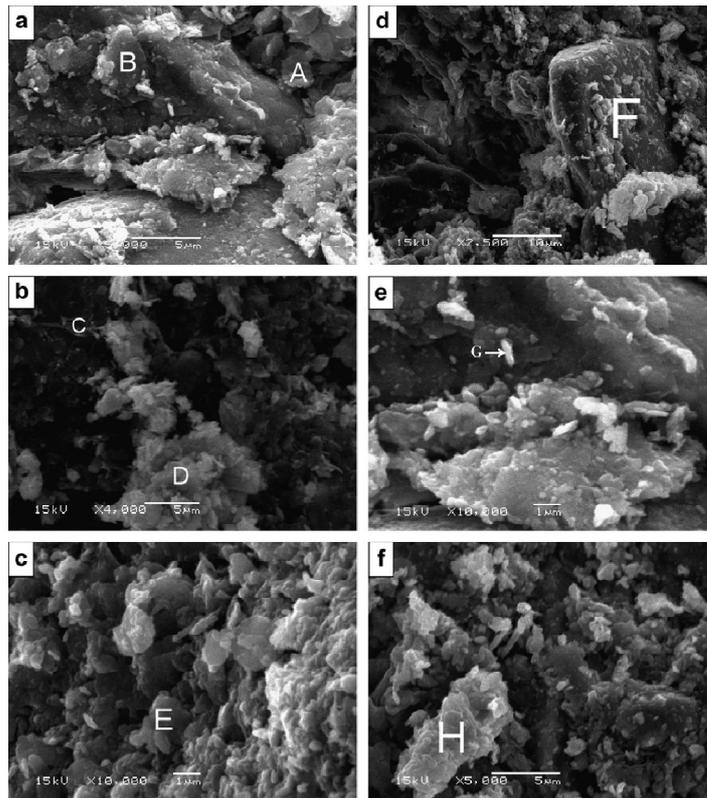


Fig. 1.26 : Micrographies par MEB des briques d'adobes. (a) 0 % chaux, (b) 4 % chaux, (c) 6 % chaux, (d et e) 10 % chaux et (f) 12 % chaux. (Millogo, 2008).

Venkatamara et al (2001) ont traité certains problèmes liés à la technologie des blocs stabilisés à la chaux et curés à la vapeur en utilisant des terres expansives et des terres issues des réservoirs. Ils ont pu montrer que la cure par la vapeur des blocs à 80°C pendant 20 heures en pression atmosphérique, conduit à des résistances à la compression humide considérablement plus fortes que pour la cure obtenue à l'aide des tissus humides à températures ambiantes.

1.7.4 L'influence de l'ajout de chaux sur la durabilité des briques de terres comprimées

L'un des intérêts d'ajouter une teneur de chaux dans un sol argileux est d'augmenter sa durabilité vis-à-vis de l'eau. Guettala et al. (2002) ont effectué des recherches pour améliorer le comportement des blocs de terre comprimée vis-à-vis de l'eau. Les résultats ont montré l'influence de différents paramètres tels que la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur la durabilité des blocs : la perte de poids et l'absorption. Ils ont également observé que l'augmentation de la contrainte de compactage de 5 à 20 MPa et la teneur en chaux de 5 à 12% ont amélioré la perte de poids et l'absorption.

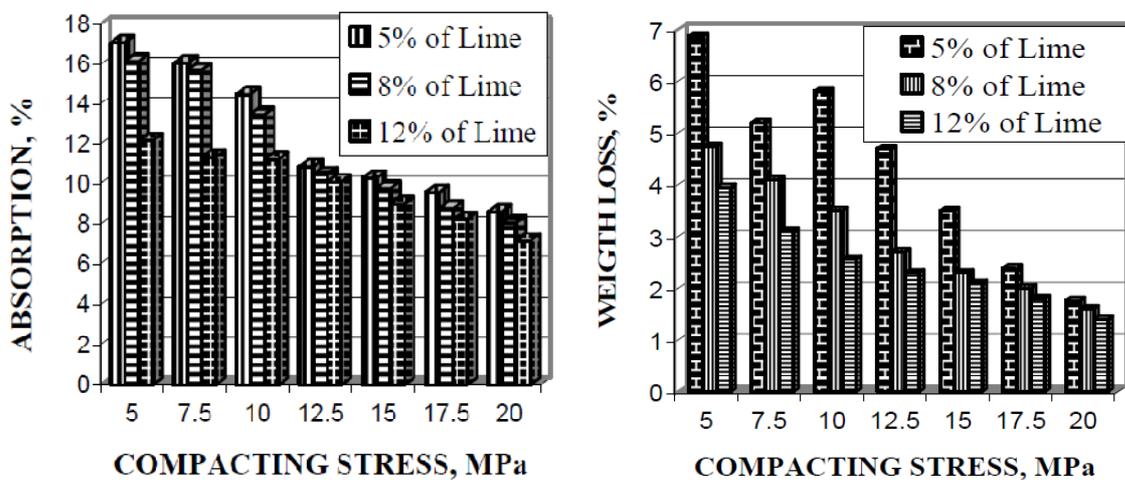


Fig. 1.27 : Influence de la contrainte de compactage et la teneur en chaux sur l'absorption et sur la perte en poids (essai séchage/mouillage). Guettala et al. (2002).

Pour évaluer la fiabilité des essais accélérés en laboratoire de la durabilité, Guettala (2003) a placé ces BTC stabilisés avec la chaux dans des conditions climatiques réelles. Des murets ont été construits avec les mêmes BTC que ceux des essais de laboratoire. Ces murets ont été exposés aux conditions naturelles pendant 48 mois. Il a été observé pour le muret stabilisé par 8 % de la chaux une dégradation partielle au niveau de la face nord de la première et la deuxième rangée, après deux ans d'exposition (figure 1.28). Cette dégradation a provoqué une érosion atteignant une profondeur maximale de 1 mm et sur une surface qui peut atteindre 40 % de la surface de la brique exposée.



Fig. 1.28 : Muret avec des briques stabilisées par 8 % de la chaux après 48 mois d'exposition aux conditions naturelles. (Guettala, 2003)

En revanche, pour les murets traités avec 12 % de la chaux, aucune érosion n'a été enregistrée pendant les 48 mois d'expositions (figure 1.29). Il a conclu que les conditions des essais de laboratoire semblent très sévères par rapport aux conditions climatiques naturelles.



Fig. 1.29 : Muret avec des briques stabilisées par 12 % de la chaux après 48 mois d'exposition aux conditions naturelles. Guettala (2003)

Bui (2008) a exposé pendant 20 ans des murets en pisé non stabilisés et des murets stabilisés par 5% de chaux hydraulique aux conditions climatiques (figure 1.23). La dégradation due à l'érosion des murets est mesurée et équivaut à une épaisseur moyenne d'environ 2 mm (correspondant à 0,5% de l'épaisseur du muret) ; par contre, dans le cas des murets en pisé non-stabilisé, l'érosion mesurée est d'environ 6,4 mm (correspondant à 1,6% de l'épaisseur des murets). Selon l'auteur ces constats permettent d'extrapoler une durée de vie plus longue que 60 ans pour ces murets.



Fig. 1.30 : Effet de la stabilisation à la chaux sur deux murs en pisé (à gauche : pisé stabilisé, à droite pisé non stabilisé) Bui (2008).

Flament (2013) a exploité des fines de lavage de granulas comme matériaux de base pour la formulation des briques de terre comprimée. Il a trouvé que l'ajout de 4 % de chaux hydraulique aux fines de lavage de granulat n'augmente pas la résistance à l'abrasion des briques, en revanche l'ajout de sable et de chaux permet d'obtenir une brique performance à l'abrasion et à la remontée d'eaux par capillarité. Une formulation de 77 % de fines de lavage de granulats, 19 % de sable et 4 % de chaux permet d'améliorer les performances de la brique en abrasion et en capillarité par rapport à l'utilisation des fines de lavage de granulat seul.

1.8 Les ajouts minéraux

Les ajouts minéraux sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux présentant une phase réactive et amorphe. Ils peuvent avoir des propriétés hydrauliques c'est-à-dire qu'ils s'hydratent de façon autonome au contact de l'eau. Ainsi, ils peuvent posséder des propriétés pouzzolaniques, c'est-à-dire qu'en présence d'eau, l'ajout réagit avec la chaux hydratée pour former des silicates de calcium hydraté (C-S-H), qui sont responsables des propriétés liantes de la matrice cimentaire.

L'utilisation des ajouts minéraux dans la stabilisation des sols en remplacement partiel ou total du ciment ou de la chaux présente plusieurs aspects bénéfiques. Leur valorisation dans la stabilisation est non seulement économique mais également écologique.

1.8.1 Pouzzolane naturelle

1.8.1.1 Généralités

Le nom commun de pouzzolane vient de la ville portuaire de Pouzzoles près de Naples en Italie. Historiquement, il ya plus de 2000 ans avant JC, les Romains et les Grecs ont utilisé le mélange à base de pouzzolane et de chaux naturelle comme matériaux liant pour de nombreuses structures. Ces mélanges se composent de six parties en volume d'une pouzzolane naturelle, de deux parties en volume de chaux et une partie en volume de sable (Ramezani pour, 2014). Ces mortiers ont été utilisés comme étant le premier ciment hydraulique dans les ponts, réservoirs d'eau et d'autres types de structures. Certaines de ces structures existent encore dans les pays comme l'Italie, l'Iran, la Grèce et l'Espagne. De nombreux monuments romains sont en usage aujourd'hui dans de nombreuses parties de l'Europe. Cela est attribuable à la forte durabilité des matériaux pouzzolaniques dans diverses conditions environnementales.

Les pouzzolanes naturelles sont des roches volcaniques (pyroclastites) possédant une texture scoriacée et alvéolaire de couleur rouge ou noire avec toutes les teintes intermédiaires. Leur formation peut résulter de l'expansion rapide d'un magma en surface accompagnée d'un dégazage ou d'une interaction entre le magma et de l'eau. On les distingue des basaltes qui ont un aspect massif alors que les matériaux pouzzolaniques sont poreux, leur refroidissement rapide provoque la présence d'une structure amorphe vitreuse.

Le terme pouzzolane est étendu à tous les matériaux inorganiques, naturels ou artificiels qui ont des propriétés pouzzolaniques c'est-à-dire la capacité d'un matériau à faire prise en présence de chaux et de l'eau. La classification de ces matériaux est présentée dans la (Figure 1.31)

1.8.1.2 Caractéristiques chimiques et minéralogiques

La composition chimique des pouzzolanes volcaniques incohérentes varie dans de larges proportions, la silice et l'alumine sont toutefois les constituants majoritaires. Les éléments suivants sont des oxydes de fer, de calcium et des oxydes de magnésium (figure 1.31). La teneur en alcalis n'est pas élevée, mais peut varier entre 3 % et 10 %. La perte au feu est généralement faible, mais peut atteindre à 9 % dans certaines pouzzolanes. L'analyse de certaines pouzzolanes volcaniques incohérentes est présentée au (tableau 1.3).

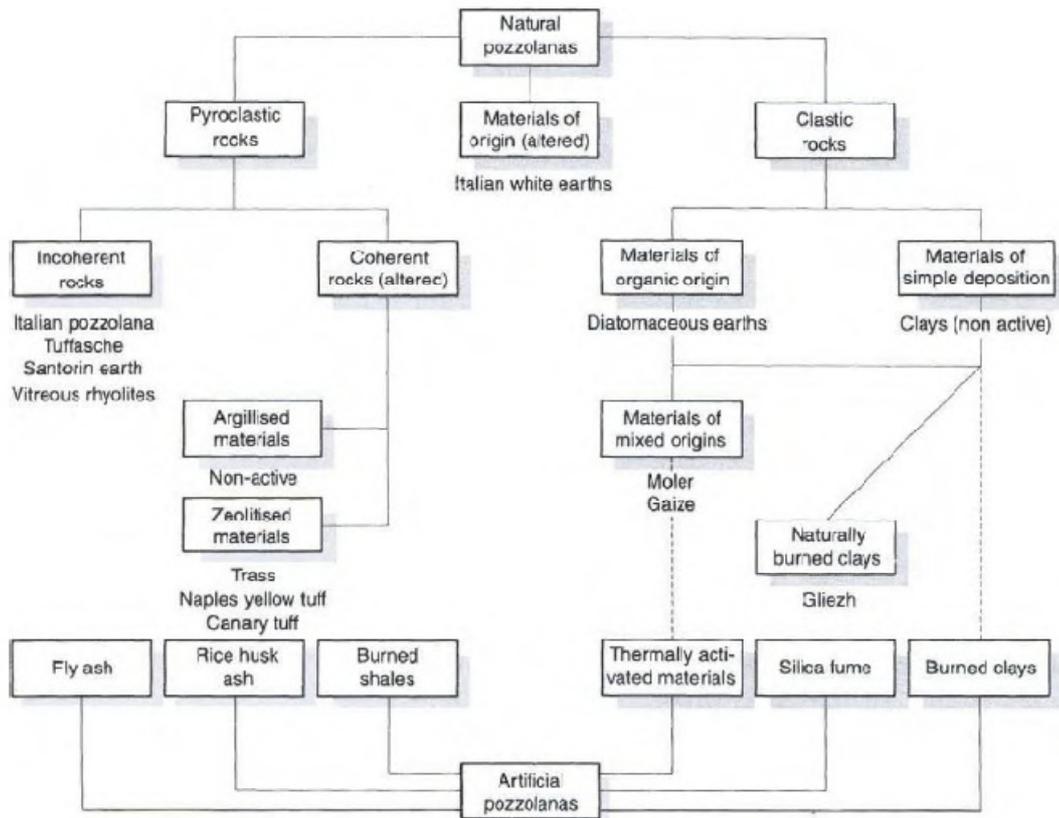


Fig 1.31 : Classification des pouzzolanes présentée lors du 6ème congrès international sur la chimie du ciment de Moscou en 1974 (Lea's, 2003)

Tableau 1.3 : Compositions Chimiques (%) de certaines pouzzolanes volcaniques incohérentes, (Ramezianpour, 2014)

Pouzzolane	Pays	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI	
incohérentes	Bacoli	Italie	53,1	17,9	4,3	9,1	1,2	3,1	7,6	0,65	3,1
	Barile	Italie	44,1	19,2	9,8	12,3	6,7	1,6	1,1	tr	4,4
	Salone	Italie	46,8	18,4	10,3	8,5	4,8	1,0	6,4	tr	3,8
	Vizzini	Italie	50,5	16,8	11,6	4,9	5,2	0,9	0,2	0,15	9,7
	Volvic	France	54,3	16,8				4,5	2,6		
	Terre de Santorin	Grèce	65,1	14,5	5,5	3,0	1,1				3,5
	Rhine	Allemagne	58,9	19,5	2,9	2,5	1,3	6,1	4,5		2,2
	Rhyolite	USA	65,7	15,9	2,5	3,4	1,3	5,0	1,9		3,4
	Furue shirasu	Japon	69,3	14,6	1,0	2,6		3,0	2,4		1,9
	Higashi Matsuyama	Japon	71,8	11,5	1,1	1,1	0,5	1,5	2,6		6,5

La composition minéralogique de la pouzzolane naturelle varie également aux différentes sources. En raison de leur processus de formation, les pouzzolanes naturelles sont constituées des particules cristallines et non cristallines sous forme de particules vitreuses. Le tableau 1.4 montre la composition minéralogique de certaines pouzzolanes volcaniques.

Tableau 1.4 : Composition minéralogique de certaines pouzzolanes volcaniques
(Mielenz,R.C, 1950). Cité par (Ramezani pour, 2014).

Pozzolan	Country	Active phases	Inert phases
Bacoli	Italy	Glass	Quartz, feldspars, augite
Barile	Italy	Partially decomposed glass	Pyroxenes, olivine, mica
Salone	Italy	Glass analcime	Analcime
Vizzini	Italy	Glass	Leucite, pyroxenes, alkali, feldspars, mica
Volvic	France	Glass	Feldspars, quartz, diopside
Santorine earth	Greece	Glass	Quartz, anorthite, labradorite
Rhine trass	Germany	Glass (55–60) Glass (62–67)	Quartz (9 %), feldspar (15 %)
Bavaria trass	Germany	Chabasite (3 %) Analcime (5 %)	Quartz (19 %), feldspar (15 %)
Rhyolite pumicite	USA	Glass (80 %)	Clay (5 %), calcite, quartz, quartz (9 %), feldspar, etc. (15 %)
Higashi Matsujama	Japan	Glass (97 %)	Quartz (1 %), anorthite (1 %)
Jajroud trass	Iran	Glass (65 %)	Quartz (22 %), rhyolite, chert, chalcedony

1.8.1.3 Activité pouzzolanique

La réaction pouzzolanique est définie comme la réaction entre les phases actives de la pouzzolane avec de la chaux. La quantité de matière amorphe détermine généralement la réactivité des pouzzolanes naturelles. La réaction pouzzolanique est évaluée par la consommation de la chaux dans un mélange de chaux-pouzzolane ou la mesure de la silice et l'alumine soluble dans l'acide. Selon (Ramezani pour 2014 ; Lea's, 2004), il y a plusieurs paramètres influençant cette activité pouzzolanique, La nature des phases actives et leurs proportions, la finesse des pouzzolanes, le rapport chaux/ pouzzolane dans le mélange, la durée et la température de cure.

1.8.1.4 Utilisation

La pouzzolane est utilisée dans un grand nombre de domaines variés. Dans la stabilisation des sols pour les routes. En génie civil, les applications sont nombreuses. En plus d'être un composant normalisé des ciments et des bétons, elles présentent toutes les caractéristiques pour être utilisées en tant que granulats pour bétons légers.

En Algérie, il y a une quantité appréciable de matériaux pouzzolaniques d'origine volcanique qui s'étend de façon sporadique le long de 160 Km entre la frontière Algéro - Marocaine et le Sahel d'Oran (Siad et al., 2005). L'utilisation de la pouzzolane se limite seulement au secteur de l'industrie cimentaire, qui l'utilise comme ajout actif à des taux de 15 à 20 % dans la fabrication des ciments composés.

1.8.2 Laitier de haut fourneau

1.8.2.1 Généralités

Les laitiers de haut fourneau sont des sous-produits de l'élaboration de la fonte. Ils sont formés de constituants non ferreux, des fondants et des cendres de coke. On peut obtenir deux types de laitiers de haut fourneau suivant le processus de refroidissement :

- Le laitier cristallisé obtenu par refroidissement lent
- Le laitier vitrifié (granulé) obtenu par refroidissement rapide, par trempe.

L'origine des deux types de laitiers est la même, la différence entre ces deux matériaux réside seulement dans leurs cristallographiques et réactivité chimique, et cela conditionne les propriétés des matériaux obtenus, donc leur utilisation.

Le laitier vitrifié présente une structure vitreuse, riche en énergie ce qui lui confère une hydraulicité latente. Au contraire, le laitier cristallisé a une forme minéralogique stable et son pouvoir hydraulique, lorsqu'il existe, n'est que modeste (Alexandre, 1988).

1.8.2.2 Production du laitier granulé

La matière première du laitier moulu est un matériau secondaire issu de la fabrication de la fonte. Le minerai de fer (constitué essentiellement de silice, d'oxyde de fer et d'alumine) et le fondant (chaux CaO et dolomie MgO) sont portés à haute température (1400 à 1600°C) dans un haut-fourneau. La fonte est obtenue par cette opération de fusion. La gangue liquéfiée du minerai, de densité plus faible, vient en surface de la fonte en fusion et peut, de ce fait, être récupérée par écoulement séparé. A la sortie du haut-fourneau, cette gangue (le laitier de haut-

fourneau) est soumise à un refroidissement brutal : la trempe, généralement effectuée à l'aide de jets d'eau sous forte pression. Sous l'effet de cet abaissement très rapide de la température, le laitier se solidifie et forme des « granules » de dimension comparable à celle d'un sable (moins de 5 mm) : le matériau obtenu, le laitier granulé de haut-fourneau, est vitreux et possède des propriétés hydrauliques latentes.

1.8.2.3 Caractéristiques chimiques et minéralogiques

Les composantes principales du laitier de hauts fourneaux sont la chaux (CaO), la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et la magnésie (MgO) qui représentent presque 95 % à 97 % des constituants du laitier. Le laitier de haut fourneau est un produit dont la composition chimique est variée d'un pays à l'autre, le tableau (1.5) montre l'analyse chimique de quelque pays (Behim, 2005).

Tableau 1.5 : Composition chimique du laitier de haut fourneau D'après (Behim, 2005)

Oxydes	Teneur en %						
	Algérie	Australie	Allemagne	Afrique/sud	Canada	France	Japon
SiO ₂	40.1	35.8	31.5	34.2	35.6	33.5	31.2
CaO	40.2	41.1	36.6	39.4	38.8	42.2	37.4
Al ₂ O ₃	6.0	16.2	16.0	10.4	07.8	13.3	16.2
MgO	4.7	2.65	10.1	11.6	11.5	6.0	8.46
SO ₃ , S*	0.15*	1.52	2.36	2.09	4.36	0.94	3.03
FeO	2.0	-	-	-	0.11	12.4	0.05
MnO	2.64	1.63	0.47	1.26	0.60	2.64	0.65
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	0.01	-	0.01
TiO ₂	1.16	-	1.08	0.39	0.27	0.55	1.95
Na ₂ O	-	-	0.90	0.25	0.27	0.39	0.64
K ₂ O	0.70	1.43	0.77	0.50	0.43	0.70	0.47
Total	97.6	100.3	98.9	100.0	99.6	100.1	100.2

Sur le tableau précédent, on constate que la composition chimique du laitier de haut fourneau est proche de celle du ciment portland. Cette analogie peut être schématisée dans le diagramme de Kiel, diagramme ternaire représentant le système chaux-silice-alumine. Ce diagramme est présenté dans la (figure 1.32).

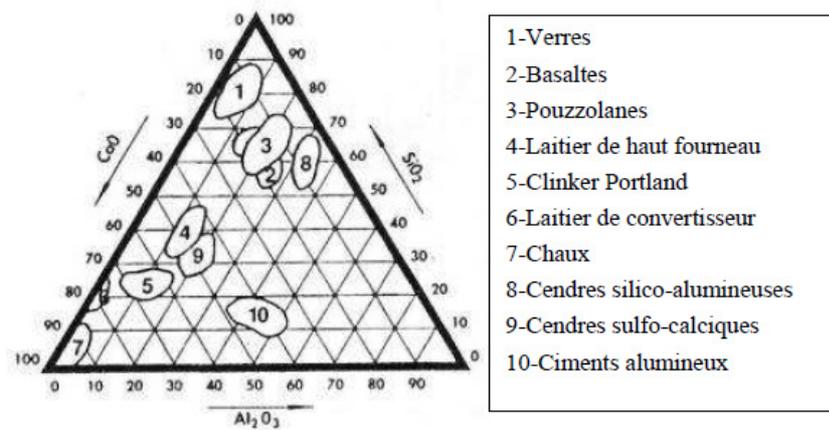


Fig. 1.32 : Diagramme de Kiel (Houze, 2013)

En ce qui concerne la minéralogie, le laitier est caractérisé par une phase amorphe très majoritaire, de l'ordre de 90 %. Pour les 10 % restant, on parle alors de germes de cristallisation. Ces germes minéralogiques sont essentiellement des silicates ou des silicoaluminates de chaux. (Alexandre et al, 1998).

1.8.2.4 Réactivité hydraulique du laitier

La réactivité du laitier de haut fourneau dépend de plusieurs paramètres :

- La composition chimique a un rôle important sur la réactivité du laitier. La réactivité augmente avec la teneur en chaux et en magnésie pour un dosage inférieur à 15%, mais diminue avec la teneur en silice et en oxyde de manganèse (Divet et al, 2006). Les calculs d'indices de basicité permettent d'évaluer le caractère hydraulique des laitiers. Ils correspondent à la somme des constituants basiques du laitier sur la somme de ses constituants acides. Les indices les plus utilisés sont les suivants :

$$M_{b1} = \frac{CaO+MgO}{SiO_2} ; \quad M_{b2} = \frac{CaO}{SiO_2} ; \quad M_{b3} = \frac{CaO+MgO}{SiO_2+Al_2O_3}$$

D'après l'indice de basicité du laitier ($M_b > 1$), le laitier est basique. Selon (Alexandre et al, 1998), la basicité élevée est à priori favorable.

- La surface spécifique a un rôle prédominant sur la réactivité hydraulique du laitier. Plus la finesse du laitier est élevée, plus la réactivité hydraulique et les résistances mécaniques sont élevées.

La minéralogie du laitier a un effet sur sa réactivité hydraulique par leur taux de vitrification. En effet la détermination du taux de vitrification est très importante car sa structure vitreuse est riche en énergie qui n'a pas été dissipée, et n'a pas atteint son niveau d'énergie le plus bas correspondant à l'état cristallin. De ce fait, le laitier possède une énergie plus élevée qu'à l'état cristallin. L'hydraulicité du laitier vitrifié est définie par sa faculté à évoluer, sous l'effet d'une activation basique ou autre, vers son plus bas niveau énergétique en formant des produits d'hydratation solides (Divet et al, 2006). Le laitier vitrifié est ainsi un matériau hydraulique latent.

1.8.2.5 Hydratation du laitier

Contrairement au ciment qui s'hydrate par simple addition d'eau, le laitier de haut fourneau vitrifié n'est rapidement soluble que dans une eau alcalinisée et a donc besoin, pour faire prise, d'un agent d'addition appelé activant (Alexandre et al, 1998).

Le processus d'hydratation du laitier est ensuite semblable à celui du ciment Portland tel qu'il fut expliqué par Le Chatelier (Divet et al, 2006).

Le processus d'hydratation peut être vu comme une répétition de cycles dissolution - concentration - précipitation, qui se prolonge pendant des années jusqu'à hydratation maximum des grains de laitier voir (figure 1. 33). L'hydratation intervient d'abord par dissolution du laitier dans l'eau de gâchage basique. Cette dissolution aboutit à une solution basique concentrée, d'où résulte une précipitation de composés hydratés. Cette précipitation fait à son tour chuter la concentration des éléments dans la solution, ce qui permet la solubilisation d'une nouvelle quantité de produit jusqu'à une concentration entraînant une nouvelle précipitation de composés hydratés (Van Rompaey, 2006 ; Alexandre et al., 1998).

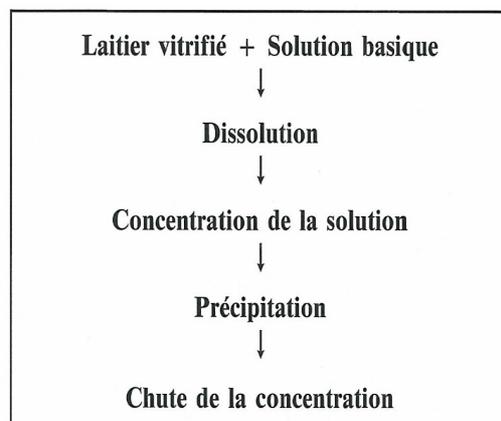


Fig. 1.33 Prise du laitier (Alexandre et al., 1998)

1.8.2.6 Activation du laitier

L'activation du laitier vitrifié peut être obtenue par trois modes : l'activation alcaline par la soude ou la chaux, l'activation sulfatique par les sulfates, ou l'activation sulfato-calciue (ou sodosulfatique) qui est une combinaison des deux premières activations. L'activant peut jouer le rôle de catalyseur ou de réactif : l'activant catalyseur active la réaction de dissolution/précipitation et n'entre pas dans la structure de l'hydrate, tandis que l'activant réactif active la réaction de dissolution/précipitation, et est consommé lors de la réaction d'hydratation et rentre donc dans la structure de l'hydrate. La soude agit comme un catalyseur tandis que la chaux et les sulfates agissent comme des réactifs (Houze, 2013).

1.8.2.7 Utilisation

Le laitier de haut fourneau granulé est principalement utilisé comme addition pour liants hydrauliques, dans la production de ciment ou la fabrication de bétons. Le laitier granulé peut être valorisé comme addition minérale dans la stabilisation des sols. Il est utilisé aussi comme sable.

1.8.3 Poudre de verre

1.8.3.1 Généralités

Le verre est un matériau ou un alliage dur, fragile et transparent à la lumière visible, à base d'oxyde de silicium (silice SiO_2 , le constituant principal du sable) et de fondants. Du point de vue physique, le verre est un matériau amorphe (c'est-à-dire non cristallin) présentant le phénomène de transition vitreuse. En dessous de sa température de transition vitreuse, qui varie fortement avec la composition du verre (plus de 1000°C pour la silice vitreuse, moins de 40°C pour le sélénium amorphe), le verre se présente à l'état vitreux.

1.8.3.2 Structure et composition

Le verre est un matériau amorphe, c'est-à-dire non cristallin. De ce fait, il présente un désordre structural important. Sa structure microscopique est telle qu'il n'existe aucun ordre à grande distance dans un verre. Un verre peut même être vu comme un réseau tridimensionnel, semblable à celui d'un cristal, mais dans lequel seul l'ordre à courte distance est conservé. Comparons, par exemple, la structure de la silice (SiO_2) cristalline (sous sa forme cristobalite) et celle de la silice vitreuse voir la (figure 1.34).

Dans les deux cas, chaque atome de silicium est lié à quatre atomes d'oxygène, formant ainsi des tétraèdres SiO_4 ; chaque tétraèdre pouvant être considéré comme une « brique » de l'édifice final. Mais tandis que la cristobalite peut être définie comme un empilement régulier de ces briques SiO_4 , la silice vitreuse peut être considérée comme un empilement désordonné de ces mêmes briques SiO_4 (Zachariassen, 1932).

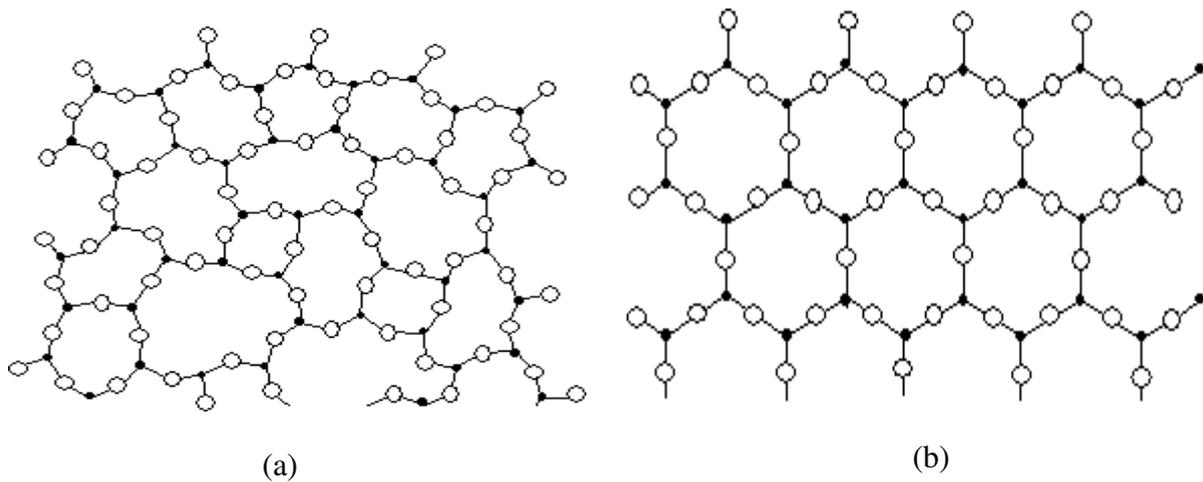


Fig 1. 34 : Représentation schématique bidimensionnelle de silice, (a) structure cristalline, réseau ordonné (cristobalite), (b) structure vitreuse, réseau amorphe (Zachariassen, 1932).

1.8.3.2 Réaction pouzzolanique

La réaction pouzzolanique de la poudre de verre dans une matrice cimentaire désigne donc la réaction en présence d'eau, de la silice amorphe du verre avec la chaux libérée par l'hydratation du ciment. Plusieurs facteurs qui influent sur cette réaction:

- La finesse du verre : plus la finesse du verre est élevée, meilleure est son activité pouzzolanique. Shayan et al. (2004) ont remarqué que la poudre de verre de finesse Blaine relativement élevée de $800 \text{ m}^2/\text{kg}$ développe des réactions pouzzolaniques importantes dans le mortier.
- Le taux du verre : La résistance des mortiers et des bétons diminue en fonction de leur teneur en verre (Idir, 2009). Les études sur le béton ordinaire montrent que l'on peut incorporer jusqu'à 30 % de la poudre de verre en remplacement partiel du ciment (Shayan et al., 2006 ; Zidol, 2009).
- La couleur du verre : Le verre de couleur brune est le verre qui possède la plus faible activité pouzzolanique derrière le verre vert puis le verre blanc (Idir, 2009).

- Une température élevée accélère l'activation de la réaction pouzzolanique du verre (Idir, 2009).

1.8.3.4 Utilisation

Le verre est utilisé dans le béton en fonction de sa taille : soit comme granulats, soit comme fines. Récemment, des études antérieures conduites à l'Université de Sherbrooke (Canada), portant sur la caractérisation de la poudre de verre et l'évaluation de ses performances dans les pâtes de ciment, les mortiers ou différents types de bétons (béton autoplâçant, béton haute performance)

1.9 Effet des ajouts minéraux sur les propriétés du sol

Plusieurs études et recherches expérimentales ont été menées sur l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés physico-mécaniques et la durabilité des sols argileux. Le potentiel de la stabilisation dépend du type de sol, le dosage et la combinaison des stabilisants, et le temps de cure.

On s'intéresse à présenter ci-après une synthèse des travaux de recherche effectués par plusieurs chercheurs sur les effets induits par l'ajout de pouzzolane naturelle et laitier de haut fourneau aux sols argileux.

1.9.1 Pouzzolane naturelle

Très peu d'études ont été publiées qui se sont concentrées spécifiquement sur l'utilisation de pouzzolane naturelle comme ajout minéral dans le sol. Bien qu'il y ait peu de littérature existante, il y a une bonne concordance que l'ajout de pouzzolane naturelle améliore les caractéristiques physico-mécaniques et la durabilité du sol.

Hossain et al. (2007) ont mené une étude sur l'influence des cendres volcaniques (VA), la chaux, le ciment et leurs combinaisons sur la résistance à la compression et la durabilité des deux sols argileux (sol 1 et sol 2). En ce qui concerne la résistance à la compression, les résultats montrent que la résistance augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux et la teneur en ciment de 0 à 4 % pour les deux sols. Dans le cas du ciment, l'augmentation de la résistance à la compression est plus élevée par rapport à la chaux et cendres volcanique, en revanche la stabilisation à la chaux donne la résistance la plus faible. La figure 1.35 montre également l'effet de la combinaison de 2 et 4 % en chaux et de ciment respectivement avec 5 et 10 % en VA. Les combinaisons avec des teneurs plus élevées

produisent des résistances à la compression importantes. La combinaison du ciment avec VA produit des résistances à la compression supérieures par rapport aux combinaisons de chaux et VA.

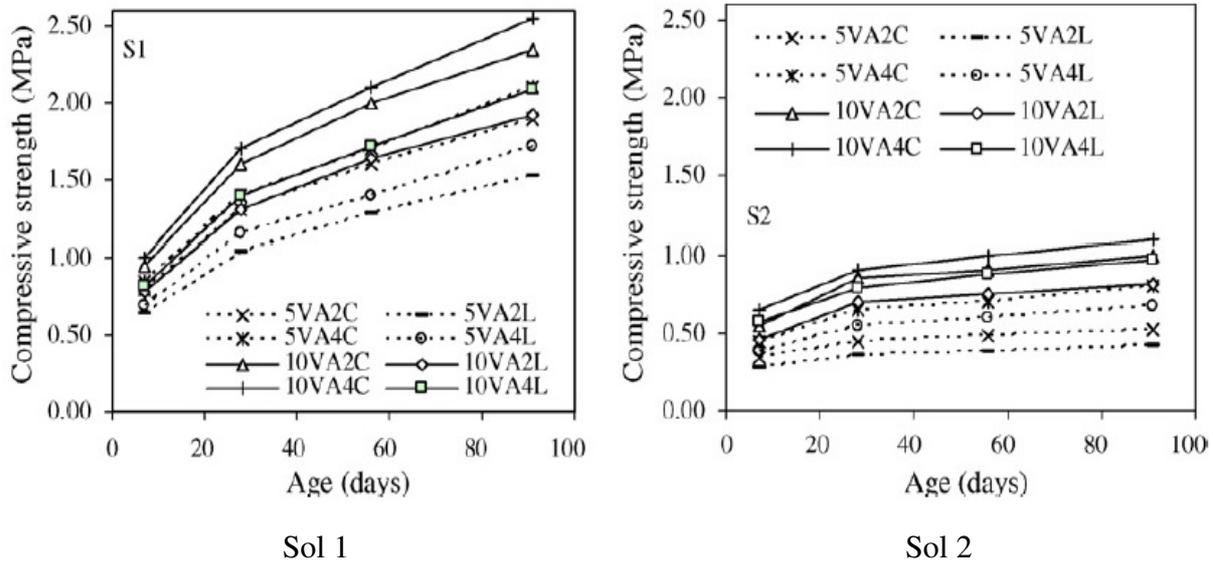


Fig.1.35 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps de cure des différentes combinaisons pour les deux sols (Hossain et al. 2007)

Les mêmes observations sont constatées pour le coefficient d'absorption d'eau par capillarité. Il diminue avec l'augmentation des stabilisants et la combinaison entre eux. Selon les auteurs, l'effet positif de la réduction d'absorption des sols avec des stabilisants chimiques et mécaniques combinés est peut être due à la cimentation des particules du sol en même temps, le remplissage de l'espace de pores dans le sol, et la prévention de la réorientation et floculation des particules du sol qui empêche la formation de pores et les fissures élargies.

Harichane et al. (2012) ont étudié l'effet de l'utilisation de la chaux, pouzzolane naturelle de Bani saf (Algérie) ou une combinaison des deux sur les résistances mécaniques à la compression de deux sols argileux cohésifs. Ils concluent que les sols cohésifs peuvent être stabilisés avec succès par l'action combinée de chaux et de pouzzolane naturelle.

La figure 1.36 montre les résultats pour les deux sols argileux : sol gris et sol rouge. La combinaison des teneurs plus élevées de la chaux (L) avec la pouzzolane naturelle (NP) donne des résistances importantes en fonction du temps de cure. Par exemple, avec la combinaison de 20 % de NP et 8 % L, la résistance à la compression du sol gris est de 5,4 MPa après 90 jours de durcissement qui représente une augmentation de 1,8 fois comparativement à 8 % de chaux seule et 58 fois de plus par rapport au sol non traité.

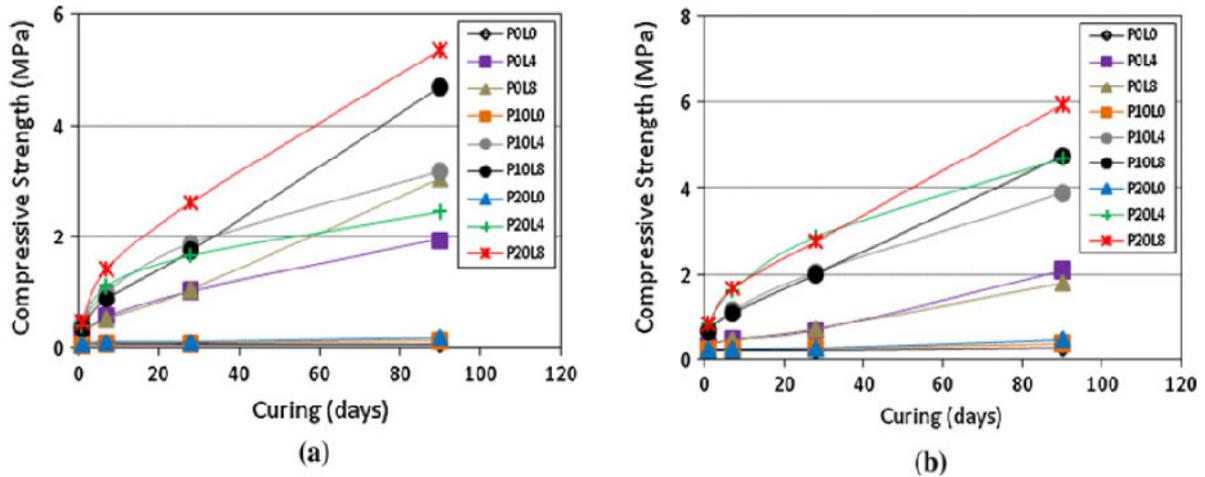


Fig.1 36 : Influence des stabilisants sur la résistance mécanique à la compression : (a) sol gris, (b) sol rouge, (Harichane et al. 2012)

Récemment, Umit et Erol (2014) ont rapporté l'effet de la perlite et la combinaison perlite-chaux sur la durabilité du sol argileux expansif, les résultats ont confirmé que les échantillons stabilisé avec seulement perlite ne pouvaient pas montrer assez de durabilité. Cependant, les échantillons stabilisées avec 8 % de chaux et de plus de 30 % de perlite ont prouvé avoir assez de durabilité (figure 1.37).

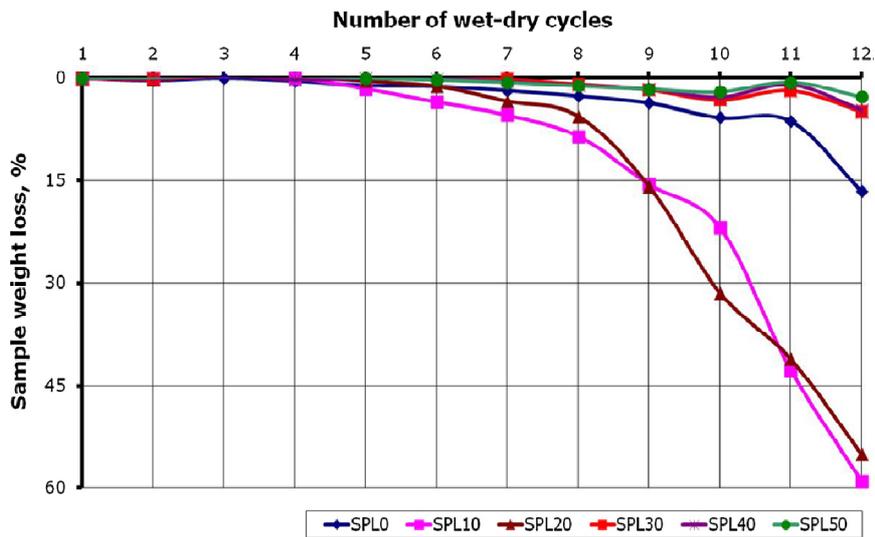


Fig. 1.37 : Influence de la teneur en perlite sur la perte en masse (essai séchage/mouillage) du sol, (Umit et Erol 2014)

1.9.2 Laitier de haut fourneau

L'utilisation du laitier granulé de haut fourneau est bien établie dans de nombreuses applications de ciment où il fournit une durabilité améliorée, y compris une haute résistance à la pénétration des chlorures, résistance aux attaques des sulfates et la protection contre réaction alcali-granulat.

Différents chercheurs ont rapporté sur la formulation des nouveaux matériaux stabilisés en remplaçant la chaux avec les différents pourcentages de laitier de haut fourneau pour stabiliser le sol, avec les avantages de la réduction du gonflement, amélioration des résistances mécaniques et durabilité, la gestion des déchets et conservation des ressources (Wild et al, 1998 et 1999 ; Tasong et al., 1999 ; Puppala et al., 2003, Cedik et al, 2013).

Wild et al. (1998) ont étudié l'effet de laitier granulé de haut fourneau (GGBS) sur la résistance à la compression du sol argileux contenant de sulfate et stabilisé par la chaux. Ils ont constaté que la substitution de la chaux avec le laitier en stabilisant les argiles contenant le gypse, produit des améliorations significatives dans le développement de la résistance (figure 1.38). Selon les auteurs, l'amélioration des résistances à 28 jours étaient due premièrement, pour les teneurs en chaux plus élevée par rapport aux teneurs du laitier en présence de gypse, à la contribution de gypse à long terme (réaction kaolinite-chaux-gypse), deuxièmement pour les faibles teneurs en chaux et teneurs élevées en laitier sans gypse à l'hydratation du laitier activé par la chaux.

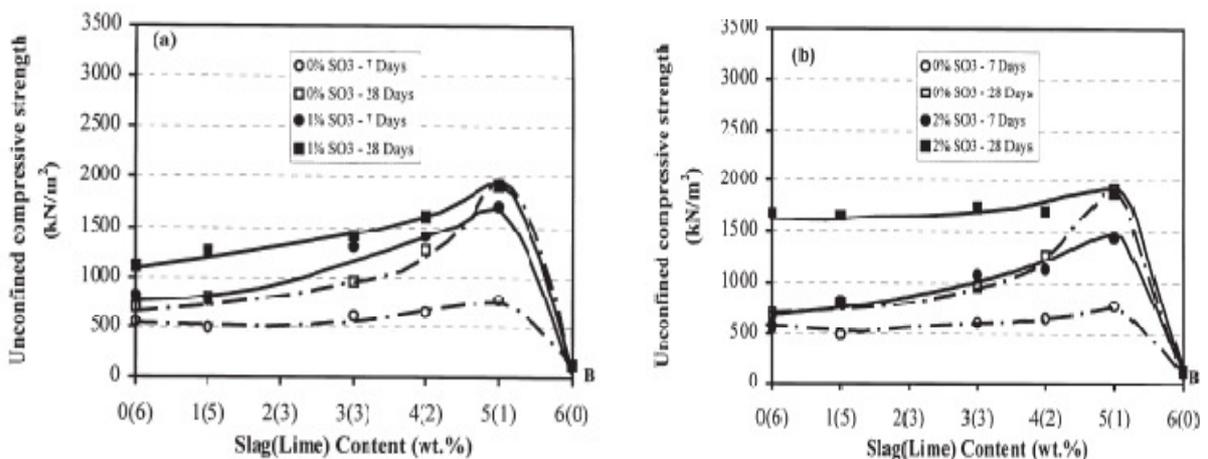


Fig. 1.38 : Evolution de la résistance à la compression simple en fonction de la teneur en laitier et concentration de sulfate (a) : 1% et (b) : 2 % de SO₃, (Wild et al, 1998)

Dans d'autres études de Wild et al. (1999), ils ont indiqué que le remplacement de la chaux avec GGBS produit une réduction significative de la dilatation linéaire des sols argileux stabilisés par la chaux.

Celik et al. (2013), ont étudié l'influence du laitier de haut fourneau sur le retrait et le gonflement d'un sol argileux expansif portant de sulfate. Dans cette étude, ils ont utilisé un sol stabilisé par 5 % de chaux avec 6 % de laitier et contenant trois différentes concentrations de sulfate (2000, 5000 et 10000 ppm) (figure 1.39). Ils ont remarqué que, en présence de l'ajout de 6 % de laitier, le potentiel de gonflement du sol traité à la chaux avec la concentration de 10000 ppm de sulfate diminué de 8 % à 1 %, cependant, que le sol traité à la chaux avec 5000 ppm ne montre pas de gonflement. La valeur de retrait linéaire du sol traité à la chaux avec une concentration de 10 000 ppm de sulfate a diminué de 11% à environ 8 % (figure 1.40).

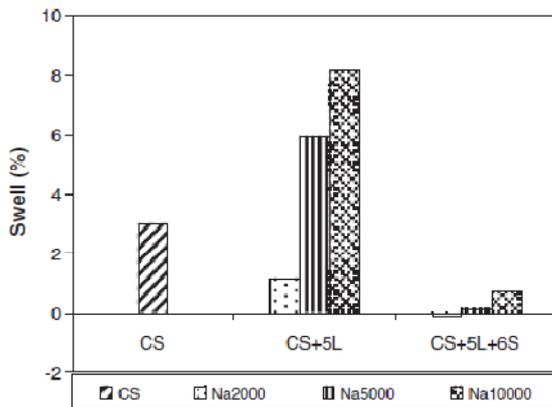


Fig. 1.39 : Gonflement en fonction de la concentration de sulfate (Celik, 2013)

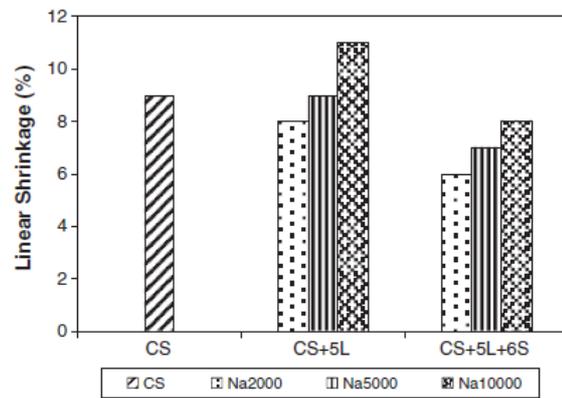


Fig. 1.40 : Retrait linéaire en fonction de la concentration de sulfate (Celik, 2013)

1.10 Effet des ajouts minéraux sur la résistance mécanique et durabilité des BTC

Kerali, (2002) a étudié l'influence de l'incorporation de la fumée de silice dans des blocs de terre comprimée stabilisée avec différentes teneurs en ciments et compactée à 6 MPa. L'auteur montre que la substitution partielle du ciment par la fumée de silice (10 %) de la (10% de la masse du ciment) améliore considérablement la résistance mécanique à la compression à l'état sec et à l'état humide. L'utilisation de cet ajout a aussi pour effet d'augmenter le coefficient de la résistance à l'eau. Le tableau 1.6 représente les valeurs de la résistance mécanique à la compression à 28 jours WCS (humide) et DCS (sèche) des blocs

stabilisé par le ciment (CSSB), blocs stabilisés par le ciment et fumé de silice (MCSB) et le apport (DCS/WCS).

Tableau 1.6 : Les valeurs du coefficient de résistance à l'eau (Kerali, 2002)

Cement content	Mean Compressive Strengths					
%	MPa					
	MCSB			CSSB		
	WCS	DCS	Ratio	WCS	DCS	Ratio
3	3.12	3.94	1.3	1.43	2.70	1.9
5	5.76	7.09	1.2	2.48	4.61	1.9
7	10.11	12.02	1.2	4.57	7.33	1.6
9	14.19	16.18	1.1	6.54	9.66	1.5
11	18.30	20.50	1.1	8.99	12.30	1.3

En plus, Kerali (2002) a conclu d'une manière générale qu'il y avait une diminution de l'absorption totale avec l'augmentation de la teneur en ciment et la contrainte de compactage. La diminution est d'environ 42 % quand le ciment varie de 3 à 11 %. La réduction de l'absorption totale des blocs avec l'augmentation de la teneur en stabilisant est progressive, mais cette réduction n'est pas efficace au-delà de certaines valeurs de la teneur en ciment. Ces limites étaient de 9% pour les blocs sans fumée de silice et 7 % pour les blocs améliorés par la fumée de silice.

Oti, et al. (2009) ont étudié la résistance à la compression sèche des briques de terre comprimée. Les briques sont stabilisées par le laitier de haut fourneau finement broyé activé par deux types de chaux: chaux vive (LG1) et chaux éteinte (LG2), dont ainsi activé par de ciment Portland PG1 et PG2. Les résultats montrent que le LG1 donne des résistances à la compression supérieures aux autres mélanges (figure 1.41). Cependant, les performances du mélange LG2 étaient aussi importantes. Les briques stabilisées par le laitier et le ciment donnaient des résistances inférieures à tous les âges de durcissement. A 90 jours la résistance de tous les mélanges chaux et laitier est plus élevée par rapport aux mélanges ciment et laitier.

La figure 1.42 montre que le taux d'augmentation de la résistance avec l'âge, était observé à un âge précoce (0-28 jours), le taux d'augmentation de la résistance des briques stabilisées par le laitier activé par le ciment (PG1, PG2) est supérieur à celle des briques

stabilisées par le laitier activé par la chaux (LG1 et LG). A l'âge (28 à 90 jours), le taux d'augmentation de la résistance pour PG1 et PG2, et a tendance à être plus faible lorsqu'il est comparé à celui de LG1 et LG2.

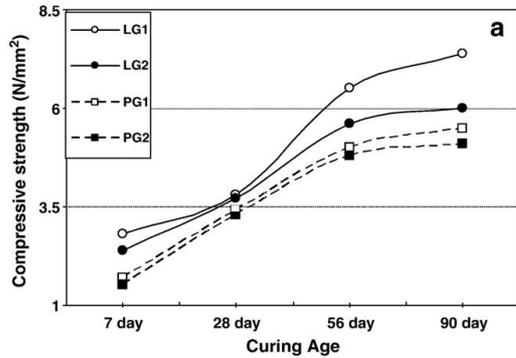


Fig. 1.41 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du temps de cure (Oti et al., 2009)

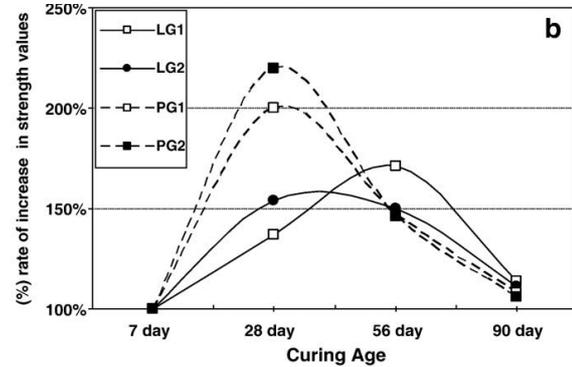


Fig. 1.42 : Le taux d'augmentation de la résistance à la compression relative à 7 jours (Oti et al., 2009)

Dans cette même étude, les pertes en poids (essais gel-dégel) des briques LG1, LG2, PG1 et PG2 sont de 1,2, 1,3, 1,5 et 1,6 %, respectivement, à la fin de septième cycle. Aucune augmentation de la perte de poids n'a été observée à la fin du cycle 100, pour toutes les briques stabilisées. Globalement, la perte de poids la plus élevée à la fin du cycle de gel /dégel était juste de 1,9 %, selon l'auteur ce qui est une bonne performance prise en considération pour stabiliser BTC soumis à 24 heures de cycles répétés de gel -dégel (figure 1.43).

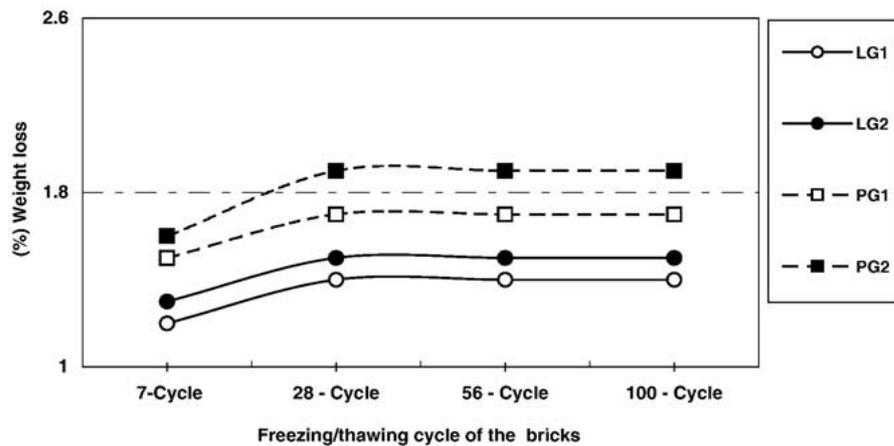


Fig. 1.43 : Perte en masse des briques en fonction des cycles gel/dégel (Oti et al., 2009)

1.11 CONCLUSION

Ce chapitre a tout d'abord passé en revue le contexte général sur la construction en terre. L'ensemble des processus physico-chimiques engendrés par l'ajout de la chaux dans le sol a été présenté. Ensuite, l'effet de la chaux et sa combinaison avec des ajouts minéraux sur les propriétés du sol et sur les performances mécaniques et durabilité des BTC, ont été bien analysées dans les études antérieures. Ces études montrent que les minéraux argileux sont des matériaux pouzzolaniques responsables de l'augmentation de la résistance et de la durabilité des sols stabilisés en chaux. L'ajout de petites quantités de matériaux les plus réactifs avec la chaux pourrait être bénéfique pour l'augmentation de ces performances. Cependant, la cinétique de cette réaction pouzzolanique est très lente à température ambiante, plusieurs mois et années avant que ses effets puissent être appréciés. En effet, la cinétique de ces réactions est influencée par plusieurs paramètres dont la température de durcissement, le dosage et la nature minéralogique de la fraction argileuse et la teneur en eau ajoutée au sol.

D'après les travaux antérieurs, les pouzzolanes naturelles et la poudre de verre présentent une bonne source pour l'effet pouzzolanique. Cependant, il y a un manque d'étude sur l'utilisation de la pouzzolane naturelle et la poudre de verre dans la stabilisation des BTC. En effet, dans le cadre du présent travail, une étude est réalisée pour comprendre l'effet de la pouzzolane naturelle et la poudre de verre sur les propriétés mécaniques et la durabilité des BTC.

DEUXIÈME PARTIE

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

CHAPITRE 2 :

Matériaux et méthodes expérimentales

2.1 Introduction

Le choix des matériaux utilisés dans la confection des briques de terre comprimée exige la connaissance de leurs diverses caractéristiques physiques, chimiques, minéralogiques, physico-chimiques et mécaniques qui peuvent prédire la qualité des BTC en fonction de leur utilisation.

Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu, les caractéristiques des matériaux utilisés, suivies d'une présentation d'ensemble des formulations. En deuxième lieu nous décrivons les différentes méthodes expérimentales utilisées pour les expériences des résistances mécaniques et durabilité des BTC.

2.2 Matériaux utilisés

Lors de ce travail de thèse, nous avons cherché à valoriser trois matériaux d'origine et de nature différente comme ajouts avec la chaux pour stabiliser la BTC : la pouzzolane naturelle, le laitier granulé de haut fourneaux et la poudre de verre.

2.2.1 Sols

2.2.1.1 Origine des sols

Les sols utilisés dans notre recherche trouvent leur appartenance dans la région de Biskra. Les deux sols étudiés sont :

Sol d'El Alia : SOLA et Sol d'El kantara : SOLK

Le principal intérêt dans l'utilisation de deux types de sol est d'évaluer l'influence de la teneur en argile de chaque sol.

2.2.1.2 Caractéristiques physiques des sols

a) Les masses volumiques

Le tableau 2.1 montre les masses volumiques apparente et absolue de deux sols étudiés.

Tableau 2.1 : Les masses volumiques des sols

	<i>Masse absolue γ_s (kg/m³)</i>	<i>Masse volumique apparente ρ (kg/m³)</i>
SOLA	2580	1240
SOLK	2400	1370

b) Granulométrie

Deux essais ont été utilisés pour déterminer la granulométrie des sols : Analyse granulométrique (NF P 18-560) et sédimentométrie (NF P 94-057). Les courbes granulométriques sont présentées sur la figure 2.1.

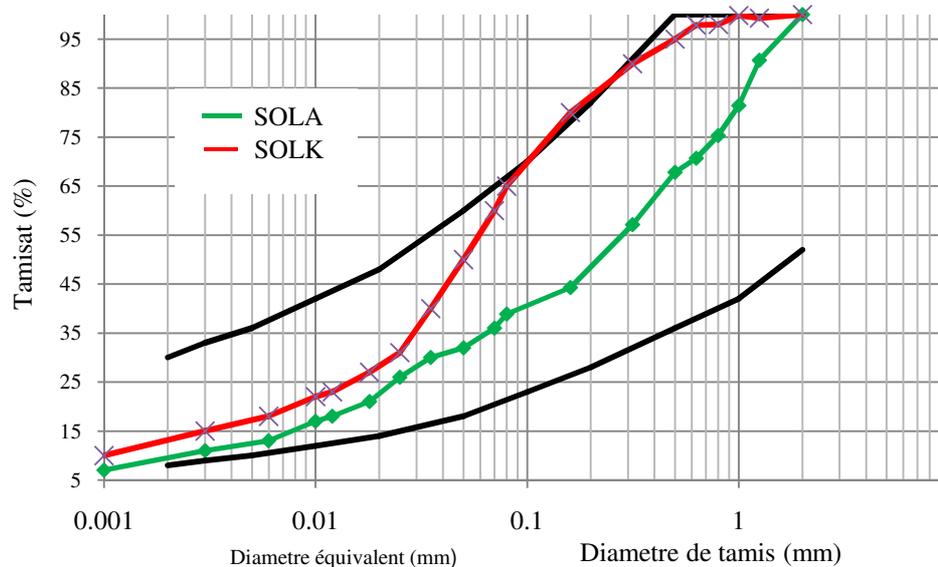


Fig. 2.1 : Granulométrie des deux types de sol

On constate selon la courbe granulométrique des deux types de sols, qu'elle se situe dans le fuseau limite recommandé par la norme des blocs de terre comprimée XP P 13-901.

c) Limite d'Aterberg

Les limites d'Aterberg de deux sols étudiés sont déterminées selon la procédure de la norme NF P 94 051. Les résultats des essais sont présentés sur le tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Limites d'Aterberg des sols

	Limites d'Aterberg, (%)		
	Limite de liquidité W_L	Limite de plasticité W_p	Indice de plasticité IP
SOLK	29	22	7
SOLA	26	21	5

Comme pour la granularité, des études statistiques ont été faites en vue de définir les limites d'Atterberg idéales pour les briques de terre comprimée. On remarque que les deux sols se situent dans la zone limite de liquidité ($25 < W_L < 50$) et dans la zone limite de l'indice de plasticité ($2.5 < IP < 29$) selon la norme XP P 13-901. Le graphique (figure 2.2) permet d'affirmer que les deux sols présentent une plasticité tout à fait adaptée à la production des BTC.

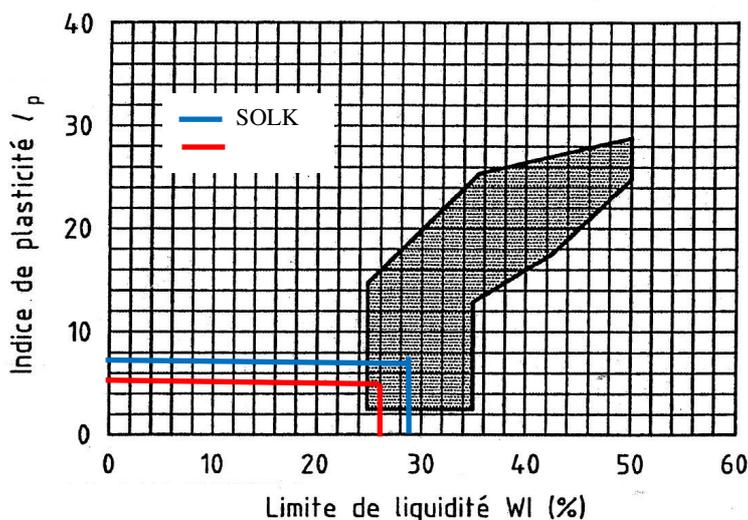


Fig. 2.2 : Diagramme de plasticité (la norme XP P 13-901)

2.2.1.3 Analyse chimique et minéralogique des sols

Les analyses des compositions chimiques et minéralogiques sont effectuées au laboratoire du Centre d'Etudes et de Services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction CETIM à Boumerdès (Algérie).

L'analyse chimique élémentaire effectuée par fluorescence X sur les deux types de sols, est présentée sur le (tableau 2.3).

Tableau 2.3 : Analyse chimique des sols

	Teneur, %										
	SiO ₂	AL ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₃	TiO ₂	Perte au feu
SOLA	20.39	2.34	1.14	0.79	31.29	21.36	0.3	0.21	0.05	0.16	21.98
SOLK	34.33	14.99	02.39	0.88	20.45	06.21	0.50	0.13	0.06	0.21	19.85

L'analyse chimique de deux types de sols a révélé la présence d'un taux important de trioxyde de soufre SO_3 (21.36 % pour le SOLA et 6.21 % pour le SOLK). Ces taux dépassent les limites recommandées pour la stabilisation des sols.

A travers la revue bibliographique, on a constaté que l'influence des argiles sur les propriétés des sols dépend non seulement de leur teneur dans le sol (texture), mais particulièrement de la nature et des quantités des différentes espèces minérales qui les constituent. En effet, les différents minéraux argileux possèdent des propriétés très distinctes et de ce fait, ils affectent différemment le comportement du sol. Il est utile de connaître la nature des différents minéraux qui le constituent (identification), et de connaître les quantités de chaque espèce minérale (quantification) constituant ces argiles.

Dans cette étude l'analyse minéralogique a été effectuée par Diffraction aux rayons X, réalisée sur les échantillons codifiés SOL A (SOLA), et SOL (SOLK). Les diffractogrammes de rayons X de deux sols sont présentés sur les (figures 2.3 et figure 2.4).

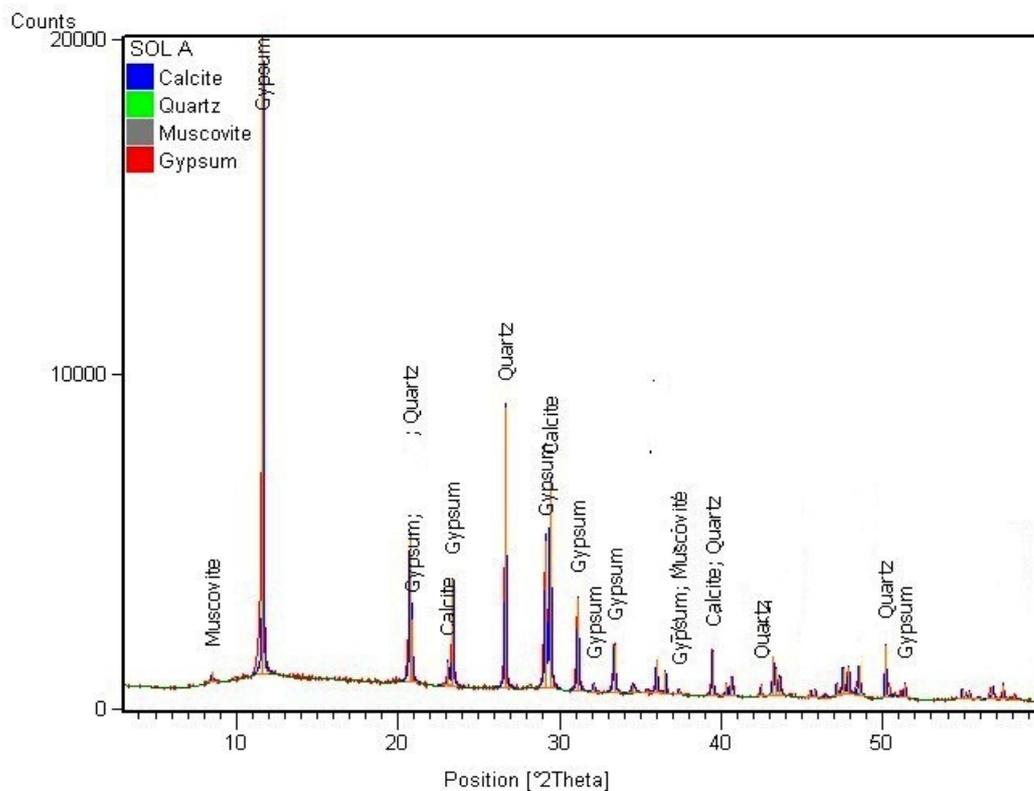


Fig. 2.3 : Le diffractogramme de rayons X de SOLA

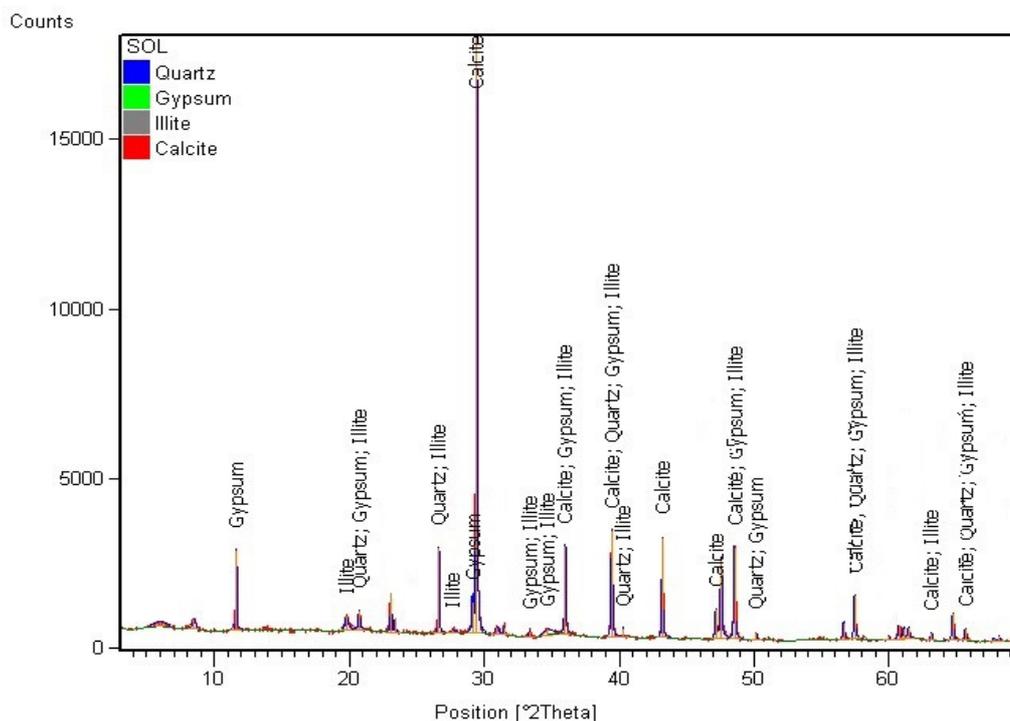


Fig. 2.4 : Le diffractogramme de rayons X de SOLK

La composition minéralogique estimative (semi quantitative) a été évaluée sur la base des résultats chimiques et elle figure sur le tableau 2.4

Tableau 2.4 Analyse minéralogique des sols

<i>Minéraux présents</i>	<i>Compositions</i>	<i>minéralogiques en %</i>
	SOLA	SOLK
Quartz	30.5	35.50
Calcite	20	30
Illite	-	18
Muscovite	2.5	-
Gypsum	46	15.50
Feldspath K	-	-
Minéraux ferrugineux + fond RX	1	1

A travers l'analyse minéralogique, on constate que le SOLA contient un taux important de gypse ce qui explique le taux élevé de trioxyde de soufre contenu dans le SOLA. Il comprend aussi des taux appréciables de calcite (20 %) et de quartz (30.5 %). La partie argileuse est présentée par une teneur faible de muscovite (2.5 %) peu sensible aux phénomènes de gonflement en raison de sa stabilité.

Le SOLK comprend un taux élevé de quartz et de calcite. Le taux de gypse (15.5 %) est presque un tiers du taux de gypse du SOLA. Le taux de l'illite est appréciable (18 %).

2.2.1.4 Matière organique

La méthode par calcination est utilisée pour déterminer la teneur en matière organique (MO). Après séchage de l'échantillon pendant 24 ou 48 heures à 105°C (jusqu'à stabilisation du poids), la MO est brûlée à 550°C et sa teneur est calculée grâce à l'équation suivante :

$$LOI550 = ((DW105 - DW550) / DW105) * 100 \quad (\text{Heiri, 1999}). \quad (2.1)$$

Où LOI550 représente la perte de masse à 550°C (en %), DW105 est le poids sec de l'échantillon avant la combustion et DW550 est le poids de l'échantillon après chauffage à 550°C.

L'analyse des SOLA et SOLK a révélé la présence des taux respectifs de 1.9 et 1.7 % en matières organiques, ces taux ne dépassent pas 2 %, ce qui représente la limite recommandée par (Doat, 1979) et (Vénuat, 1980).

2.2.1.5 Analyse physico-chimique

a) Essai au bleu de méthylène (ANF P 18-592)

L'essai au bleu de méthylène permet d'évaluer la quantité et l'activité de la fraction argileuse contenue dans le sol. L'essai a donc pour objet de mesurer la capacité d'adsorption en bleu de méthylène, qui est la quantité de ce colorant nécessaire pour recouvrir d'une couche monomoléculaire les surfaces externes et internes de toutes les particules argileuses présentes dans 100 g de sol. On appelle cette quantité, *la valeur de bleu*, notée V_B et exprimée en grammes de bleu par 100 g de sol. La valeur V_B est utilisée aussi pour la classification des sols. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2.5

Tableau 2.5 : Valeur du bleu de méthylène

Echantillon	Valeur de bleu de méthylène V_B	Classification des sols
SOLA	1.36	Sablo-limoneux
SOLK	1.8	Sable-argileux peu plastique

b) Mesure de pH

Cette mesure a été déterminée à l'aide d'un pH-mètre sur une suspension de 10 grammes de matériau sec dans 100 millilitres d'eau déminéralisée. La mesure du pH peut fournir de précieux renseignements sur la prédominance de matières organiques évoluées ou carbonates.

L'analyse des résultats à montrer que les deux sols étudiés ont un pH basique. D'après Vilenkina (1956) pour qu'un sol soit convenable à la stabilisation, il doit avoir un pH supérieur à 6. Si le pH est inférieur à 6, un prétraitement du sol est indispensable. En général, les sols dont le pH est grand auront des meilleures résistances.

Tableau 2.6 : Valeurs de pH des sols

<i>Echantillon</i>	<i>pH</i>
SOLA	8.5
SOLK	10.66



Fig. 2.5 : Essai de mesure de pH

2.2.2 Sable concassé

Le sable utilisé dans tous les mélanges des briques est un sable concassé provenant des carrières de la région de Biskra (Algérie). Il a été utilisé essentiellement pour la correction granululaire du sol. Les caractéristiques physiques du sable, déterminées selon les normes AFNOR, sont présentées sur le tableau 2.7. La courbe granulométrique du sable est représentée sur la figure 2.6.

Tableau 2.7 : Caractéristiques physiques du sable

	<i>Masse volumique absolue</i> $\gamma_s(Kg/m^3)$	<i>Masse volumique apparente</i> $\rho(Kg/m^3)$	<i>Equivalent de sable (%)</i>	
			Visuel	Au piston
Sable concassé	2260	1320	63.6	63.17

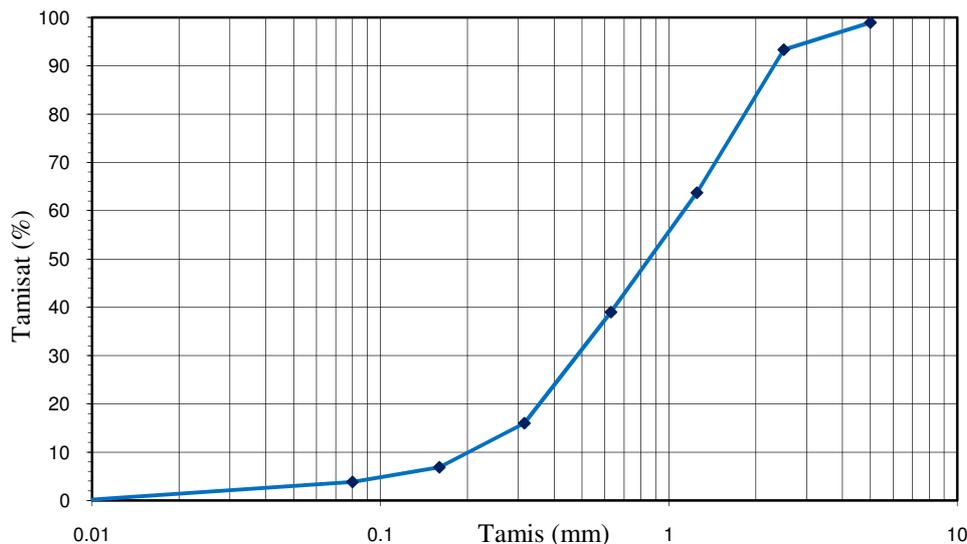


Fig. 2.6 : Analyse granulométrique du sable concassé

2.2.3 La chaux

La chaux utilisée dans cette étude est de la chaux vive (CaO) produite dans la ville de Hassasna, Unité Erco, wilaya de Saida. Ses principales caractéristiques sont présentées dans le tableau 2.8.

Tableau 2.8 : Analyse chimique et caractéristiques physiques de la chaux vive.

Analyse chimique		Caractéristiques physiques		
Oxydes	% massique	Désignation	Unité	Valeurs
CaO	82.77	Masse volumique absolue	Kg/m ³	2230
Al ₂ O ₃	10.63			
Fe ₂ O ₃	3.27			
SiO ₂	1.35			
MgO	1.88	Masse volumique apparente	Kg/m ³	1490
SO ₃	0.11			
K ₂ O	0.15			
Na ₂ O	0.06	Surface spécifique	m ² /Kg	300

2.2.4 Pouzzolane naturelle

Nous avons utilisé une pouzzolane naturelle d'origine volcanique extraite du gisement de Bouhamedi situé au sud de Beni-Saf (Algérie). Essentiellement, cette pouzzolane est formée de scories et de ponce bien stratifiée, dont la couleur varie du rouge au noir.

La roche a été broyée au laboratoire (CETIM) jusqu'à une surface spécifique de $420\text{m}^2/\text{Kg}$ (Figure 2.7). Sa composition chimique et ces caractéristiques physiques sont présentées dans le tableau 2.9.



Fig. 2.7 : Pouzzolane broyé



Fig. 2.8 : Broyeur à boulet

Tableau 2.9 : Analyse chimique et caractéristiques physiques de la pouzzolane.

Analyse chimique		Caractéristiques physiques		
Oxydes	% massique	Désignation	Unité	Valeurs
SiO ₂	46.74	Masse volumique absolue	Kg/m ³	2760
Al ₂ O ₃	09.30			
Fe ₂ O ₃	17.95			
CaO	2.73			
MgO	9.11	Masse volumique apparente	Kg/m ³	1190
SO ₃	0.04			
Cl	-			
K ₂ O	1.19			
Na ₂ O	2.84	Surface spécifique	m ² /Kg	420
P ₂ O ₃	-			
TiO ₂	-			
Perte au feu	5.42			

L'analyse chimique montre que la pouzzolane naturelle est constituée essentiellement de SiO₂, Al₂O₃ et Fe₂O₃ qui sont des composants importants qui affectent l'activité d'une pouzzolane naturelle. La somme de ces éléments donne 74,44%, ce qui est supérieure à 70% recommandé par la norme ASTM C 618-12a (1994).

La figure 2.9 illustre le spectre de la diffraction aux rayons X (DRX) de la pouzzolane naturelle.

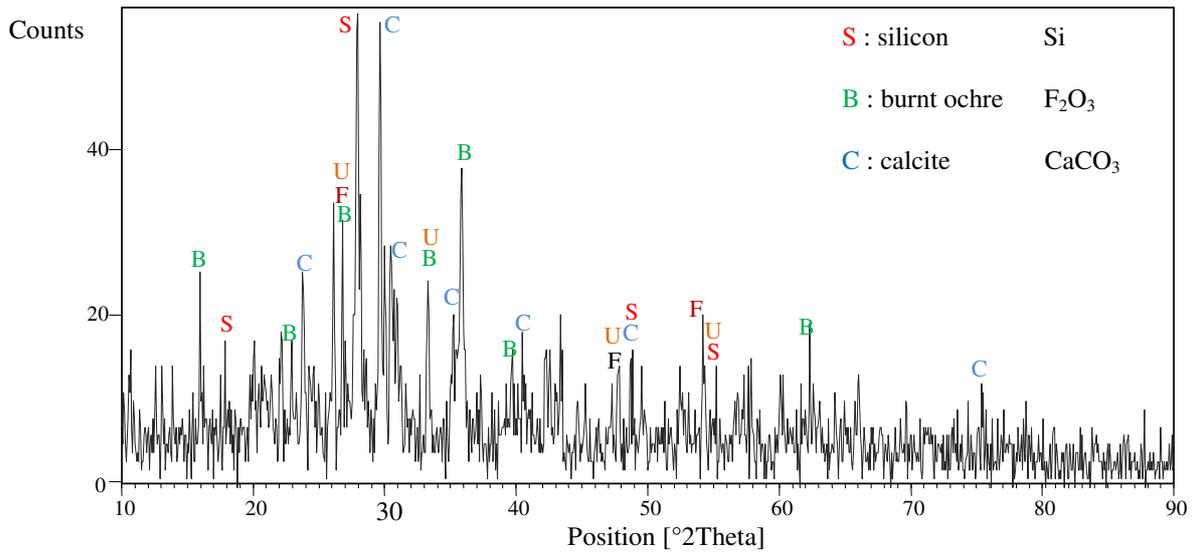


Fig. 2.9 : Spectre de la DRX de la pouzzolane naturelle.

2.2.5 Laitier

Le laitier granulé obtenu par trempe (rapide) est fourni par le haut fourneau d'Elhadjer (Algérie). Il se présente sous forme de sable de granulométrie 0-5 et de couleur gris clair. Ce laitier est broyé au niveau du laboratoire CETIM à Boumerdès (figure 2.10), sa composition chimique et ses caractéristiques physiques sont présentées dans le tableau 2.10.



Fig. 2.10 : Laitier broyé

Tableau 2.10 : Analyse chimique et caractéristiques physiques du laitier.

Analyse chimique		Caractéristiques physiques		
Oxydes	% massique	Désignation	Unité	Valeurs
SiO ₂	40.92	Masse volumique absolue	Kg/m ³	2910
Al ₂ O ₃	10.63			
Fe ₂ O ₃	1.51			
CaO	41.30			
MgO	4.45	Masse volumique apparente	Kg/m ³	1210
SO ₃	0.36			
Cl	0.00			
K ₂ O	1.05			
Na ₂ O	0.19	Surface spécifique de Blaine	m ² /Kg	450
P ₂ O ₃	0.02			
TiO ₂	0.38			
Perte au feu	-0.8			

La figure 2.11 illustre le diffractogramme aux rayons X du laitier granulé. Typique d'un matériau essentiellement vitreux, le laitier granulé présente de faibles quantités de phases cristallisées sous forme de silicium, calcite, Fluorite et burnt ochre.

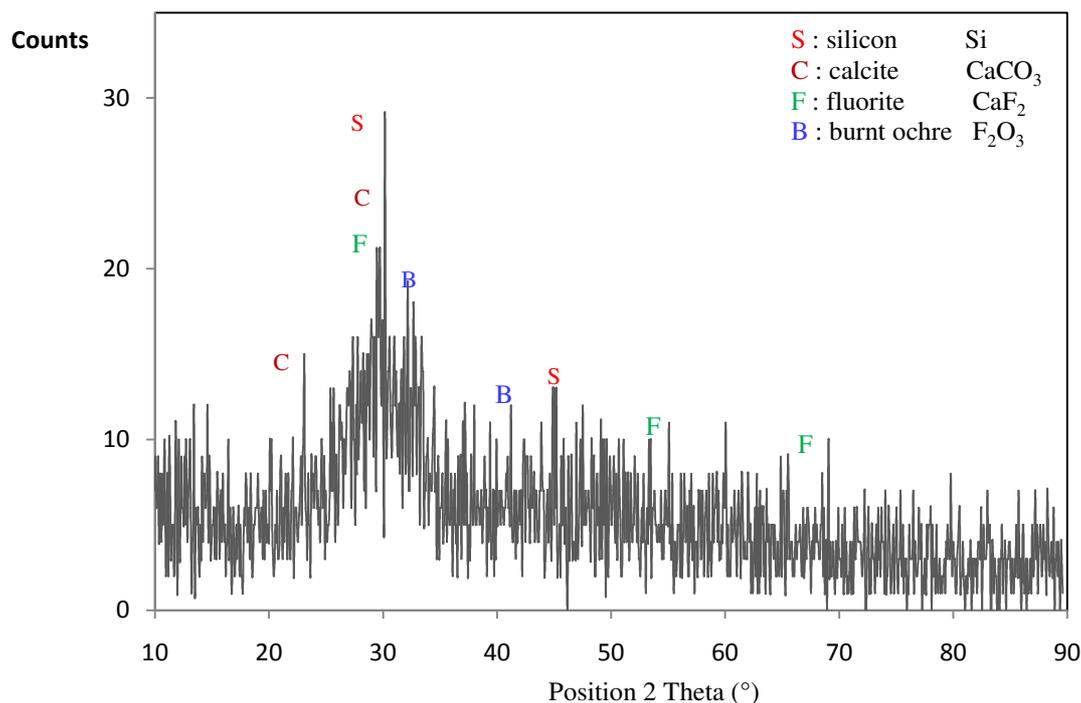


Fig. 2.11 : Spectre de la DRX du Laitier

2.2.6 Poudre de verre

Cette poudre est issue de la récupération des déchets de verre blanc de vitrage. On a choisi cette couleur puisque d'après (Idir, 2009), le verre de couleur blanche est le verre qui possède la plus grande activité pouzzolanique après le verre vert puis le brun.

La poudre de verre utilisée dans ce travail a été broyée au laboratoire (CETIM) à Boumèrdes (Figure 2.12).



Fig. 2.12 : Verre broyé

L'analyse chimique et les caractéristiques physiques du verre sont présentés sur le tableau 2.11

Tableau 2.11 : Analyse chimique et caractéristiques physiques du verre.

Analyse chimique		Caractéristiques physiques		
Oxydes	% massique	Désignation	Unité	Valeurs
SiO ₂	70.47	Masse volumique absolue	Kg/m ³	2460
Al ₂ O ₃	1.52			
Fe ₂ O ₃	0.31			
CaO	10.81			
MgO	2.02	Masse volumique apparente	Kg/m ³	1420
SO ₃	0.16			
Cl	0.02			
K ₂ O	0.42			
Na ₂ O	13.27	Surface spécifique de Blaine	m ² /Kg	400
P ₂ O ₃	-			
TiO ₂	-			
Perte au feu	1.00			

L'analyse chimique montre une teneur importante de silice dans la poudre de verre. La teneur élevée de la silice amorphe dans les ajouts minéraux est responsable de leur réaction

pouzzolanique. La poudre de verre contient une teneur très élevée en alcalis. Mais les études ont bien montré que les expansions dues à la réaction alcali-silice sont bien réduites en présence de la poudre de verre (Zidol, 2014 ; Aladdine, 2009 ; Idir, 2009 ; Shi et al., 2005; Shayan et al., 2004).

Le spectre aux rayons X de la poudre de verre utilisé dans cette étude est présenté sur la figure 2.13. La diffraction par rayon X de la poudre de verre présente un halo de diffusion à $2\theta = 27^\circ$ caractéristique de sa structure amorphe. Outre la fraction vitreuse, le verre présente de faibles quantités de Quartz et d'alumine.

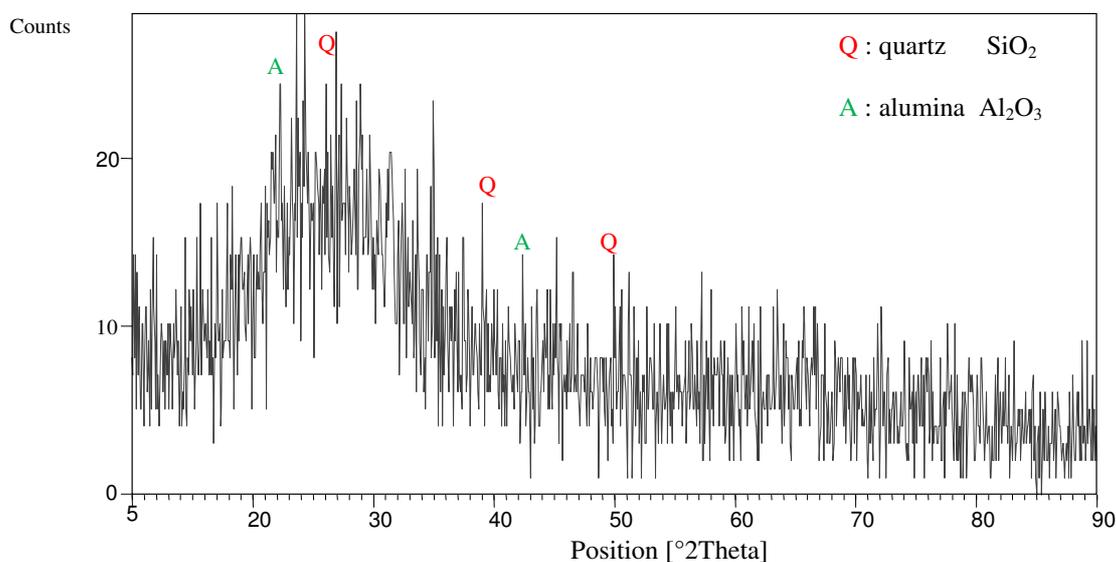


Fig. 2.13 : Spectre de la DRX du verre.

2.2.7 L'eau

L'eau utilisée dans les mélanges est une eau qui contient peu de sulfate et ayant une température de $20 \pm 1^\circ \text{C}$. Sa qualité est conforme aux exigences de la norme NFP 18-404.

2.3 Préparation des briques

2.3.1 Matériels spécifiques

Les éprouvettes prismatiques ($10 \times 10 \times 20 \text{cm}^3$) utilisées pour la détermination des différents essais fixés par notre programme expérimental, ont été confectionnées dans un moule spécialement usiné à cet effet. Le moule est constitué de 5 éléments en acier trempé assemblés par 8 goujons, occupant un volume de $10 \times 10 \times 20 \text{cm}^3$ (Figure 2.14).



Fig. 2.14 : Moule utilisé pour la fabrication des BTC

2.3.2 Compositions des mélanges

Selon les auteurs (Venkatarama, 2002; Jagadish 1988), la teneur en eau optimale pour le BTC ne peut pas être déterminée par l'essai Proctor, puisque l'énergie appliquée lors d'un essai Proctor est différente par rapport à l'énergie appliquée dans le processus de compactage statique utilisé dans la fabrication du BTC. En conséquence, la teneur en eau optimale, pour les mélanges (sols+sable) avec des pourcentages différents de stabilisants, a été déterminée par application de la méthode de compactage statique, proposée par le Centre pour le développement de l'entreprise CDE (CDE, 2000).

Pour la préparation des mélanges, on s'est basé aussi sur l'étude réalisée par Izemmouren et Guettala, 2014) sur les briques de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra et stabilisé par deux types de sable concassé, qui a montré que la teneur du sable augmente les résistances mécaniques. Cependant, pour les essais de la durabilité, la teneur du sable ne présente pas d'écart important par rapport aux briques stabilisées par le sol seul. Cette teneur à une valeur optimale (30%) qui donne les meilleurs résultats.

Le point de fixation de la chaux (PFC), proposé par Hilt et Davidson (1960), est le paramètre permettant d'estimer le dosage en chaux pour la stabilisation des sols. Il correspond au dosage en chaux au-delà duquel on n'observe plus de changement de limite de plasticité. Lorsque le dosage de chaux excède ce seuil, la chaux est adsorbée par les minéraux argileux et devient disponible pour les réactions pouzzolaniques.

Pour déterminer la teneur minimale en chaux ajoutée au SOLA et au SOLK, on utilise l'essai de mesure de pH du mélange de sol-chaux décrit dans la Norme ASTM D6276-99.

Une teneur de SOLA et SOLK est dispersée dans de l'eau déminéralisée puis une teneur variable de chaux est ajoutée. Après 60 minutes d'agitation, le pH de la solution est mesuré. Pour le SOLA, le PFC est situé à 3 % d'ajout de chaux. Cependant, le PFC est situé à 6 % pour le SOLK (figure 2.15). A partir de cette valeur de pH, la chaux additionnelle est supposée être disponible pour le développement des réactions pouzzolaniques. Alors, les dosages en chaux de 6 % ; 8 % ; 10 % sont choisis pour les deux types de sols.

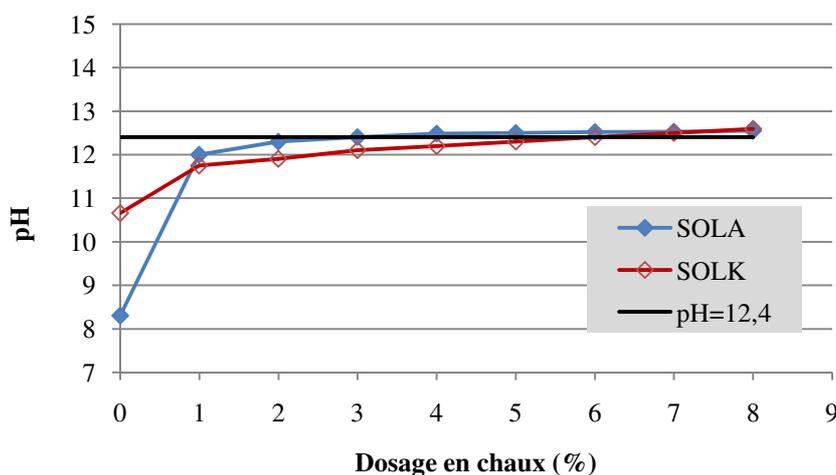


Fig. 2.15 : Détermination du point de fixation de la chaux pour les deux types de sols (SOLA et SOLK)

-Codification des mélanges

La codification de l'ensemble des mélanges étudiés est présentée sur le tableau 2.12

Tableau 2.12 : Codification des mélanges

Code	Désignation
BAX	Brique à base d'un SOLA stabilisé par la chaux
BKX	Brique à base d'un SOLK stabilisé par la chaux
BAXP	Brique à base d'un SOLA stabilisé par la chaux et la pouzzolane naturelle
BKXP	Brique à base d'un SOLK stabilisé par la chaux et la pouzzolane naturelle
BAXL	Brique à base d'un SOLA stabilisé par la chaux et le laitier
BKXL	Brique à base d'un SOLK stabilisé par la chaux et le laitier
BAXV	Brique à base d'un SOLA stabilisé par la chaux et la poudre de verre
BKXV	Brique à base d'un SOLK stabilisé par la chaux et la poudre de verre

La composition des mélanges employés dans cette étude est présentée sur le tableau 2.13

Tableau 2.13 : Composition des mélanges

SOLA (%)	SOLK (%)	Sable concassé (%)	Ajouts minéraux			Liant
			Pouzzolane	Laitier	Verre	Chaux (%)
par rapport au mélange sec (sol-sable)			Par rapport au poids des liants			Par rapport au mélange sec global
Phase 1						
70	70	30	0			6, 8, 10%
			10			
			20			
			30			
			40			
70	70	30		0		6, 8, 10%
				10		
				20		
				30		
				40		
70	70	30			0	6, 8, 10%
					10	
					20	
					30	
					40	
Phase 2						
0	70	30	0			10%
			10			
			20			
			30			
0	70	30		0		10%
				10		
				20		
				30		
0	70	30			0	10%
					10	
					20	
					30	
Phase 3						
0	70	30	0			6, 8, 10%
			10			
			20			
			30			
			40			

2.3.3 Malaxage des mélanges

D'après Michel (1976), les meilleures conditions de malaxage sont réunies lorsqu'on dispose d'un sol sec. Cela nécessite un séchage préalable du sol. Après avoir séché le sol et le sable dans l'étuve pendant 24 h à 63°C, les matériaux (sol+sable +chaux+ ajouts minéraux) sont d'abords mélangés à sec puis malaxés avec l'eau dans un malaxeur à ciment de 5 litres à une vitesse de 139tr/min. L'homogénéisation des mélanges à sec est effectuée pendant cinq minutes. Le malaxage avec l'eau a été effectué pendant deux minutes environ. Le matériau est mis en place et compacté juste après le malaxage.

2.3.4 Optimisation de la teneur en eau

Cet essai permet de déterminer la capacité d'une terre à être compactée sous influence d'une force de compactage variable appliquée directement avec une presse donnée pour la fabrication des BTC.

Le protocole de l'essai est le suivant :

- prendre une quantité de matériau humide avec un taux de liant donné (chaux) à une teneur en eau d'environ $W = 6$ à 9% ;
- fabriquer trois à quatre blocs à l'aide de la presse ;
- mesurer la masse à l'état humide (m_h en g) et les dimensions de chaque brique (longueur L , largeur l et épaisseur h en cm) ;
- calculer la masse volumique sèche de chaque brique :

$$MVS = 100 \cdot m_h / L \cdot l \cdot h \cdot (100 + W) ;$$
- préparer des quantités de matériaux de teneurs en eau d'environ 1 à 2 % de plus que la précédente et répéter les opérations, jusqu'à obtenir des briques trop humides (visuellement) au démoulage ;
- tracer le diagramme des masses volumiques sèches en fonction de la teneur en eau ;
- en observant le diagramme, on détermine la teneur en eau optimale (TEO) correspondant à la masse volumique sèche maximale (MVS_{max}).

La figure 2.16 représente l'optimisation obtenue pour les deux types de sol stabilisé par 10% de chaux pris comme références. Pour le reste des mélanges, on a procédé à un réajustement de la teneur en eau selon le cas étudié.

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 2.14.

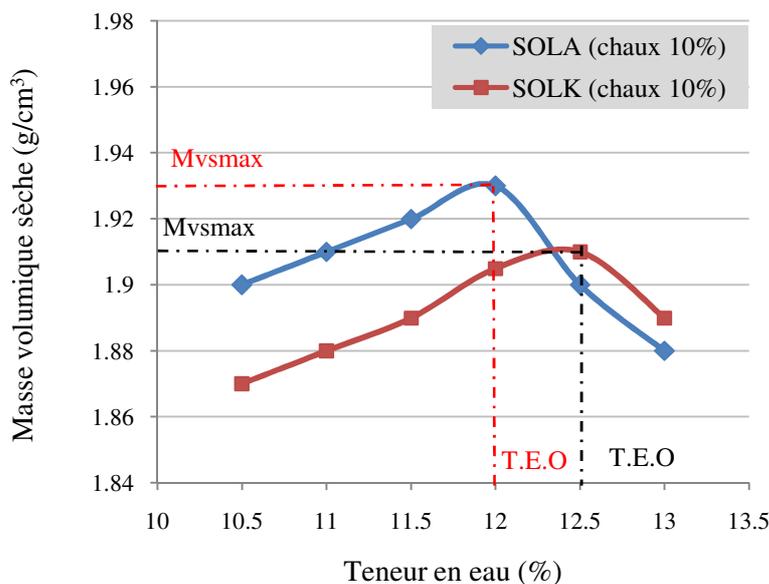


Fig. 2.16 : Optimisation de la teneur en eau

Tableau 2.14 : Optimisation de la teneur en eau

	Liant	T.O.T (%)	MVS MAX (g/cm ³)
SOLA	Chaux (10%)	12	1,93
SOLK		12.5	1,91

2.3.5 Compactage des mélanges

Le compactage des éprouvettes est du type statique à simple effet : le plateau inférieur de la presse se déplace entraînant l'ensemble (moule + mélange + piston), le plateau supérieur reste fixe. L'opération est conduite jusqu'à l'affichage sur l'écran de la lecture de la pression voulue. Dans cette étude on a appliqué deux contraintes de compactages :

10MPa pour la phase 1 et la phase 2.

5 MPa pour la phase 3.

Le démoulage se fait directement après le compactage.

2.4. Mode de cure des briques

La conduite de la cure devra être adaptée d'une part aux conditions hygrométriques et d'autres parts à la nature du sol et du type de stabilisant. Les conditions de séchage et la cure sont déterminées en fonction des valeurs d'évaporation constatées localement durant la

période considérée. Pour étudier l'influence du mode de cure, les briques sont curées par deux modes de cure.

- Cure au laboratoire.
- Cure par vapeur à l'enceinte climatique.

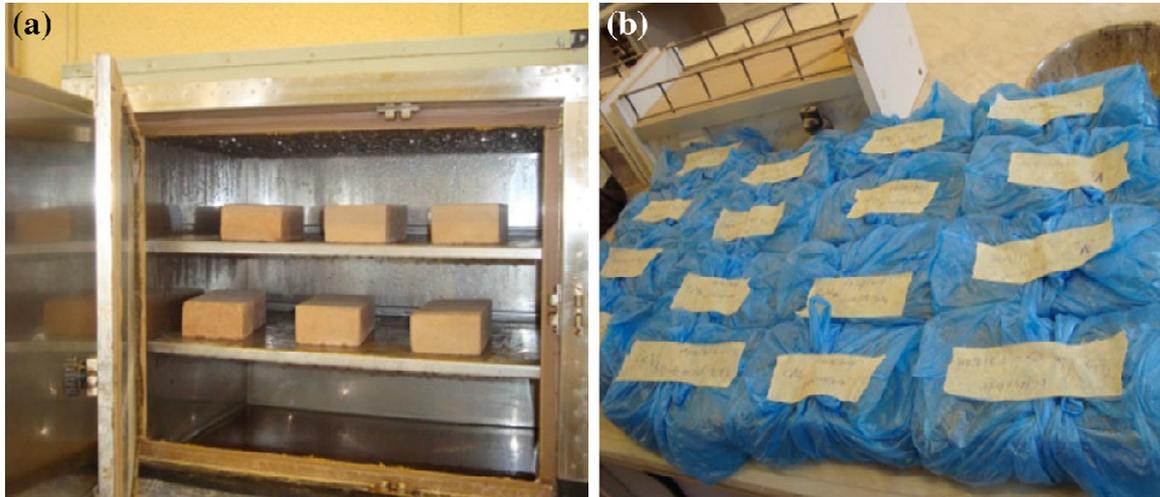


Fig.2.17 : Conditions de cure: (a) cure par vapeur, (b) cure humide

2.4.1 Cure humide

Les briques, ont été conservées dans une atmosphère humide à une température de 22 à 24°C pour favoriser au maximum l'hydratation du liant utilisé. A cet effet, nous avons utilisé le procédé suivant : après confection, les éprouvettes sont couvertes d'un film en plastique pendant 28, 56, 90, 180 et 18 mois (figure 2.17).

2.4.2 Cure par vapeur

Après le démoulage, les BTC conservées dans une température ambiante au laboratoire, en utilisant un film de plastique pendant 24 h, ensuite ont été curées à la vapeur à 75° C sous une pression atmosphérique (figure 2.17) pour la période de temps (6,12, 18, 24 et 30 heures).

2.5 Résistances mécaniques

2.5.1 Résistance à la traction sèche

Cet essai est dérivé de l'essai de traction par fendage (essai Brésilien). Il s'agit de soumettre le bloc après une cure de 28 jours à une compression le long de deux baguettes situées de part et d'autres d'un bloc, ce qui se traduit par une contrainte moyenne de traction

suivant une facette verticale passant entre ces deux baguettes. Cet essai est réalisé selon la procédure de Centre pour le développement de l'entreprise CDE (CDE, 2000) (figure 2.18).



Fig. 2.18 : Essai de traction par fendage

$$R_t = 0.9 \times 10 \frac{2F}{\pi \cdot l \cdot h} \quad (2.1)$$

R_t : Résistance à la traction des blocs en Méga Pascal (MPa).

F : Charge maximale supportée par les deux demi- blocs en KN

l : Largeur du bloc en centimètres (cm).

h : Epaisseur du bloc en centimètres (cm).

2.5.2 Résistance à la compression sèche

Cet essai permet de déterminer la résistance sèche des briques de terre comprimée destinés à la maçonnerie afin d'obtenir des résultats comparatifs indépendants du format de la brique. L'essai est réalisé selon la norme XP P 13-901. Il s'agit de soumettre un échantillon constitué de deux demi-blocs superposés et collés par un joint de mortier de ciment à une compression simple jusqu'à la rupture (figure 2.19).

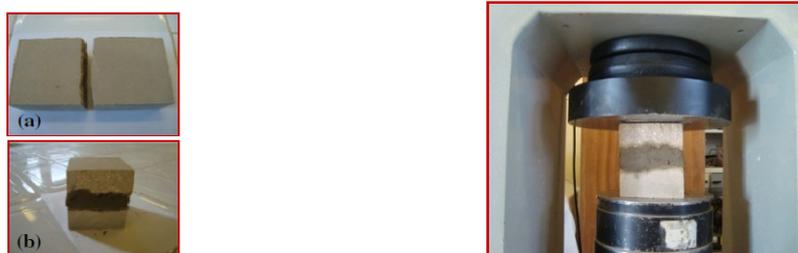


Fig. 2.19. : Cassure des blocs par l'essai de traction (a), Superposition des deux demi-blocs (interposition par un mortier de ciment) (b), Essai d'écrasement de l'éprouvette (c)

La résistance à la compression est donnée par la formule

$$R_c = 10 \times \frac{F}{S} \quad (2.2)$$

Où :

R_c : Résistance à la compression des blocs en (MPa).

F : Charge maximale supportée par les deux demi-blocs (KN).

S : Surface moyenne des faces d'essai en cm².

2.5.3 Résistance à la compression humide

Les constructions sont souvent sujettes d'agressions de l'eau surtout par l'action de la capillarité et de l'aspersion ; par contre elles sont rarement immergées.

Les blocs humides ont des caractéristiques mécaniques (résistance à la traction et à la compression) plus faibles qu'à l'état sec. Il est donc utile de les tester à l'état humide afin de connaître leurs caractéristiques minimales dans le cas le plus défavorable.

Cet essai est identique à l'essai de résistance à la compression sèche, excepté que l'échantillon soit humidifié par immersion complète durant deux heures.

2.6 Essai de la durabilité

2.6.1 Absorption capillaire

L'absorption d'eau par capillarité est mesurée par l'essai détaillé dans la norme expérimentale NF XP 13-901. Le principe est d'immerger partiellement la brique à une profondeur de 5 mm (figure 2.20). Le coefficient d'absorption d'eau **C_b** correspond au taux d'absorption après un temps égal 10 min. Le coefficient C_b d'absorption d'eau est exprimé par la formule suivante:

$$C_b = \frac{100 \times (M_h - M_d)}{S \sqrt{t}} \quad (2.3)$$

Avec:

M_h - M_d : est la masse d'eau, en grammes, absorbée par le bloc durant l'essai ;

S: surface de la face immergée, en centimètres carrés ;

t: est la durée d'immersion du bloc en minutes.

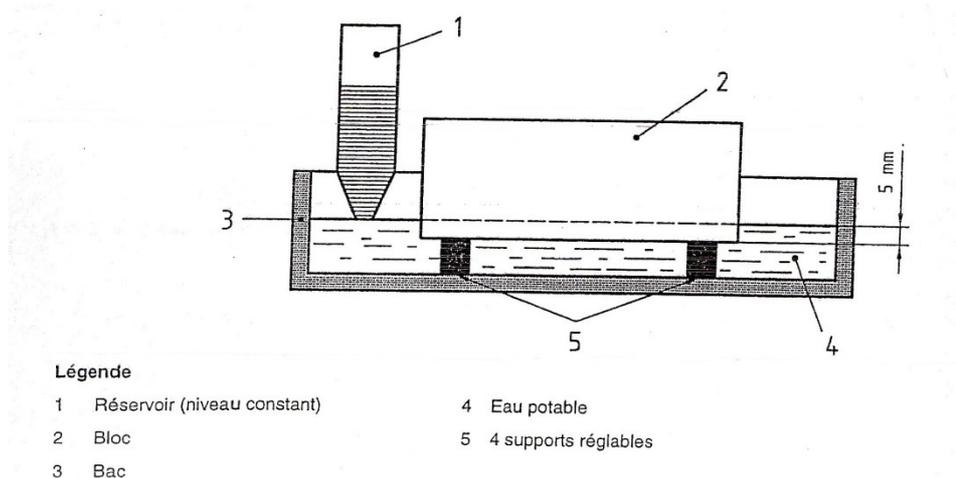


Fig. 2.20 : Principe de l'essai d'absorption capillaire

2.6.2 Absorption totale

Diverses procédures peuvent être utilisées pour déterminer la capacité d'absorption totale de la brique (BS 3921: 1985) :

1. Immersion dans l'eau froide (24 à 48 heures) après séchage au four à masse constante.
2. Essai d'ébullition (5 heures).
3. Absorption sous test à vide.

Avec les méthodes ci-dessus, des résultats très différents peuvent encore être obtenus (Bungey et Millard, 1996). Pour cette étude, nous avons utilisé l'essai par immersion dans l'eau froide et l'essai d'ébullition.

le premier essai consiste à immerger la brique dans un bac à eau pendant 24 h, et mesurer l'augmentation du poids P_h par rapport au poids de la brique à l'état sec P_s . L'absorption totale (TWA) est déterminée par la formule suivante :

$$\text{TWA } \% = \frac{P_h - P_s}{P_s} \quad (2.4)$$

En ce qui concerne l'essai d'ébullition, les briques sèches sont placées dans un bac d'eau à température ambiante. La température de l'eau est portée à ébullition pendant une période de 1 h, maintenues à 100°C pendant 5 h. Les briques laissées refroidir à la température ambiante entre 16 et 19 h. Les briques humides sont ensuite retirées et pesées. L'absorption d'eau est évaluée comme indiquée dans l'équation 2.4.

2.6.3 Résistance à l'abrasion

La résistance à l'abrasion des briques de terre compactée s'effectue suivant la norme expérimentale NF XP 13-901. L'objectif est de soumettre la brique à une friction effectuée à l'aide d'une brosse métallique de largeur 25 mm (figure 2.21). La cadence d'aller retour sur cette face de parement est de 1 aller-retour par seconde pendant une minute soit 60 aller-retour. De cet essai est déduit le coefficient d'abrasion (Ca) de la brique qui représente la perte de matière liée au brossage de la brique sur la surface d'abrasion.

$$Ca (cm^2 / g) = \frac{S}{m_0 - m_1} \quad (2.5)$$

Avec :

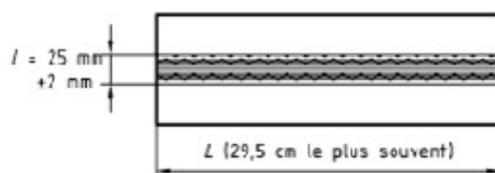


Fig 2 .21 : Calcul de la surface de brossage

Ca = coefficient d'abrasion de la brique, S = Surface d'abrasion de la brique en cm^2 , m_0 = masse initiale de la brique avant abrasion en gramme et m_1 = Masse de la brique après l'essai d'abrasion en gramme. La norme expérimentale indique des coefficients de base permettant de classer une brique de terre crue suivant sa résistance à l'abrasion. Plus le coefficient d'abrasion de la brique est important, meilleure est la résistance de la BTC (tableau 2.15).

Tableau 2.15 : Résistance à l'abrasion des BTC (NF XP 13-901)

Blocs pleins	BTC 20	BTC 40	BTC 60
Coefficient d'abrasion minimal (Ca) cm^2/g	2	5	7

2.6.4 Gonflement

La mesure du gonflement du BTC se fait selon la procédure suivante (norme XP 13- 901) :

- Sceller sur chaque bloc à l'aide d'une résine époxyde deux plots de mesure (figure 2.22a)
- Mesurer la distance entre plots : l_0
- Placer les blocs dans un bac d'eau (figure 2.22 b)

- Après 48 heures d'immersion, laisser égoutter les blocs pendant 10 min, puis mesurer la distance entre plots : l_1 (figure 2.22.c)

- L'amplitude du gonflement de chaque bloc est donnée par la formule suivante :

$$\Delta l_g \text{ (mm/m)} = (l_1 - l_0) / l_0 \quad (2.6)$$

l_0 : la distance avant immersion.

l_1 : la distance après immersion.

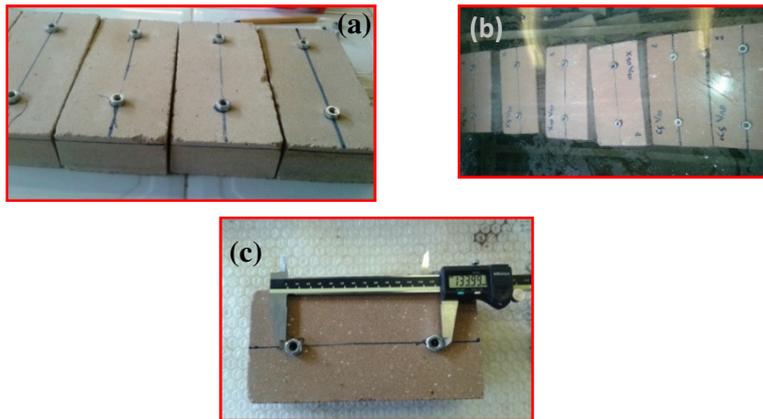


Fig. 2.22 : Etapes de l'essai de gonflement : (a) préparation des plots, (b) immersion dans l'eau, (c) mesure du gonflement

2.6.5 Séchage/ mouillage :

Pour déterminer la tenue et le comportement de brique de terre comprimée lorsqu'elle subit des alternances pluviométriques (saturation en hiver et séchage en été), un ensemble d'essais de mouillage /séchage a été effectué sur les différentes briques étudiés suivant la norme (ASTM D559-57 ,1977) dont le principe de l'essai est le suivant :

- Dessécher les blocs jusqu'à masse constante à une température de 60-75°C.
- Peser chaque bloc (masse sèche) et subir une série de 12 cycles comprenant :
- 05 heures d'immersion au bout desquelles le bloc est pesé (figure 2.22).
- 42 heures de séchage à l'étuve à une température de 75°C (figure 2.23).
- Les briques sont brossées et pesées. Le cycle complet ne doit pas excéder 48heures.

On recommence ce cycle douze (12) fois de suite puis les briques sont séchées à une température de 75°C jusqu'à masse constante. Les résultats de cet essai donnent la perte en masse maximum admise après 12 cycles de mouillage / séchage.

Fitzmaurice (1958), a recommandé des limites sévères pour perte de poids selon la norme ASTM D559. La perte en masse admissible pour les constructions rurales est de :

- 05% pour tout climat dont la pluviométrie annuelle est supérieure à 500mm ;
- 10% pour les climats secs dont la pluviométrie annuelle est inférieure à 500mm.

A noter que ces tests effectués au laboratoire sont généralement plus sévères qu'en réalité (Guettala, 2003).



Fig. 2.23 : Eprouvette séchée dans l'étuve.



Fig. 2.24 : Eprouvette émergée dans l'eau.

Chaque essai est réalisé sur trois éprouvettes de la même composition, et la valeur moyenne des trois essais a été prise comme valeur caractéristique.

2.7 Conclusion

Les résultats de caractérisation présentés dans ce chapitre ont montré que les deux sols satisfont aux critères de stabilisation pour la production des BTC en ce qui concerne la granulométrie, les limites de plasticité et la présence de matière organique. Cependant, les deux sols contiennent un taux important de sulfate.

Les trois ajouts minéraux étudiés sont très différents. D'un point de vue de leur réactivité, ces trois matériaux présentent aussi des potentiels très différents, spécifiques à leur nature minéralogique : la pouzzolane et la poudre de verre auront certainement des propriétés pouzzolaniques alors que le laitier est hydraulique.

Les résultats des différents essais réalisés seront présentés et discutés dans le chapitre suivant (chapitre 3).

CHAPITRE 3 :

Résultats et discussion

3.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré à l'étude des effets d'ajouts minéraux notamment l'effet de la nature et du dosage de l'ajout minéral sur les résistances mécaniques et la durabilité des BTC. A cet effet, le programme expérimental de cette étude se répartit en trois phases. La première phase porte sur une étude abordant l'influence du dosage de la pouzzolane, la poudre de verre et le laitier sur les résistances mécaniques des BTC à base de deux sols, possédant des caractéristiques physico-chimiques et géotechniques différentes. Les briques ont été stabilisées par trois teneurs en chaux (6, 8, 10 %) et curées au laboratoire pendant 28 jours à température ambiante.

La seconde phase sert à comprendre l'effet du temps de cure sur les résistances mécaniques et la durabilité des BTC à base du SOLK. Dans cette phase les BTC sont stabilisées par 10 % de chaux et différents dosages en pouzzolane, poudre de verre et laitier. Les BTC sont compactées à une contrainte de compactage de 10 MPa et curées dans le laboratoire aux différents âges.

La troisième phase traite de l'influence des conditions de cure sur les résistances mécaniques et la durabilité des BTC à base du SOLK. Elles sont stabilisées par la chaux et la pouzzolane. En utilisant deux modes de conservation pour les BTC : 1 - mode cure par vapeur à 75°C et de 100 % d'humidité (enceinte climatique) 2 - mode de cure en atmosphère humide où les briques sont couvertes par un film plastique et curées jusqu'à 28 jours et à 18 mois. Les différentes phases de l'étude sont structurées comme présentées sur la figure 3.1, qui indique les différents paramètres considérés dans cette étude, ainsi que les essais effectués sur les BTC.

3.2 Effet du dosage d'ajout minéral sur les résistances mécaniques

Afin d'étudier l'effet de la nature et du dosage des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques des BTC à base de deux sols (SOLA et SOLK), quatre dosages différents d'ajouts (10, 20, 30 et 40 %) ont été utilisés. Les briques ont été compactées avec une contrainte de compactage de 10MPa et conservées au laboratoire à température ambiante jusqu'à 28 jours.

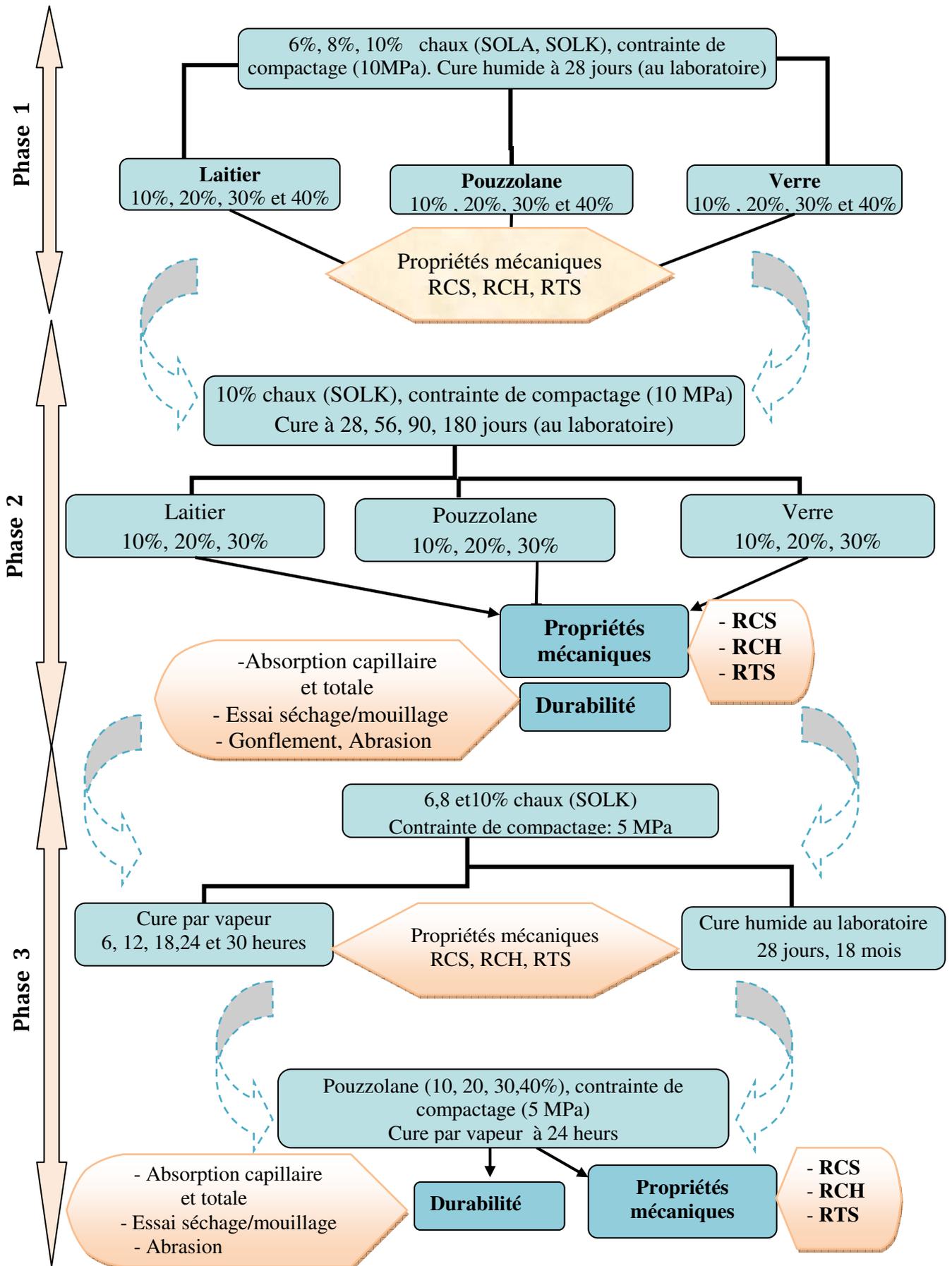


Fig. 3.1 : Programme expérimental.

3.2.1 Pouzzolane naturelle

Les minéraux argileux sont des matériaux pouzzolaniques responsables d'augmentation de la résistance des sols stabilisés en chaux. L'ajout de petites quantités des matériaux les plus réactifs pourrait être bénéfique pour l'augmentation de la résistance mécanique des briques stabilisées en chaux. Les pouzzolanes naturelles présentent une bonne source pour l'effet pouzzolanique (Venkataram, 2002).

3.2.1.1 Résistance à la compression sèche

Premièrement, On va discuter de l'effet de la chaux à travers les résultats de la variation de la résistance à la compression sèche (RCS) en fonction du dosage en chaux pour les deux sols qui sont présentés sur la figure 3.2.

D'après, ces résultats, on remarque qu'il y a une légère augmentation de la résistance à la compression sèche en fonction de la teneur en chaux pour les BAX et BKX. En effet, à l'âge de 28 jours et à la température ambiante, il y a formation de la portlandite et formation en très faibles quantités, des phases de type silicates et aluminates de calcium hydratés qui assurent les liens entre les particules et renforcent les performances mécaniques des BAX et BKX. Ces constats ont été observés par les auteurs Bell (1996), Maubec (2010).

Le traitement des BTC à un dosage en chaux plus élevé que le point de fixation de la chaux augmente la résistance à la compression sèche pour les BAX et BKX. Par conséquent, et en terme de pourcentage, l'augmentation de la teneur en chaux de 6 % à 10 % a conduit à une augmentation de la résistance de l'ordre de 16.17 % pour les BAX, alors que cette augmentation est de l'ordre de 18,05 % pour les BKX. Ces résultats sont également en accord avec ceux de (Lasledj, 2008), qui a démontré qu'un dosage de chaux plus élevé que le point de fixation de la chaux, augmente la surface d'interaction chaux-argiles et la consommation en chaux.

Les résistances à la compression sèche des BKX sont légèrement supérieures au RCS des BAX. Cette différence est due à l'influence de la quantité d'argile qui existe dans chaque sol. D'après la revue bibliographique (chapitre 1), la chaux réagit avec les minéraux argileux pour former de nouveaux minéraux par la réaction pouzzolanique; plus le taux d'argile dans le sol est élevé plus ces réactions sont importantes. Selon l'analyse minéralogique de deux sols

étudiés, le taux d'argile dans le SOLA (muscovite = 2.5 %) est inférieur au taux d'argile dans le SOLK (illite =18 %).

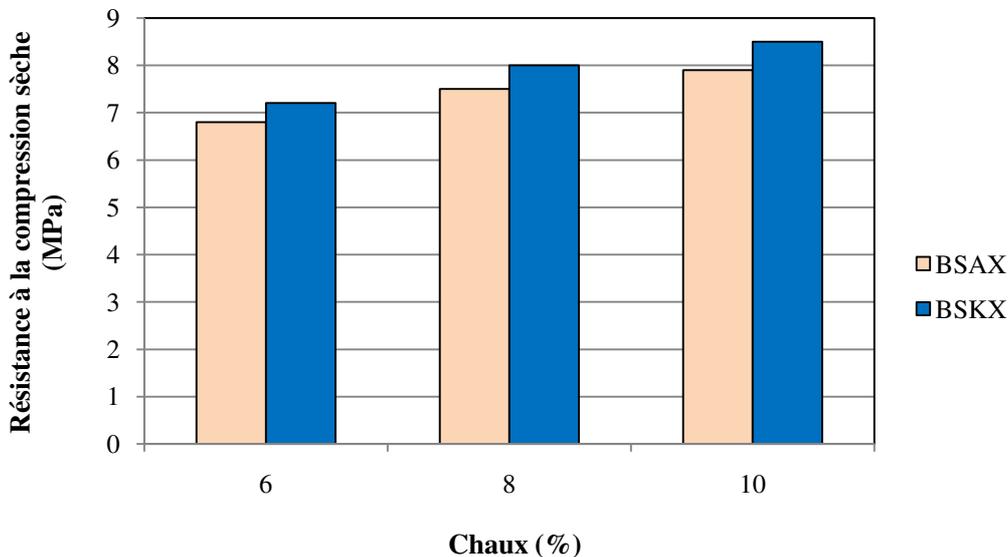
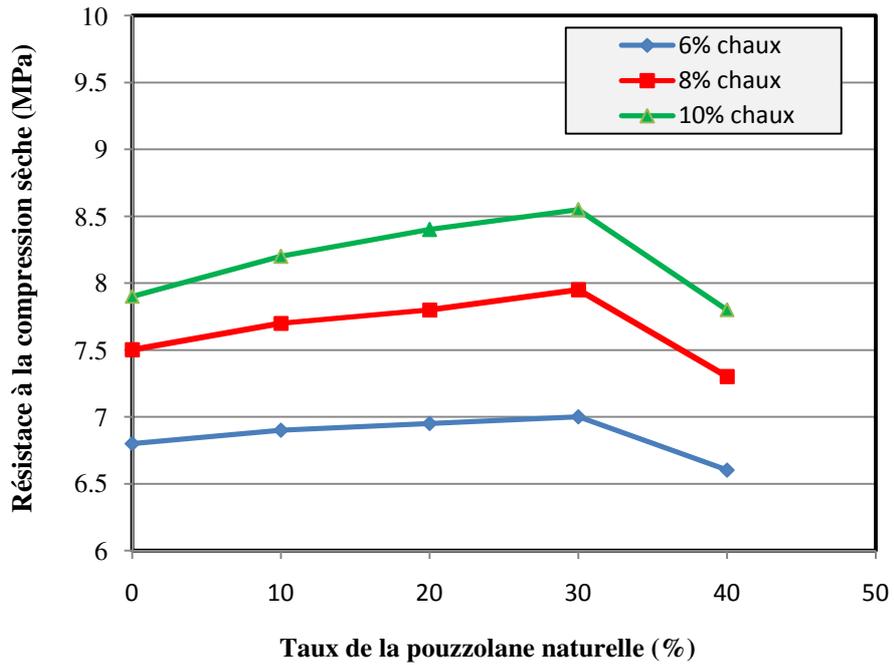
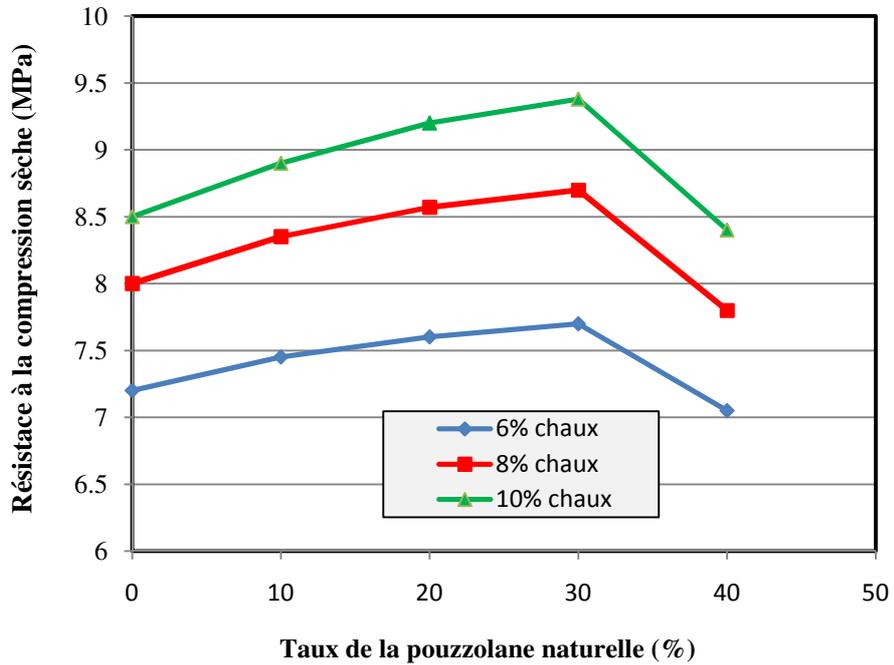


Fig. 3.2 : Résistance à la compression sèche du BTC à base de chaux sans ajout en fonction du dosage en chaux.

L'effet de la variation du dosage en pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression sèche du BAXP et BKXP est présenté sur la figure 3.3. D'après cette figure, la RCS augmente avec l'augmentation du dosage en NP jusqu'à 30 %, au-delà de cette valeur il y a une chute de résistance pour différents dosages en chaux. L'augmentation de la RCS des BAXP est de l'ordre de 2.94 % (pour 6 % de chaux), 6 % (pour 8 % de chaux) et 8.22 % (pour 10 % de chaux) dans la gamme de 0 à 30 % de NP, pour la même gamme de NP, l'augmentation de la RCS des BKXP pour 6 %, 8 % et 10 % est de l'ordre, respectivement, de : 6.94 %, 8.75 % et 10.35 %. Cette légère évolution est due à la durée modérée de cure (28 jours) et à la température ambiante qui sont les conditions d'une réaction pouzzolanique lente de la pouzzolane naturelle. En revanche, pour une gamme de 30 à 40 % NP, il y a une chute de la RCS pour les deux types de sols et pour les différents dosages en chaux. Dans ce cas, la NP n'aura pas suffisamment de la chaux pour la réaction pouzzolanique et donc, elle restera comme une charge inerte sans contribuer beaucoup au gain de résistance (Venkataram, 2002). Les RCS des BKXP sont légèrement supérieures aux RCS des BAXP, par exemple la valeur de RCS pour 10 % de chaux et 30 % de NP est de 8.55 MPa et 9.38 MPa respectivement pour les BAXP et BKXP.



a- BAXP



b- BKXP

Fig. 3.3 : Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression sèche des BAXP et BKXP pour différents dosages en chaux.

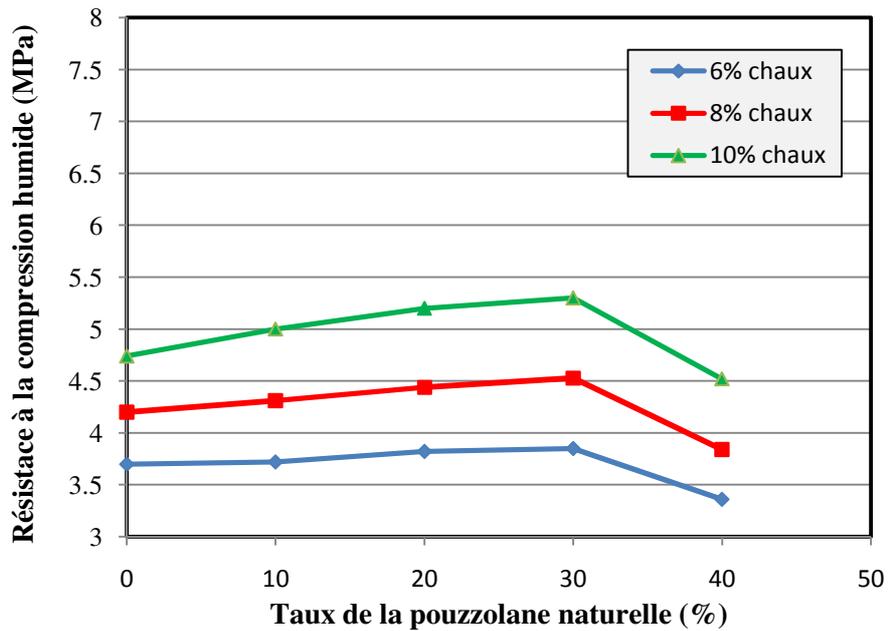
3.2.1.2 Résistance à la compression humide

Les briques de terre comprimée humides ont des caractéristiques (résistance à la compression), plus faible qu'à l'état sec, il est donc utile de les tester à l'état humide afin de connaître leurs caractéristiques minimales dans le cas le plus défavorable. La figure 3.4 illustre la variation de la résistance à la compression humide (RCH) en fonction du dosage en pouzzolane naturelle. L'interprétation des résultats obtenus obéit aux mêmes critères d'évaluations cités auparavant (essai à la compression sèche). La RCH augmente avec l'augmentation de la teneur en chaux des briques sans ajout. Les valeurs de la RCH des BAX s'étalent entre 3.7 à 4.74 MPa pour les BAX et de 4,2 à 5.69 MPa pour les BKX. Ces valeurs sont inférieures aux valeurs obtenues dans le cas de la résistance à la compression sèche. On remarque aussi que les RCH des BKX sont supérieures aux RCH des BAX, puisque le taux de gypse dans le SOLA est plus important que le taux de gypse dans le SOLK, qui conduit à l'instabilité des BAX vis-à-vis de l'eau.

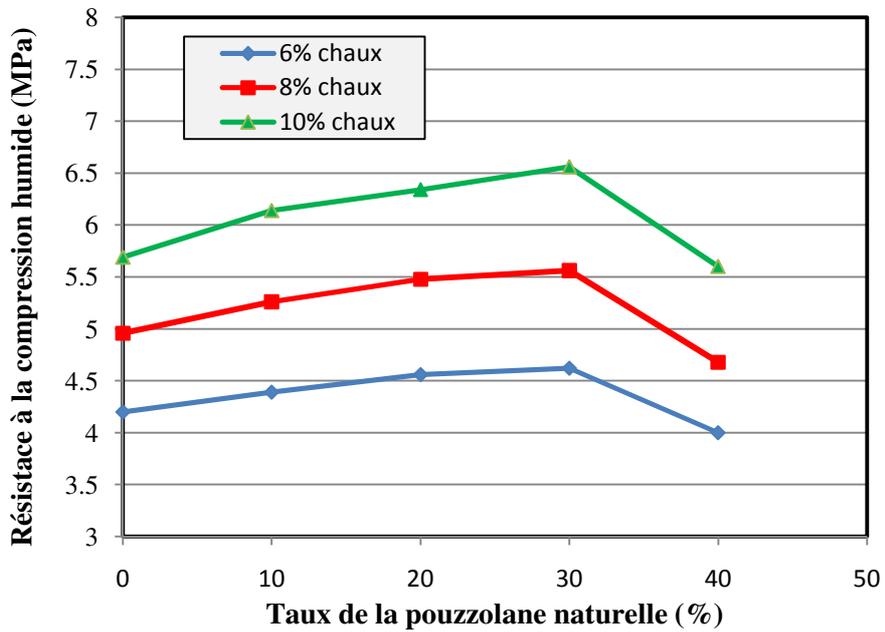
Pour l'effet de l'addition de NP au mélange, la figure 3.4 montre que dans l'ensemble des cas étudiés, comparativement aux BAX et BKX, il y a une légère augmentation de la RCH des BAXP avec l'augmentation de la teneur en NP de 10 à 30 % pour les dosages de 6, 8 et 10 % en chaux respectivement, qui est de l'ordre de 4.05, 7.85 et 11.81 % et pour une même teneur en NP. Cette augmentation pour les BKXP est de l'ordre de 10, 12.09 et 15.28 % pour les teneurs en chaux de 6, 8 et 10 % respectivement. On remarque que cette légère évolution de RCH des BAXP et BKXP est due principalement à la réaction pouzzolanique (réaction assez lente à la température ambiante) et au temps de cure qui est modéré (28 jours).

Comme le cas de la RCS, la résistance à la compression humide est diminuée pour 40 % de NP. Les valeurs de RCH des BAXP sont inférieures aux valeurs de RCH des BKXP. Ceci s'explique par le taux d'argile dans les BAXP qui est inférieur au taux d'argile dans les BKXP.

On remarque que la valeur de RCH pour l'ensemble des BTC testées est supérieure à la valeur minimale recommandée, qui est entre 1.2 MPa et 2.8 MPa (Houben et Guillaud, 1994).



a- BAXP

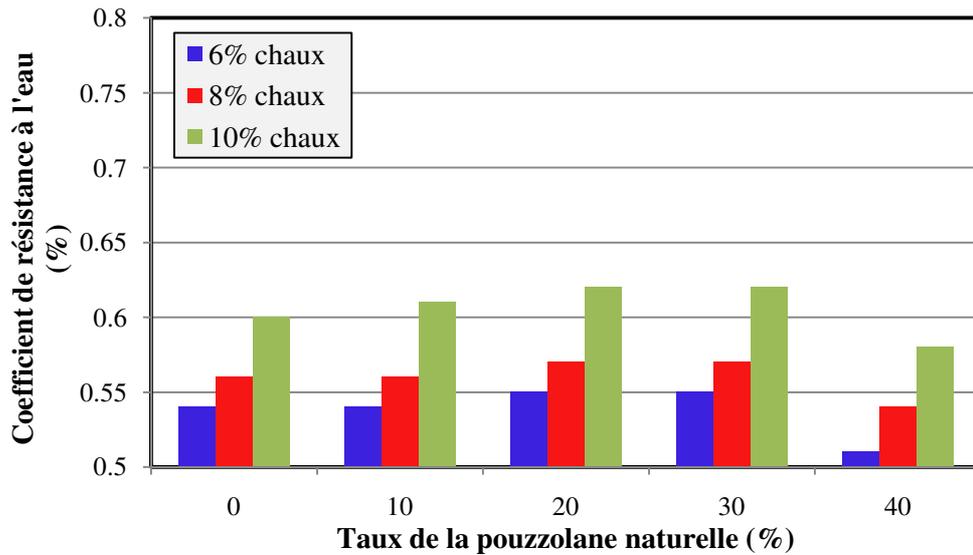


b- BKXP

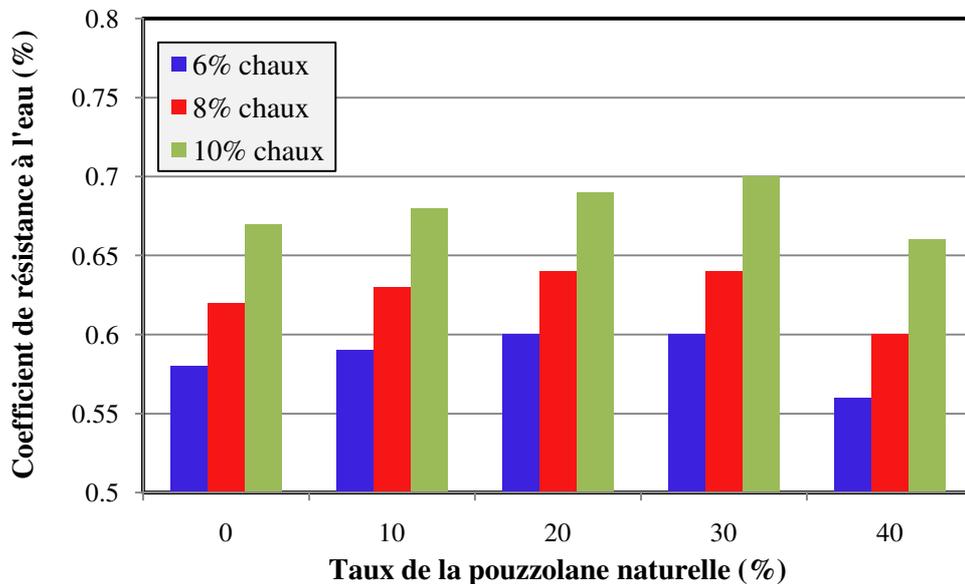
Fig. 3.4 : Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression humide des BAXP et BKXP pour différents dosages en chaux.

3.2.1.3 Coefficient de résistance à l'eau

Le coefficient de résistance à l'eau (CR), considéré comme indicateur de la durabilité, est caractérisé par la stabilité à l'eau. Il est défini comme étant le rapport de la résistance à la compression d'un matériau à l'état humide et de la résistance à la compression du matériau à l'état sec (RCH/RCS). La figure 3.5 illustre la variation du coefficient de résistance à l'eau en fonction du dosage de NP pour les deux sols (SOLA, SOLK).



b- BAXP



b- BKXP

Fig. 3.5 : Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur le coefficient de résistance à l'eau des BAXP et BKXP pour différents dosages en chaux.

On peut constater qu'il y a une augmentation de CR des briques sans ajout (BAX et BKX) avec l'augmentation de la teneur en chaux. Cette évolution de CR des BAX, par rapport à 6 % de chaux, est de l'ordre de 3.7 % pour (8% de chaux), 11.11 % pour (10 % de chaux). Cette légère augmentation s'explique par le taux important de gypse dans le SOLA. En effet, Les minéraux de sulfure s'oxydent et réagissent avec d'autres minéraux contenus dans le sol pour former des sulfates. Cette transformation induit une augmentation du volume en raison des variations dans la structure atomique en plus d'adjonction d'eau à la structure minérale. Cependant, l'évolution de CR des BKX par rapport à 6 % est de l'ordre de 6.89 % pour (8% de chaux) et 15.51 % pour (10 % de chaux). Ces résultats sont supérieurs par rapport au CR des BSAX (voir le tableau 3.1, et le tableau 3.2), puisque le taux de gypse dans le SOLK est inférieur aux taux de gypse dans le SOLA. En ce qui concerne l'introduction de NP, on remarque qu'il y a une faible augmentation du CR des BAXP et BKXP avec l'augmentation de la teneur en NP de 0 à 30% pour les différentes teneurs en chaux. Ces constats sont expliqués par la lenteur des réactions pouzzolaniques de NP avec la chaux. Le CR diminue à un dosage 40 % de NP pour les deux types de sol.

Tableau 3.1 : Coefficient de résistance à l'eau pour les BAXP

Teneur en NP(%)	Contrainte moyenne en compression (MPa)								
	BAXP6			BAXP8			BAXP10		
	RCH	RCS	CR	RCH	RCS	CR	RCH	RCS	CR
0	3,7	6,8	0.54	4,2	7,5	0.56	4.74	7,9	0.60
10	3.72	6.9	0.54	4,31	7,7	0.56	5	8,2	0.61
20	3,82	6.95	0.55	4,44	7,8	0.57	5,2	8,4	0.62
30	3,85	7	0.55	4,53	7,95	0.57	5,3	8,55	0.62
40	3.36	6.6	0.51	3.84	7.3	0.54	4.52	7.8	0.58

Tenant compte des recommandations prescrites pour les coefficients de résistance à l'eau CR > 0.5 (Houben et all, 1996), les résultats expérimentaux obtenus ici pour les briques BAXP et BKXP tombent tout à fait en conformité avec cette limite.

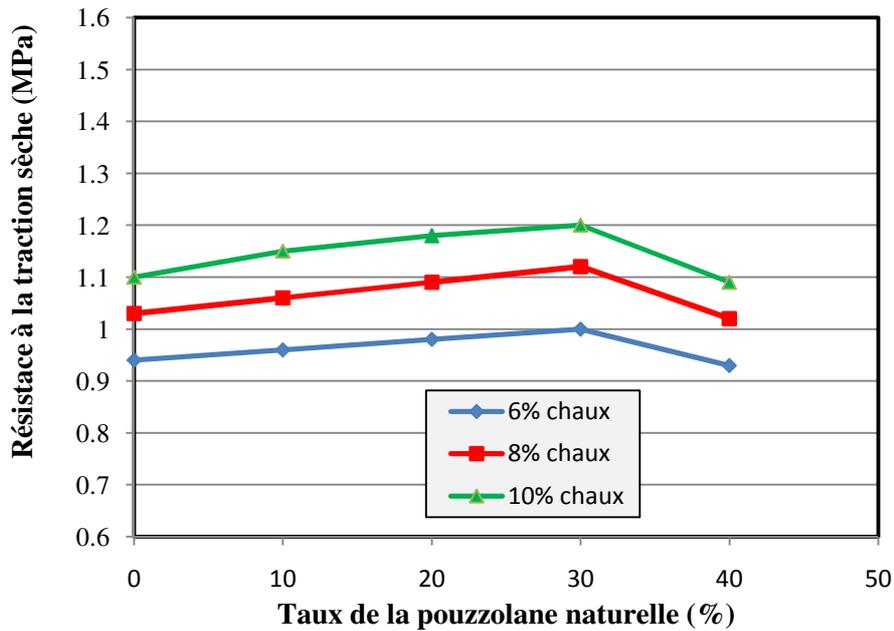
Tableau 3.2 : Coefficient de résistance à l'eau pour les BKXP

Teneur en NP (%)	Contrainte moyenne en compression (MPa)								
	BKXP6			BKXP8			BKXP10		
	RCH	RCS	CR	RCH	RCS	CR	RCH	RCS	CR
0	4.2	7,2	0.58	4.96	8	0.62	5.69	8,5	0.67
10	4.4	7,45	0.59	5.26	8.35	0.63	6.14	8,9	0.68
20	4.56	7,6	0.6	5.48	8.57	0.64	6.34	9.2	0.69
30	4.62	7,7	0.6	5.56	8.7	0.64	6.56	9,38	0.7
40	4	7.1	0.56	4.9	8.6	0.57	5.6	8,4	0.66

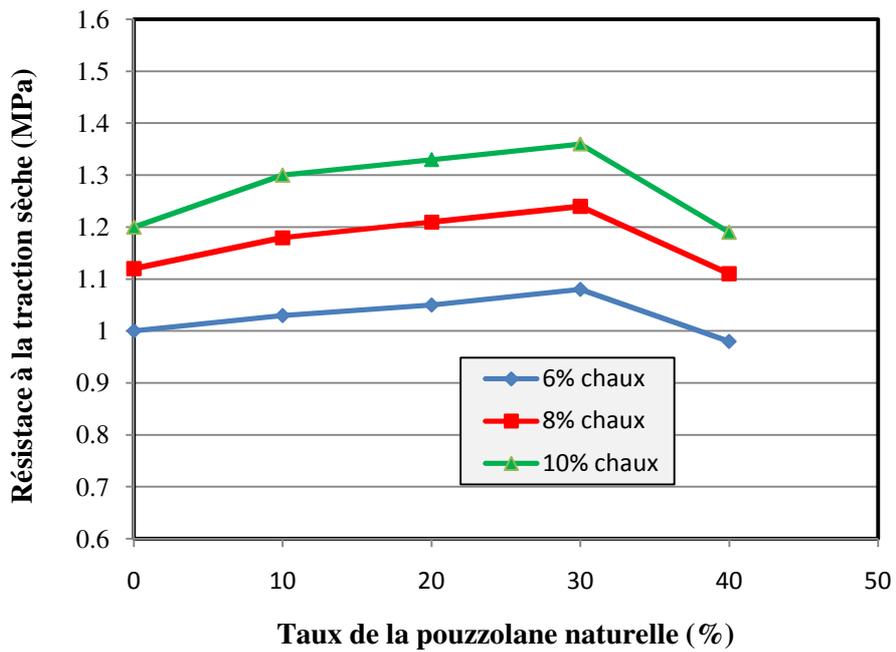
3.2.1.4 La résistance à la traction sèche

Les constructions en terre sont aussi sollicitées en traction et en cisaillement dans le cas de vent important, de séisme et de tassement différentiel dans les fondations. La figure 3.6 représente l'influence du taux de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la traction sèche (RTS). A partir des résultats obtenus, on peut constater que la résistance à la traction sèche évolue en fonction de la teneur en chaux pour les deux types de sol. L'analyse des valeurs montre que les échantillons utilisés donnent des meilleures résistances à la traction pour les BAX et BKX stabilisées par 10 % de chaux, et atteignent des valeurs respectives de 1.1 MPa et 1.2 MPa.

La résistance à la traction sèche augmente avec l'augmentation de la teneur en NP. En effet, l'augmentation de la RTS des BAXP est de l'ordre de 6.38 % (pour 6% de chaux), 8.73 % (pour 8 % de chaux) et 9.9 % (pour 10 % de chaux) dans la gamme de 0 à 30 % NP. Pour une même gamme de NP l'augmentation de la RTS des BKXP pour 6 % 8 % et 10 % est de l'ordre respectivement : de 8 %, 10.71 % et 13.33 %. A l'âge de 28 jours et à la température ambiante, les réactions de la pouzzolane avec la chaux sont lentes. Comme dans le cas de la RCS et RCH, la résistance à la traction sèche diminue pour 40 % de NP.



a- BAXP



b- BKXP

Fig. 3.6 : Influence du taux de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la traction sèche des BAXP et BKXP pour différents dosages en chaux.

3.2.2 Poudre de verre

La poudre de verre est un ajout minéral de couleur blanche. Elle est obtenue après le broyage des fragments de verre blanc de vitrages. Sa haute teneur en silice lui donne des propriétés pouzzolaniques en se combinant avec la chaux pour produire des nouveaux hydrates. Ses effets sur les résistances mécaniques des BTC sont exposés dans les paragraphes suivants.

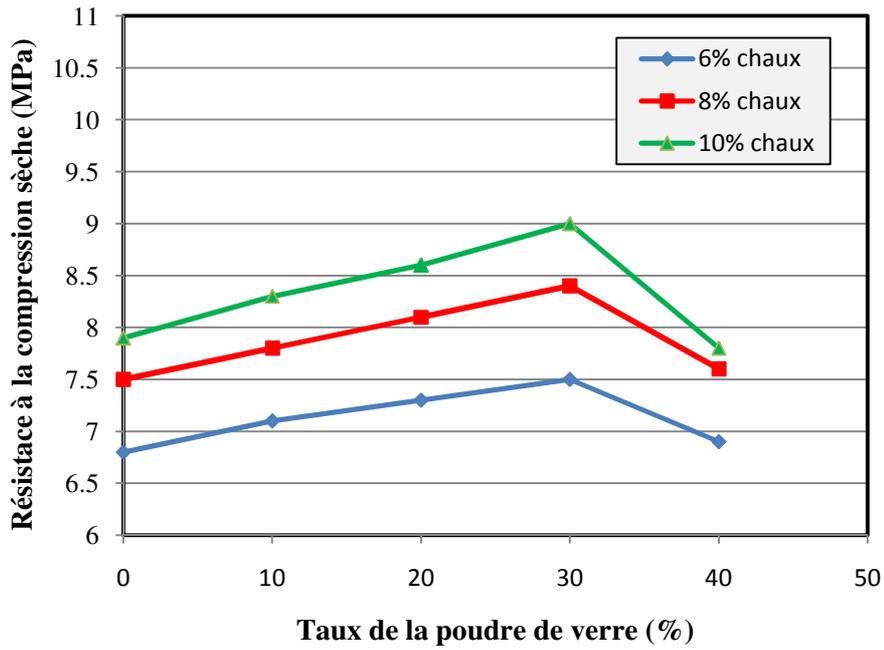
3.2.2.1 Résistance mécanique à la compression sèche

Pour l'effet du dosage en poudre de verre sur les RCS, la figure 3.7 montre que la résistance des BAXV et BKXV augmente en fonction de l'augmentation du dosage en PV jusqu'à 30%, cette valeur donnera la meilleure résistance pour les différents dosages en chaux. Cette augmentation est supérieure aux briques sans ajout en poudre de verre.

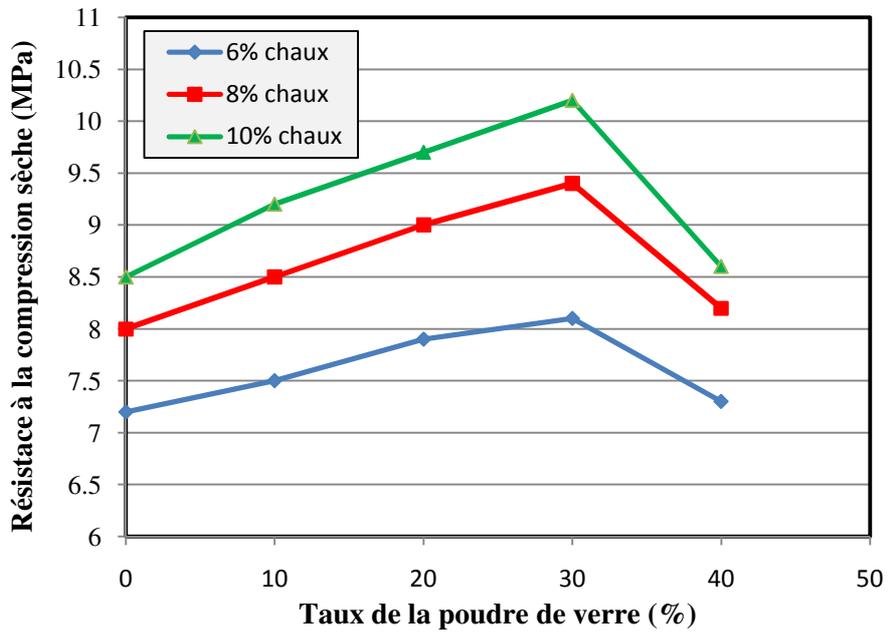
L'augmentation de la RCS des BAXV est de l'ordre de 10.29 % (pour 6 % de chaux), 12 % (pour 8 % de chaux) et 15.18% (pour 10 % de chaux) dans la gamme de 0 à 30 % NP, Pour la même gamme de PV, l'augmentation de la RCS des BKXV pour 6, 8 et 10 % est de l'ordre respectivement : de 12.5 % , 14.63 % et 20 %. Ces résultats montrent que la poudre de verre accélère le développement des résistances mécaniques à 28 jours, en raison de la présence d'alcalins (Na_2O) en quantités importantes (Idir, 2009 ; Shi et al. 2005). Par contre, pour une gamme de 30 à 40 % NP, il y a une chute de RCS pour les deux types de sols et pour les différents dosages en chaux. Dans ce cas la PV n'aura pas suffisamment de la chaux pour la réaction pouzzolanique (Shi et al. 2005).

3.2.2.2 La résistance à la compression Humide

La figure 3.8 illustre la variation de la résistance à la compression humide en fonction du taux de poudre de verre, et montre que la résistance des BAXV et BKXV augmente en fonction du dosage en PV jusqu'à 30 %, et cette valeur donnera la meilleure résistance pour les différents teneurs en chaux. Par conséquent, et en terme de pourcentage, cette évolution de RCH pour les BAXV est de l'ordre de 13.51 % (pour 6% de chaux), 17.85% (pour 8 % de chaux) et 18.81 % (pour 10 % de chaux) dans la gamme de 0 à 30 % de PV, pour une même gamme de PV l'augmentation de la RCH des BKXV pour 6 %, 8 % et 10 % est de l'ordre respectivement de : 21.14 %, 28.51 % et 32.51 %. Les valeurs de la RCH des BKXV sont supérieures par rapport aux valeurs de la RCH des BAXV. La valeur maximale de la RCH atteignant 7.54 MPa, est obtenue par la BKXV stabilisée par (10% de chaux+30% de PV).

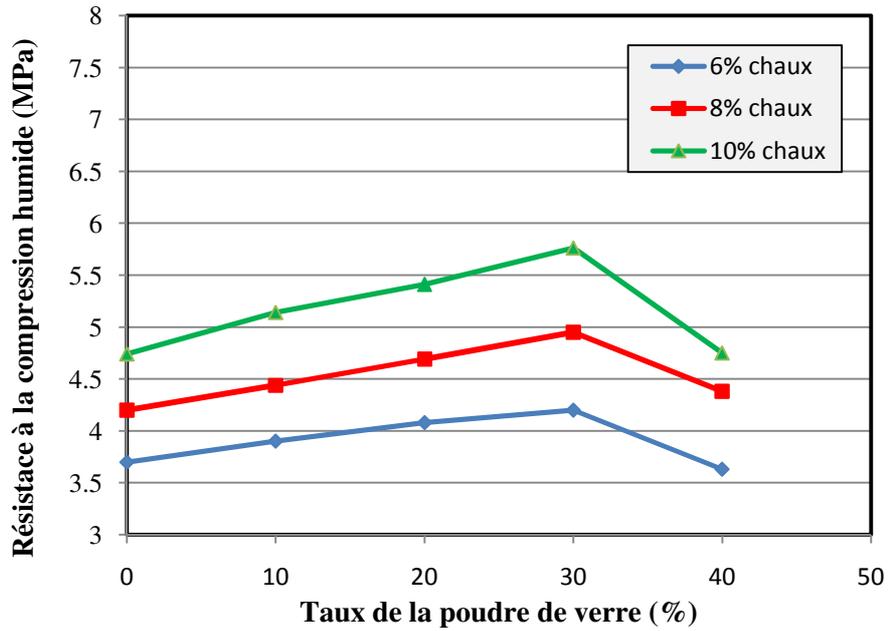


a- BAXV

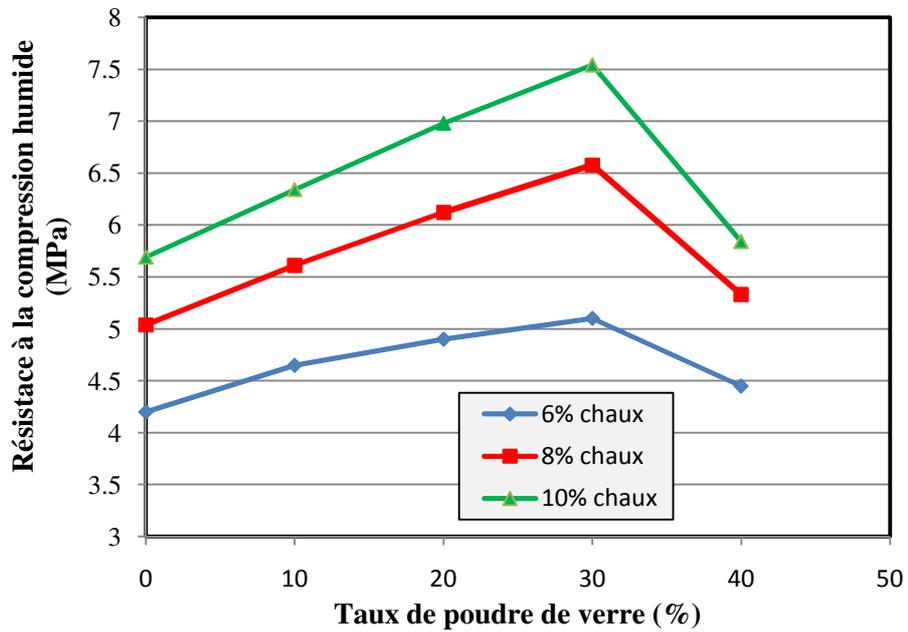


b- BKXV

Fig. 3.7 : Influence du taux de la poudre de verre sur la résistance à la compression sèche des BAXV et BKXV pour différents dosages en chaux.



a- BAXV



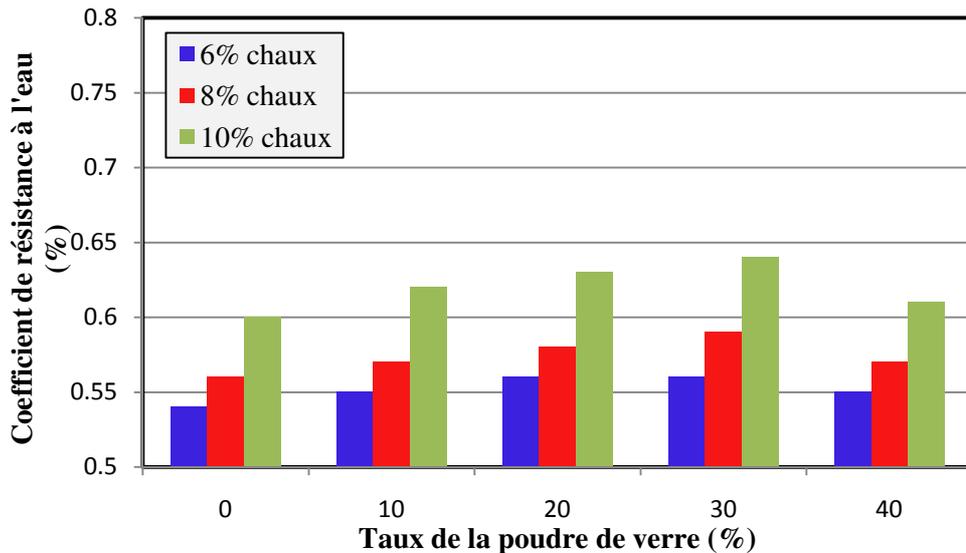
b- BKXV

Fig. 3.8 : Influence du taux de la poudre de verre sur la résistance à la compression humide des BAXV et BKXV pour différents dosages en chaux.

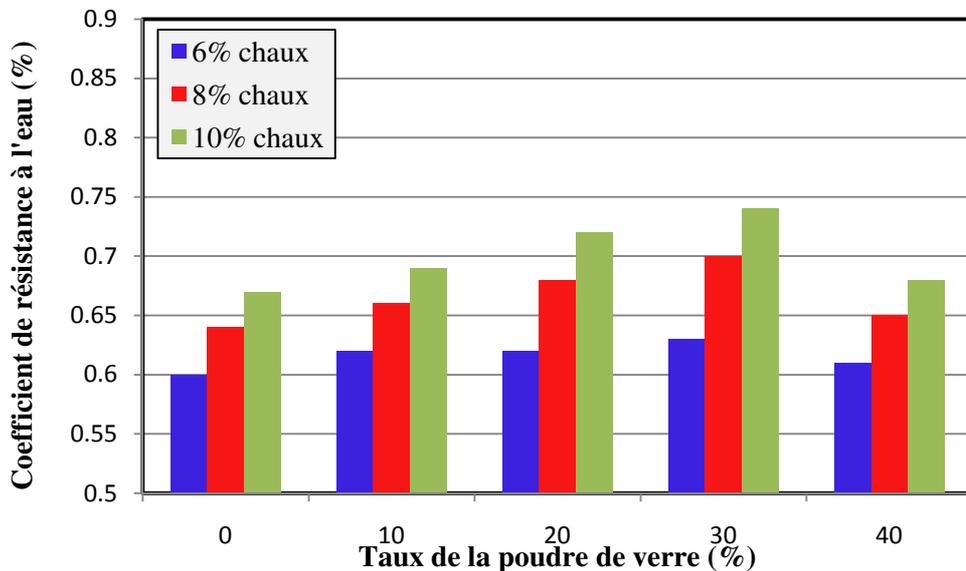
Toutes les valeurs de RCH pour l'ensemble des BTC testées sont supérieures à la valeur minimale recommandée, qui est entre 1.2 MPa et 2.8 MPA (Houben et Guillaud, 1994).

3.2.1.3 Coefficient de résistance à l'eau

La figure 3.9 illustre la variation du coefficient de résistance à l'eau en fonction du taux de poudre de verre pour les deux types de sol (SOLA, SOLK).



a- BAXV



b- BKXV

Fig. 3.9 : Influence du taux de la poudre de verre sur le coefficient de résistance à l'eau des BAXV et BKXV pour différents dosages en chaux.

Le CR augmente avec l'augmentation du dosage en PV jusqu'à 30%, au-delà de cette valeur il y a une chute de RC pour différentes teneurs en chaux. L'augmentation du CR des BAXP est de l'ordre de 3.7 % (pour 6% de chaux), 5.35 % (pour 8 % de chaux) et 6.66 % (pour 10 % de chaux) dans la gamme de 0 à 30% PV, pour une même gamme de PV, l'augmentation du CR des BKXV pour 6 %, 8 % et 10 % est de l'ordre respectivement : de 5 %, 9.37 % et 10.44 %. La valeur de CR pour BKX stabilisée par 10 % de chaux est de 0.67, alors que l'ajout de 30 % de PV augmente ce coefficient de résistance à l'eau à 0.74 voir (tableau 3.3).

Cette augmentation est justifiée par le taux important de Na₂O compris dans la PV qui accélère les réactions pouzzolaniques produites lors de la réaction de la chaux avec les minéraux de sol et la poudre de verre avec la chaux.

On constate que l'ensemble des valeurs de CR est supérieur à la valeur de 0.5, valeur limite recommandée par ((Houben et al, 1996).

Tableau 3.3 Coefficient de résistance à l'eau pour les BAXV

Teneur en PV (%)	Contrainte moyenne en compression (MPa)								
	BAXV6			BAXV8			BAXV10		
	RCH	RCS	CR	RCH	RCS	CR	RCH	RCS	CR
0	3,7	6,8	0.54	4.2	7,5	0.56	4.74	7,9	0.60
10	3.90	7.1	0.55	4.44	7.8	0.57	5.14	8.3	0.62
20	4.08	7.3	0.56	4.69	8.1	0.58	5.41	8.6	0.63
30	4.20	7.5	0.56	4.95	8.4	0.59	5.63	9	0.64
40	3.63	6.6	0.55	4.38	7.7	0.57	4.75	7.8	0.61

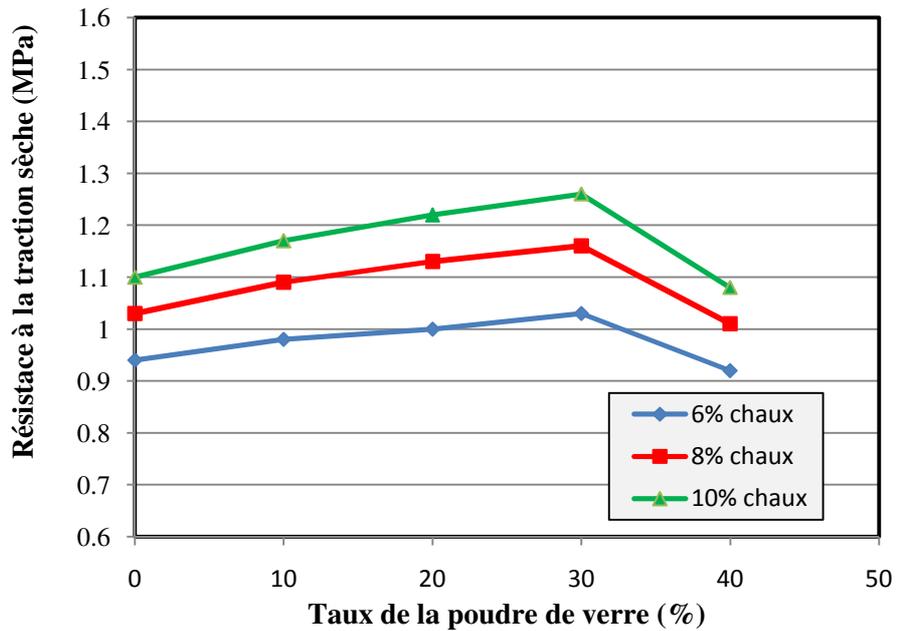
Tableau 3.4 : Coefficient de résistance à l'eau pour les BKXV

Teneur en PV (%)	Contrainte moyenne en compression (MPa)								
	BKXV6			BKXV8			BKXV10		
	RCH	RCS	CR	RCH	RCS	CR	RCH	RCS	CR
0	4,2	7,2	0.6	5.12	8	0.64	5.69	8,5	0.67
10	4.65	7.5	0.62	5.61	8.5	0.66	6.34	9.2	0.69
20	4.9	7.9	0.62	6.12	9	0.68	6.98	9.7	0.72
30	5.10	8.1	0.63	6.58	9.4	0.7	7.54	10.2	0.74
40	4.45	7.3	0.61	5.33	8.2	0.65	5.84	8.6	0.68

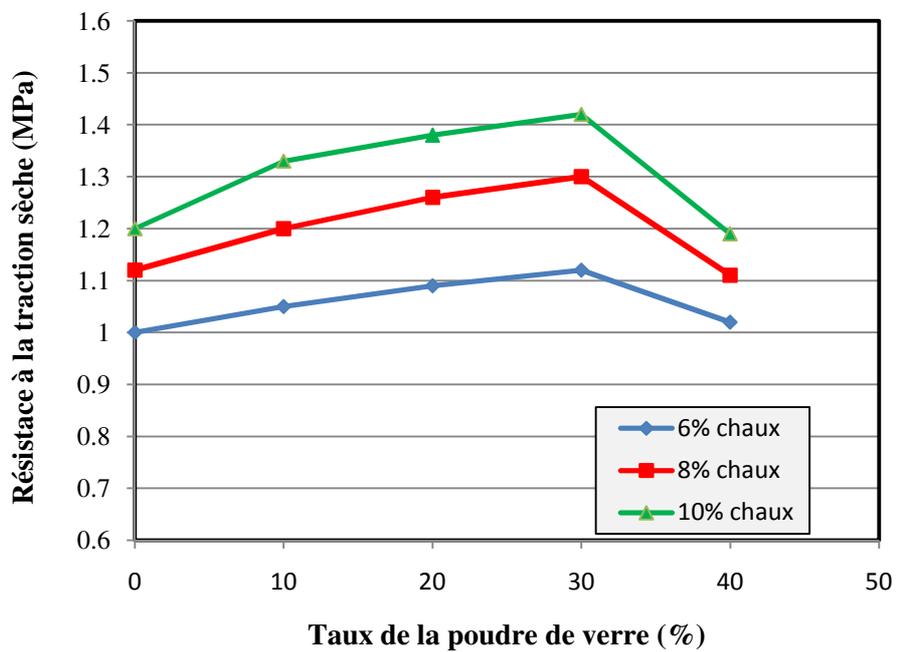
3.2.2.4 La résistance mécanique à la traction

La figure 3.10 illustre l'influence du taux de la poudre de verre sur la résistance à la traction sèche. A partir des résultats obtenus, on peut constater que la résistance à la traction sèche augmente avec l'augmentation de la teneur en PV jusqu'à 30 %. Au-delà de cette valeur, il y a une chute de la RTS pour différents teneurs en chaux. L'analyse des valeurs montre que la RTS du BTC à base de 10 % en chaux (pour l'ensemble des teneurs en PV) présente des valeurs supérieures à celles des BTC à base de 6 % et 8 %. A titre d'exemple, pour 30 % en PV, l'augmentation de la résistance à la traction des BKXV stabilisées par 10 % en chaux est : de 26.78 % et 9.23 % supérieure à celle de 6 % et 8 % successivement. Par contre, elles sont un peu supérieures pour les BAXP de l'ordre de : 22.33 % (pour 6 % de chaux) et 8.62 % (pour 8 % de chaux).

Comme dans le cas des RCS et RCH, les valeurs de la RTS pour les BKXV sont supérieures aux valeurs de la RTS des BAXV. Les meilleures valeurs de RTS sont obtenues par l'ajout de 30 % pour les deux types de sol. A titre d'exemple, La valeur de la RTS pour les briques stabilisées par 10 % en chaux et 30 % de PV est égale à 1.26 MPa et 1.42 MPa pour BAXV et BKXV respectivement.



a- BAXV



b- BKXV

Fig. 3.10 : Influence du taux de la poudre de verre sur la résistance à la traction sèche des BAXV et BKXV pour différents dosages en chaux.

3.2.3 Laitier granulé

Plusieurs études ont utilisé le laitier granulé finement broyé pour traiter le problème des sols qui contiennent le sulfate (Wild, 1998 ; Puppala et al, 2003 ; Cedik et al, 2013.), ils ont montré l'effet bénéfique du laitier sur la durabilité de ces sols. Par ailleurs, Oti et al. (2009), a réalisé une étude sur la stabilisation des briques de terre comprimées par le laitier activé par la chaux et le ciment. Il a montré que les briques stabilisées par le laitier avec la chaux donnent des résistances et des durabilités meilleures que les briques stabilisées par le laitier avec le ciment. Le mécanisme de la réaction dans un mélange contenant la chaux, le laitier et le sol en présence d'eau se divise en deux réactions distinctes : - la première réaction est dite réaction d'échange d'ions, elle est rapide en tant que le résultat de la réaction exothermique, ceci est connu comme l'amélioration des sols ou modification - la deuxième réaction c'est la réaction pouzzolanique, elle est lente et connue sous le nom de stabilisation / solidification (Mckinley et al., 2001; Oti et al., 2008).

3.2.3.1 La résistance à la compression sèche

L'influence du dosage du laitier sur la résistance à la compression sèche est présentée dans la figure 3.11. L'analyse des valeurs montre que la résistance à la compression augmente en fonction d'augmentation de la teneur en laitier pour les différents dosages en chaux. L'augmentation de la RCS des BAXL est de l'ordre de 14.70 %, 16.25 % et 20.25 % pour 6 %, 8 % et 10 % de chaux respectivement dans la gamme de 0 à 40 % LG, pour une même gamme de LG l'augmentation de la RCS des BKXL pour 6 % 8 % et 10 % est de l'ordre respectivement: de 19.44 %, 25 % et 28.47 %. Cette augmentation significative est due à l'échange d'ions calcium à partir de la chaux et du laitier avec des ions métalliques se produiront dans l'argile. La dispersion des minéraux argileux floclés pour former une plus forte agglomération de plus fines particules, entravant la pénétration de l'eau et la réduction de la plasticité. Dans une réaction plus lente, le calcium se combine chimiquement avec la silice et l'alumine dans les minéraux argileux pour former des aluminates et des silicates complexes (Oti et al. 2008). Selon (Wild et al. 1998), la présence de gypse dans le sol accélère cette réaction. La valeur maximale de la RCS atteint 10.92 MPa de la brique stabilisée par 10 % en chaux avec 40 % en LG. Les valeurs des RCS pour BKXL sont supérieures aux valeurs des RCS pour BXAL.

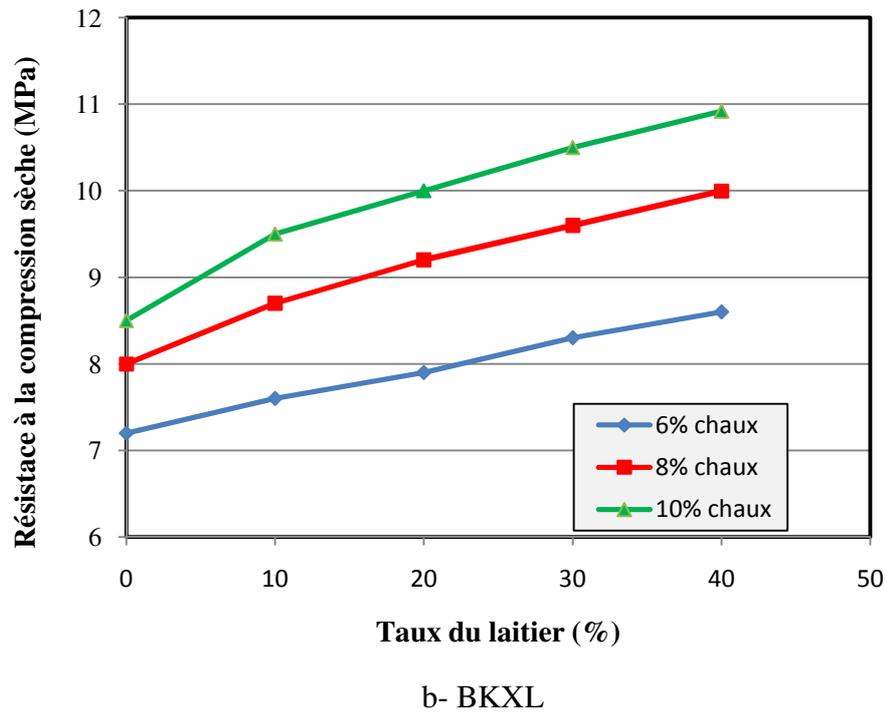
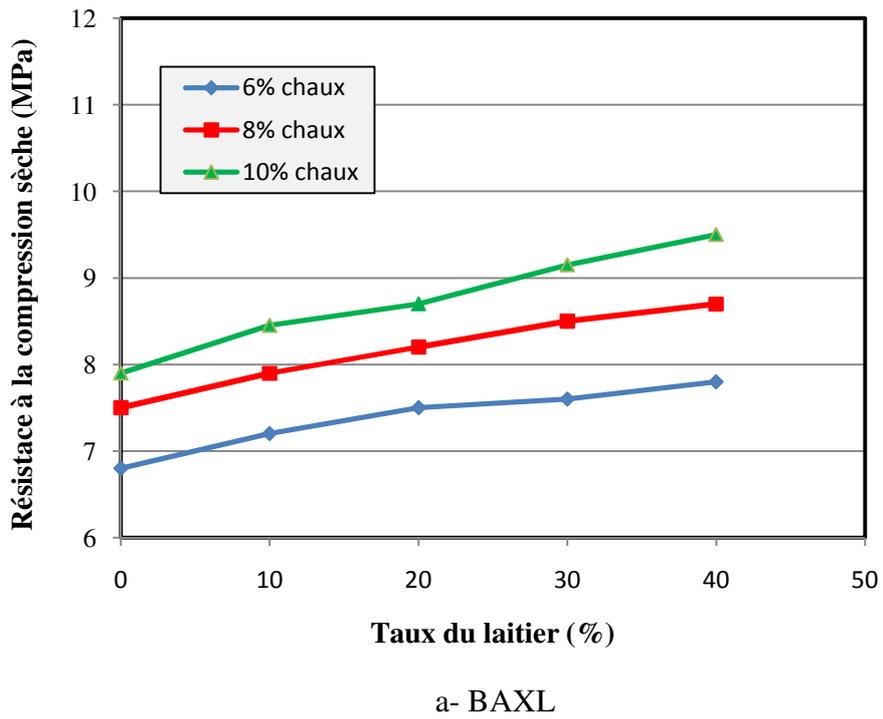


Fig. 3.11 : Influence du taux du laitier granulé sur la résistance à la compression sèche des BAXL et BKXL pour différents dosages en chaux.

3.2.3.2 La résistance à la compression humide

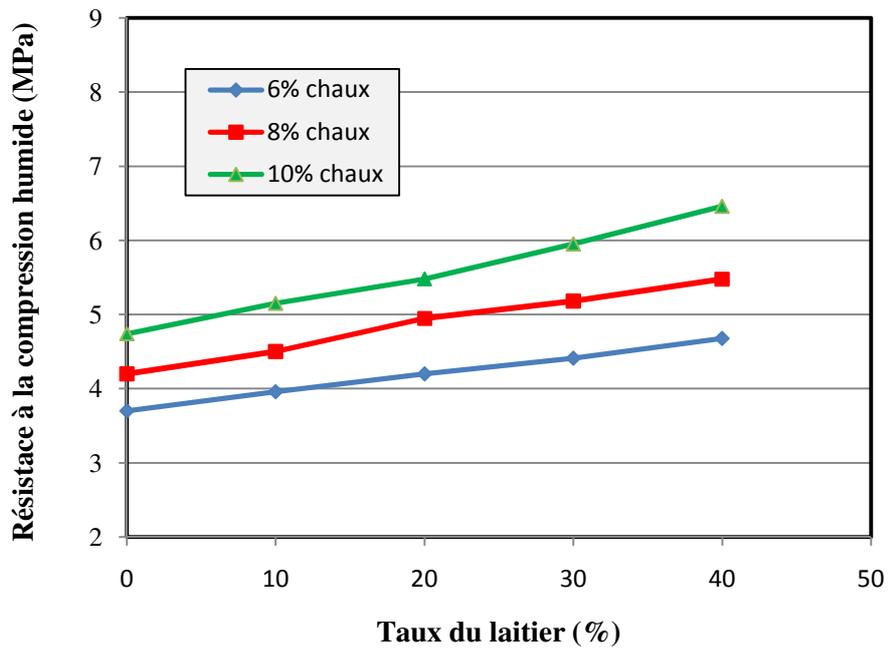
La figure 3.12 illustre la variation de la résistance à la compression humide en fonction du dosage en laitier granulé.

L'interprétation des résultats obtenus obéit aux mêmes critères d'évaluations citées auparavant (essai à la compression sèche). La RCH augmente avec l'augmentation de la teneur en LG des BAXL et BKXL pour différents teneurs en LG. Par conséquence et en terme des valeurs cette augmentation est de l'ordre de 26.48 %, 30.47 % et 36.28 % pour 6 %, 8 % et 10 % de chaux respectivement dans la gamme de 0 à 40 % LG, pour une même gamme de LG l'augmentation de la RCS des BKXL pour 6 % 8 % et 10 % est de l'ordre respectivement: de 33.09 %, 40.62 % et 47.62 %. On peut dire donc que l'inclusion du laitier avec un taux de 40 % pour une plage de variation de la teneur de la chaux de 10 % a induit un gain important de la résistance d'une valeur approximative de 6.36 MPa et 8.40 MPa pour les BAXL et BKXL respectivement. La résistance des BTC stabilisées par le SOLA est significativement importante, on peut l'expliquer par l'effet positif du laitier sur le sol qui contient un taux important de sulfate .

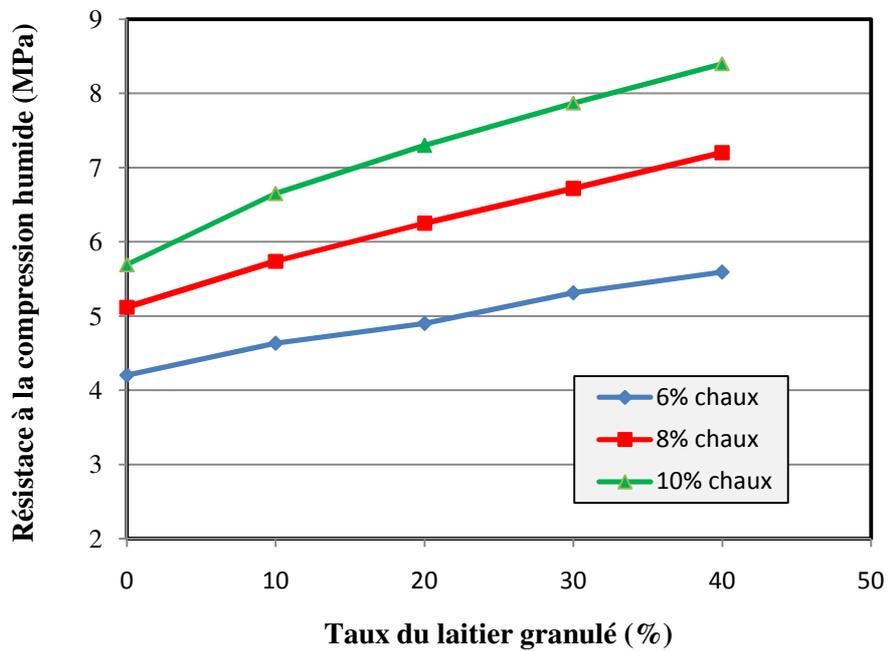
Les briques de terre comprimée perdent sa cohésion lorsque sont immergées dans l'eau (Arquie, 1973), On remarque que la stabilisation effectuée par ce traitement mixte a été bénéfique pour l'ensemble des briques en réduisant leur sensibilité à l'eau (Oti et al. 2008).

3.2.3.3 Le coefficient de résistance à l'eau

La figure 3.13 illustre la variation du coefficient de résistance à l'eau en fonction du taux du laitier pour les deux sols (SOLA, SOLK). Le CR augmente avec l'augmentation du dosage en laitier pour différents dosages en chaux. L'augmentation du CR des BAXL est de l'ordre de 12.5 %, 11.11 % et 13.33 % pour 6 %, 8 % et 10 % de chaux respectivement dans la gamme de 0 à 40 % LG, pour une même gamme de LG l'augmentation de la RCS des BKXL pour 6 % 8 % et 10 % est de l'ordre respectivement: de 7.69 %, 12.5 % et 14.92 %. Ces résultats sont supérieurs aux briques stabilisées par la poudre de verre et la pouzzolane naturelle. En effet, le laitier granulé diminue l'écart entre la RCS et la RCH pour les deux types de sols qui contiennent un taux élevé de gypse voir les (tableaux 3.5 et 3.6). La valeur maximale de CR est égale 0.77, obtenue par la brique BKXL stabilisée par 10 % de chaux et 40 % de LG



a- BAXL



b- BKXL

Fig. 3.12 : Influence de taux du laitier granulé sur la résistance à la compression humide des BAXL et BKXL pour différents dosages en chaux.

On constate que l'ensemble des valeurs de la CR est supérieur à la valeur de 0.5, valeur limite recommandée par ((Houben et al, 1996).

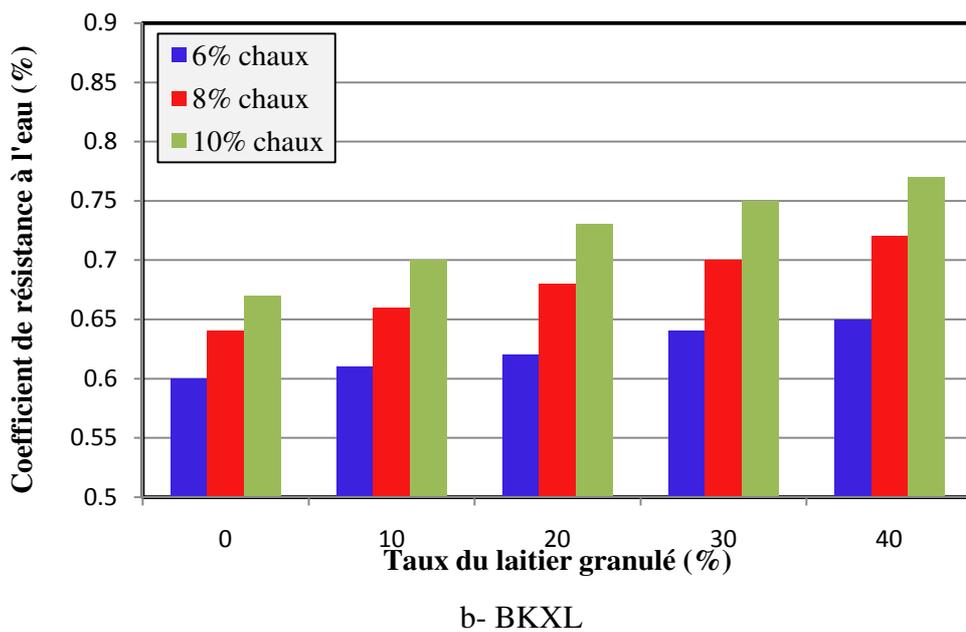
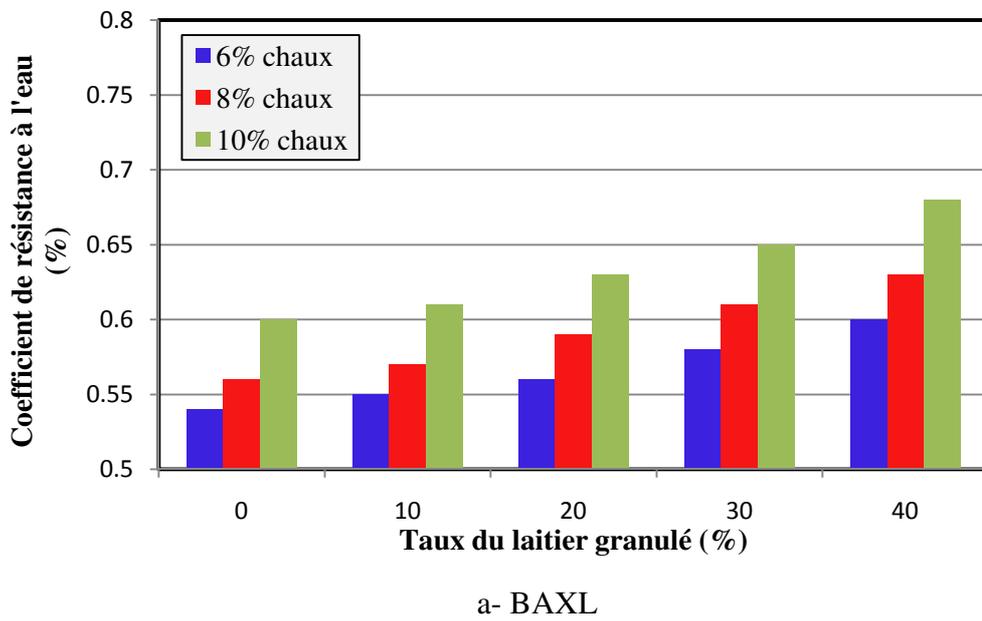


Fig. 3.13 : Influence du taux du laitier granulé sur le coefficient de résistance à l'eau des BAXL et BKXL pour différents dosages en chaux.

Tableau 3.5 Coefficient de résistance à l'eau pour les BAXL

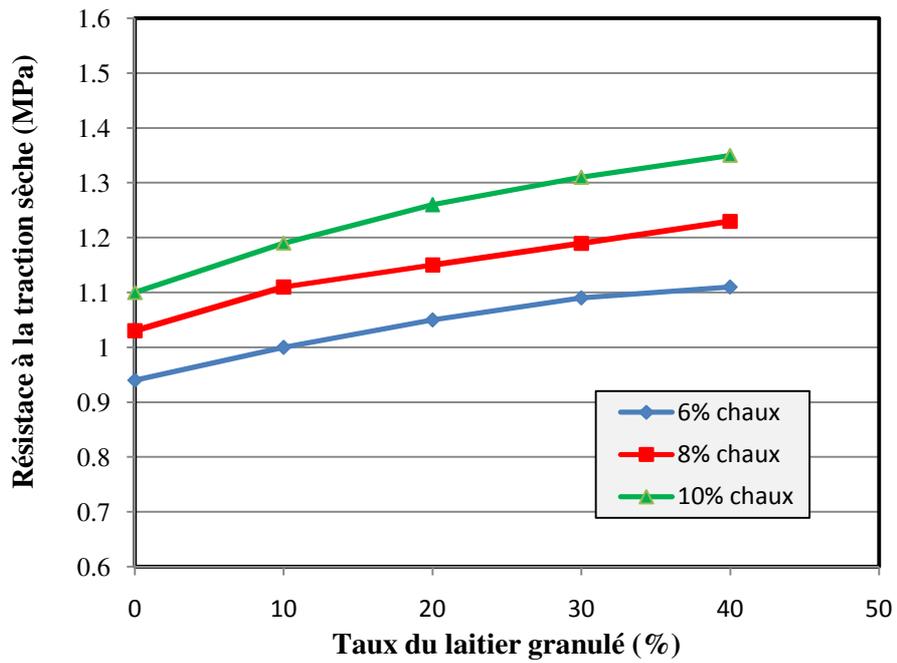
Teneur en LG (%)	Contrainte moyenne en compression (MPa)								
	BAXL6			BAXL8			BAXL10		
	RCH	RCS	CR	RCH	RCS	CR	RCH	RCS	CR
0	3,7	6,8	0.54	4.2	7,5	0.56	4.74	7,9	0.60
10	3.96	7.2	0.55	4.5	7.9	0.57	5.15	8.45	0.61
20	4.20	7.5	0.56	4.95	8.2	0.59	5.48	8.7	0.63
30	4.41	7.6	0.58	5.18	8.5	0.61	5.95	9.15	0.65
40	4.68	7.8	0.60	5.48	8.7	0.63	6.46	9.5	0.68

Tableau 3.6 Coefficient de résistance à l'eau pour les BKXL

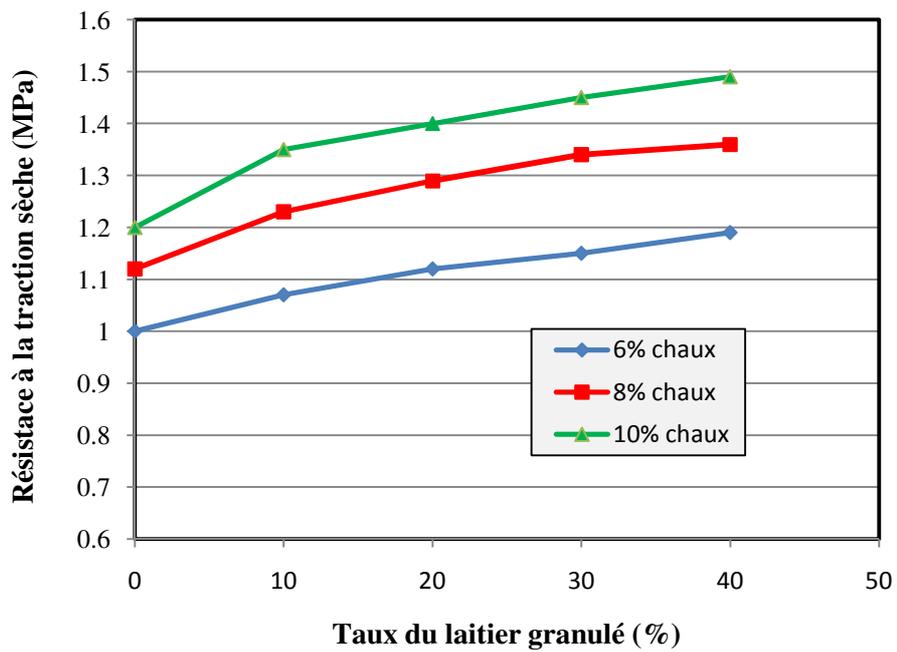
Teneur en LG (%)	Contrainte moyenne en compression (MPa)								
	BKXL6			BKXL8			BKXL10		
	RCH	RCS	CR	RCH	RCS	CR	RCH	RCS	CR
0	4.2	7,2	0.6	5.12	8	0.64	5.69	8,5	0.67
10	4.63	7.6	0.61	5.74	8.7	0.66	6.65	9.5	0.70
20	4.9	7.9	0.62	6.25	9.2	0.68	7.30	10.0	0.73
30	5.31	8.3	0.64	6.72	9.6	0.70	7.87	10.5	0.75
40	5.59	8.6	0.65	7.20	10.0	0.72	8.40	10.92	0.77

3.2.2.4 Résistance mécanique à la traction sèche

La figure 3.14 illustre l'influence du taux de laitier granulé sur la résistance à la traction sèche.



a- BAXL



b- BKXL

Fig. 3.14 : Influence du taux du laitier granulé sur la résistance à la traction sèche des BAXL et BKXL pour différents dosages en chaux.

A partir des résultats obtenus, on peut constater que la résistance à la traction sèche augmente avec l'augmentation du dosage en LG pour différentes teneurs en chaux. Par conséquent et en termes de pourcentage, cette augmentation de la RTS des BAXL est de l'ordre de 18.08 % 19.41 % et 22.72 % pour 6 %, 8 % et 10 % de chaux respectivement dans la gamme de 0 à 40 % LG, Pour une même gamme de LG l'augmentation de la RTS des BKXL pour 6 % 8 % et 10 % est de l'ordre respectivement: de 19 %, 21.42 % et 24.16 %. L'amélioration significative de la RTS à 28 jours pour les deux types de sol, est due à la contribution de gypse au développement des réactions pouzzolanique.

3.3 Effet du dosage des ajouts dans le temps sur les résistances mécaniques et la durabilité

Afin d'étudier l'effet du dosage des ajouts dans le temps sur les résistances mécaniques et la durabilité des BTC à base du SOLK stabilisé par 10 % en chaux, trois dosages différents de 10, 20 et 30 % par rapport à la masse de la chaux ont été utilisés pour les trois ajouts minéraux (pouzzolane, verre et laitier), et ceci pour un temps de cure de 28 jours allant à 180 jours. Les briques ont été compactées avec une contrainte de compactage de 10 MPa et conservées au laboratoire à température ambiante.

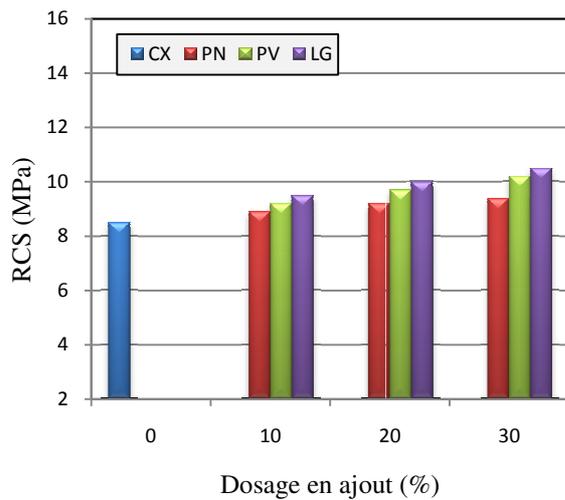
3.3.1 Résistances mécaniques

3.3.1.1 Résistance à la compression sèche

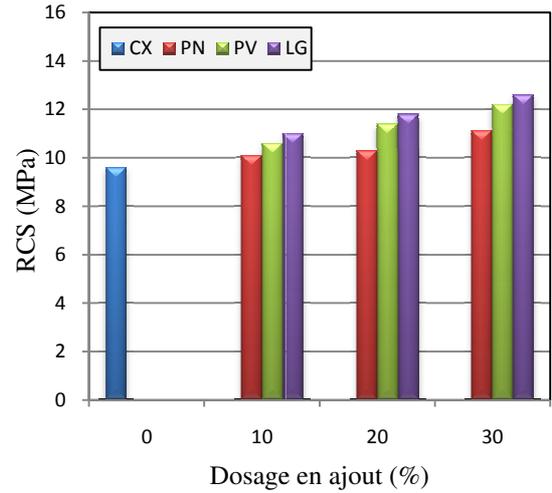
Les résultats de la résistance à la compression sèche en fonction du dosage en ajouts pour différents temps de cure sont indiqués dans la figure 3.15. On constate que la RCS augmente en fonction du dosage en ajouts et en fonction du temps de cure. Toutes les valeurs de la RCS des briques avec ajouts sont supérieures aux briques sans ajouts pour les différents temps de cure. A 180 jours, les valeurs de la RCS pour les briques stabilisées par 30% de pouzzolane, de verre et de laitier atteignent respectivement 13.4 MPa, 15.4 MPa et 16 MPa. Ces résultats significatifs témoignent de l'effet bénéfique de ces ajouts sur l'amélioration de la RCS à long terme.

Le taux d'évolution de la résistance à la compression sèche est illustré dans le tableau 3. 6. Les résultats montrent que le taux d'augmentation de la résistance à la compression sèche augmente avec l'augmentation du dosage en ajouts pour différents temps de cure. Cette augmentation est irrégulière, le taux d'augmentation de la RCS entre (28-56 jours) est plus

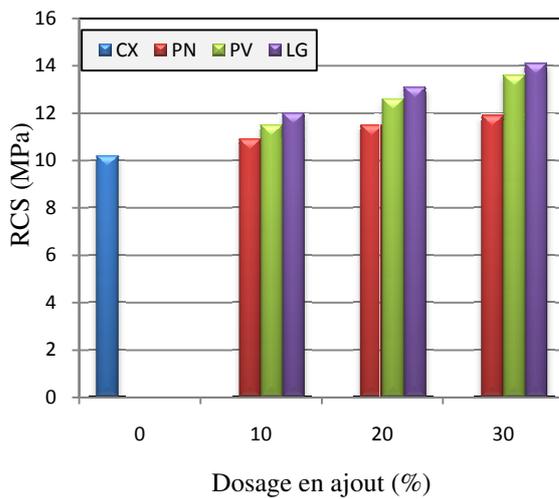
important lorsqu'on le compare à celui de l'âge de (56-90 jours). Le taux d'augmentation entre (28-56 jours) est de l'ordre de 15.13 %, 19,60 % et 20 % pour les BKXP, BKXV et BKXL respectivement. Cependant, le taux d'augmentation de la RCS à l'âge entre (56-90 jours) pour les BKXP, BKXP et BKXL est respectivement de l'ordre 10.18 %, 11.47 % et 11.90 %. Oti et al (2009), a fait des constats semblables concernant les BTC stabilisées par la chaux avec le laitier.



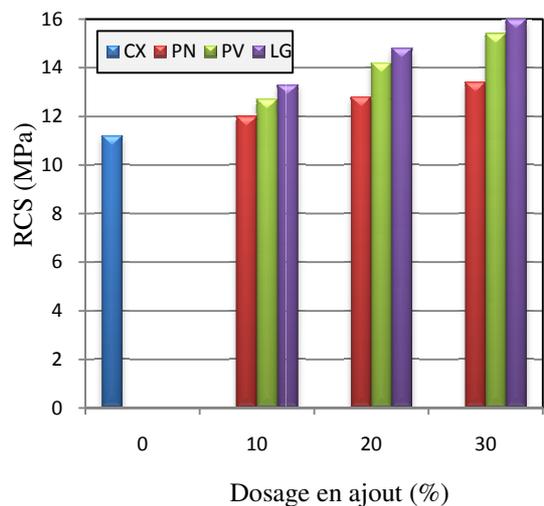
a- 28 jours



b- 56 jours



c- 90 jours



d-180 jours

Fig. 3.15 : Influence du dosage en ajout sur la résistance à la compression sèche aux différents âges.

On remarque aussi, que la cinétique de réaction pouzzolanique des BKXP est légèrement inférieure aux BKXV et BKXL, pour différents temps de cure (tableau 3.7). En effet, le développement rapide de la réaction pouzzolanique dépend de la réactivité différente de ces ajouts. A cet effet, les analyses aux rayons X du laitier granulé et la poudre de verre (Chapitre 2, § 2.2.4, 2.2.5) ont montré des matériaux essentiellement vitreux. Cependant, la pouzzolane naturelle est partiellement vitreuse. Par conséquent, le laitier et la poudre de verre ont un pouvoir pouzzolanique supérieur à la pouzzolane naturelle.

Tableau 3.7 : Taux d'augmentation de la résistance à la compression sèche.

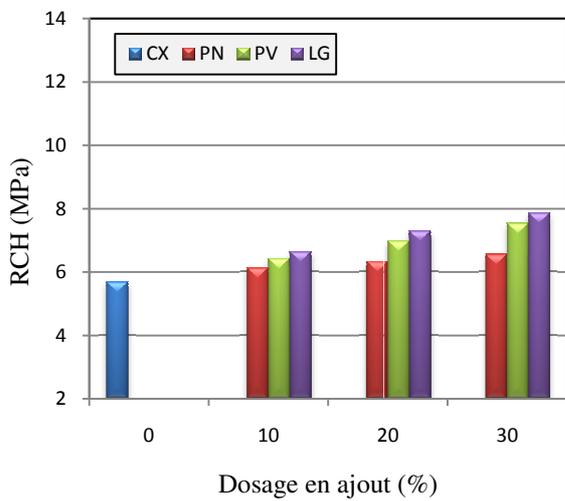
Temps de cure (jours)	Taux d'augmentation de la RCS (%)									
	Dosage d'ajout (%)									
	0	10			20			30		
		PN	PV	LG	PN	PV	LG	PN	PV	LG
28-56	7.64	13.48	15.21	15.78	14.13	17.52	18.0	15.13	19.60	20.00
56-90	4.91	7.92	8.49	9.09	9.52	10.52	11.01	10.18	11.47	11.90
90-180	8.33	10.09	10.43	10.83	11.30	12.69	12.97	12.60	13.23	13.74
28-180	22.35	23.59	28.26	31.57	25.0	31.95	36	34.32	39.21	42.85

3.3.1.2 Résistance à la compression humide

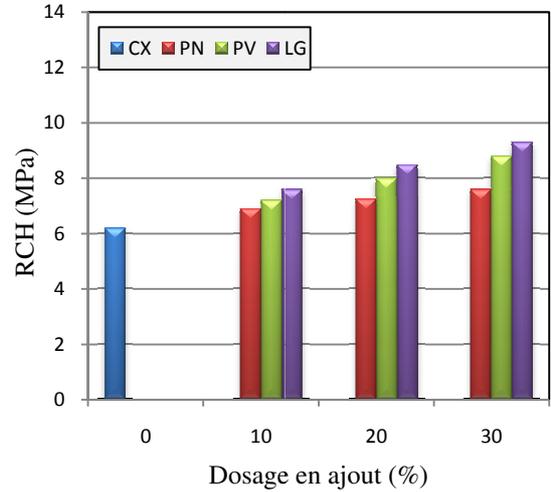
La figure 3. 16 représente la variation de la résistance à la compression humide en fonction du temps de cure et dosage d'ajouts. À travers de cette figure, on constate aussi, comme dans le cas de la résistance à la compression sèche qu'il ya une augmentation de la RCH avec l'augmentation du temps de cure pour différents dosages d'ajouts (PN, PV et LG). Les meilleures valeurs de RCH sont obtenues par BKXL suivies par les BKXV puis les BKXP. À titre d'exemple, les valeurs de la RCH pour les briques stabilisées par 30 % de laitier, de verre et de pouzzolane naturelle et curées à 180 jours sont respectivement : 8.6 MPa ; 11.2 MPa et 12.1 MPa. À 180 jours, la différence entre les valeurs de la RCH des briques sans ajouts et les briques stabilisées par 30 % de NP, PV et LG est de 3.91 MPa, 5.51 MPa et 6.41 MPa respectivement. Ceci montre que ces ajouts améliorent les RCH à long terme par effet chimique (pouzzolanique) (Oti et al 2009 et Idir, 2009).

Le taux de développement des RCH en fonction du temps de cure et du dosage d'ajout pour les trois ajouts testés est présenté sur le tableau 3.8. On voit bien que le taux

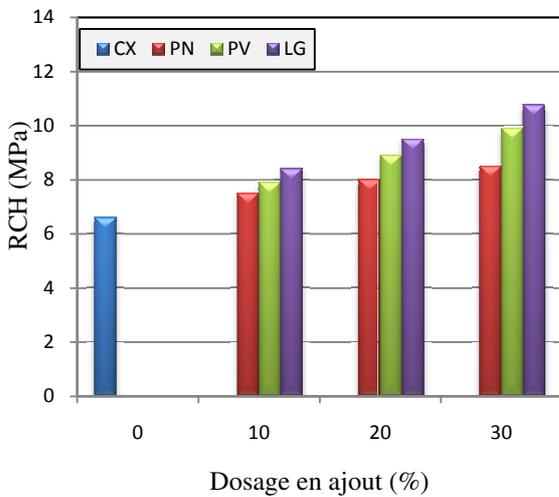
d'augmentation de la RCH est augmenté avec l'accroissement du dosage des ajouts et temps de cure. En effet, cette augmentation peut être expliquée par la lenteur de la réaction pouzzolanique à température ambiante de la chaux et les ajouts.



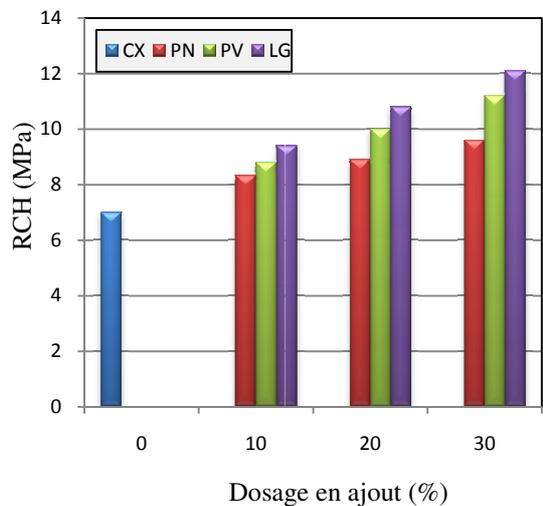
a- 28 jours



b- 56 jours



c- 90 jours



d-180 jours

Fig. 3.16 : Influence du dosage en ajout sur la résistance à la compression humide aux différents âges.

Tableau 3.8 Taux d'augmentation de la résistance à la compression humide

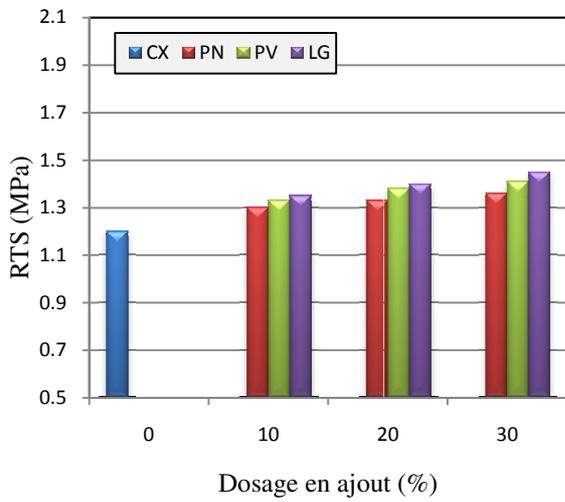
Temps de cure (jours)	Taux d'augmentation de la RCH (%)									
	Dosage d'ajout (%)									
	0	10			20			30		
		PN	PV	LG	PN	PV	LG	PN	PV	LG
28-56	8.96	12.37	13.56	14.28	14.35	14.61	16.43	15.85	16.71	18.17
56-90	6.45	8.69	9.72	10.25	10.34	11.25	11.76	11.84	12.5	13.97
90-180	8.33	10.66	11.39	11.90	11.25	12.35	13.68	12.94	11.2	14.15
28-180	23.02	35.17	38.8	41.35	40.37	43.26	47.94	46.34	48.53	53.73

3.3.1.3 Résistance à la traction sèche

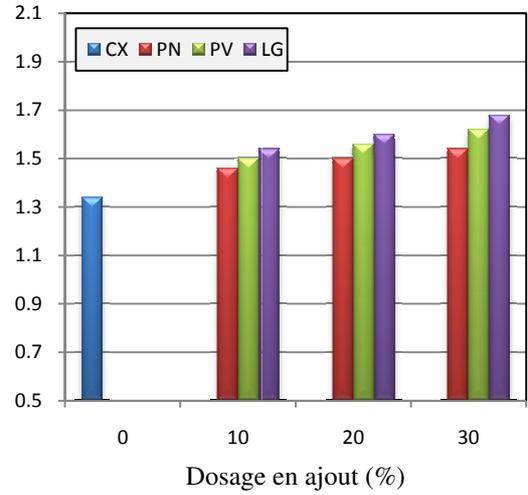
Les résultats de la résistance à la compression sèche en fonction du dosage en ajouts aux différents âges sont présentés dans la figure 3.17. L'analyse des résultats montre clairement que la résistance à la traction sèche augmente avec l'augmentation du dosage des ajouts pour différents âges de cure. À 28 jours, l'augmentation de la RTS est de l'ordre de 13.33 %, 17.5 % et 20.83 % dans la gamme de 0 % à 30% d'ajout de NP, PV et LG respectivement. Avec l'évolution du temps de cure, on constate que l'augmentation du dosage de NP, PV et LG augmente la résistance à la traction sèche. Après 180 jours de cure, l'addition de 30 % de NP, PV et LG entraîne une augmentation de 74.16 %, 63.33 % et 55 % respectivement par rapport aux briques sans ajouts. Ce comportement d'augmentation peut être expliqué par l'évolution de la réaction pouzzolanique à température ambiante, plus il ya de laitier, de poudre de verre et de pouzzolane naturelle ajoutés, plus le développement de la réaction pouzzolanique est importante. Comme dans le cas de la RCS et RCH, les meilleures valeurs de RTS sont obtenues par BKXL. En effet, les valeurs de RTS à un temps de cure de 180 jours sont : 1.7 MPa, 1.87 MPa et 1.96 MPa pour 30 % d'ajout de NP, PV et LG respectivement. Ces valeurs importantes témoignent de l'effet bénéfique de ces ajouts sur le gain de résistance à la traction sèche à long terme.

La cinétique d'augmentation de la résistance à la compression sèche est illustrée dans le tableau 3.9. On constate que le taux d'augmentation de RTS augmente avec l'augmentation du dosage des ajouts pour différents temps de cure. Le taux d'augmentation des briques stabilisées par la chaux seule est inférieur aux briques stabilisées par la chaux avec les ajouts. On constate aussi, comme dans le cas de RCS et RCH, que le taux d'augmentation de RTS est

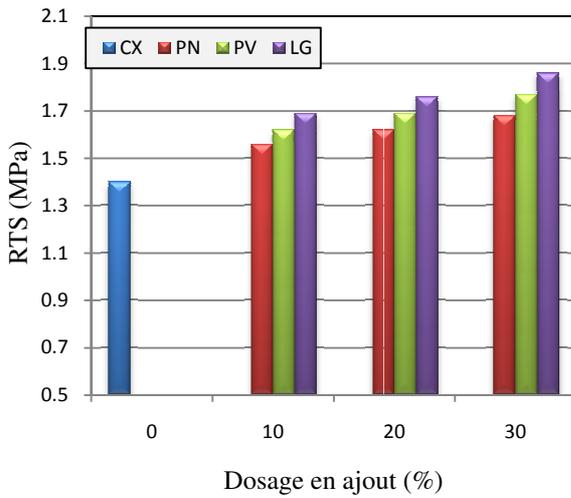
irrégulier. Le taux d'augmentation de la RCS entre (28-56 jours) est plus important lorsque comparé à celui de l'âge de (56-90 jours).



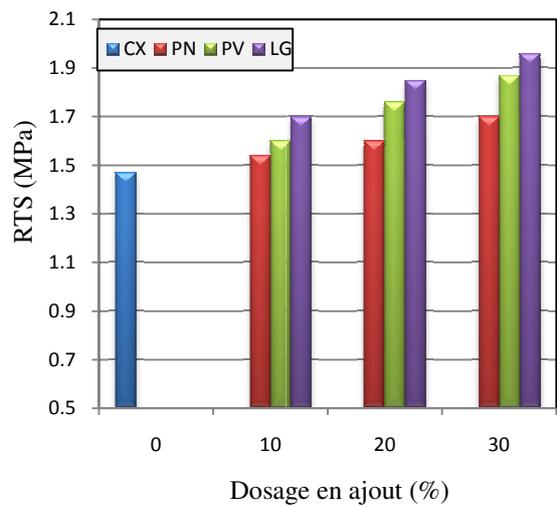
a- 28 jours



b- 56 jours



c- 90 jours



d-180 jours

Fig. 3.17 : Influence du dosage en ajout sur la résistance à la traction sèche aux différents âges.

Tableau 3.9 Taux d'augmentation de la résistance à la traction sèche

Temps de cure (jours)	Taux d'augmentation de la RTS (%)									
	Dosage d'ajout (%)									
	0	10			20			30		
		PN	PV	LG	PN	PV	LG	PN	PV	LG
28-56	11.66	12.30	12.78	14.07	12.78	13.03	14.28	13.23	14.89	15.86
56-90	4.47	6.84	8.0	9.74	8.0	8.33	10.0	9.09	9.25	10.071
90-180	5.00	8.0	9.25	10.65	9.25	10.65	10.74	10.71	10.73	11.82
28-180	22.50	29.23	33.08	38.51	33.08	35.50	39.28	36.76	39.0	44.13

3.3.2 Durabilité

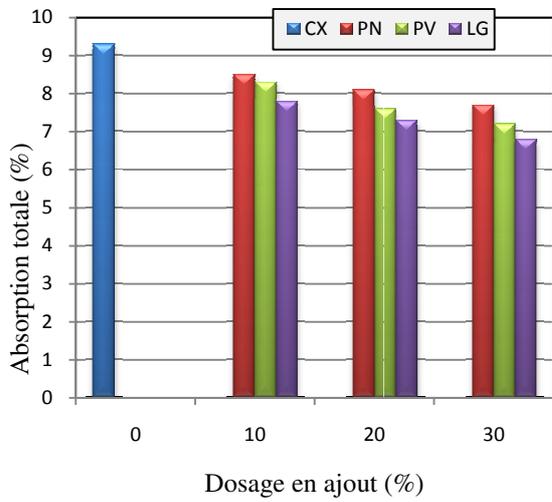
Guettala et al. (2005), ont montré que les conditions des essais de la durabilité des BTC en laboratoire semblent très sévères par rapport aux conditions climatiques naturelles. En effet, on va étudier la durabilité des BTC à partir de quelques essais de durabilité dans le laboratoire.

3.3.2.1 Absorption totale

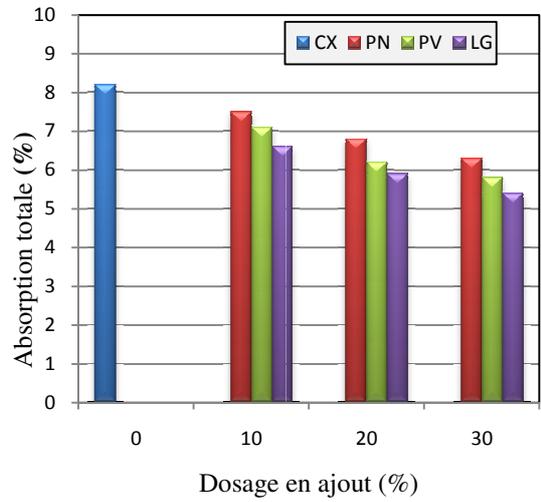
L'absorption totale de l'eau est une propriété importante qu'on peut utiliser pour le contrôle du volume total des vides dans les BTC (Kerali, 2001). L'absorption totale est obtenue après l'immersion de la brique dans un bac à eau pendant 24 heures.

La figure 3.18 représente la variation de l'absorption totale en fonction du dosage d'ajouts aux différents âges. On constate que l'absorption totale diminue avec l'augmentation du dosage des ajouts pour différents temps de cure. En termes de pourcentage, cette évolution est de 15.28 %, 32.25 % et 38.31 % dans la gamme de 0 % à 30 % de NP, PV et LG respectivement, à l'âge de 28 jours. À 56, 91 et à 180 jours, l'absorption totale est nettement diminuée et témoigne de la formation de nouveaux hydrates qui remplissent les vides. On remarque aussi, comme dans le cas de RCS, RCH et RTS, que les briques BKXL donnent les meilleurs résultats suivis par des briques BKXV puis par des briques BKXP. À titre d'exemple, pour la BKXL à 180 jours et 30 % de LG, le gain de l'absorption totale est d'environ 5.7 % par rapport à la brique BSKX à 28 jours de l'ordre de 61.29 % de diminution.

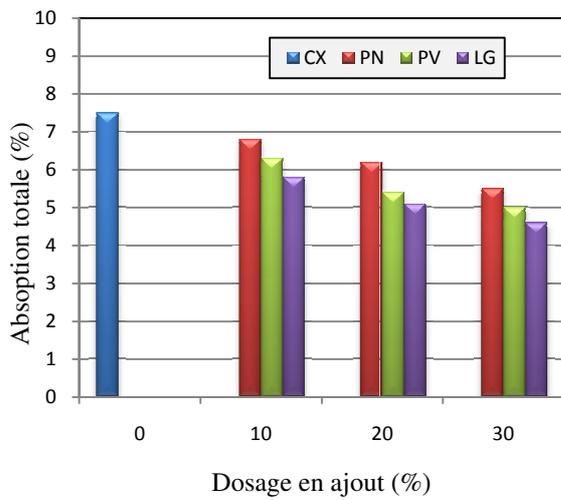
Il faut mentionner que toutes les valeurs d'absorption totale pour l'ensemble des BTC testés sont inférieures à la valeur maximale de 15 % recommandée par (IS 1725 1982)



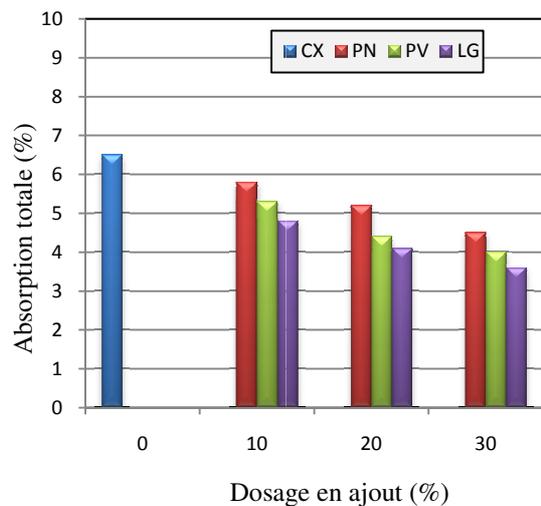
a- 28 jours



b- 56 jours



c- 90 jours



d-180 jours

Fig. 3.18 : Influence du dosage en ajout sur l'absorption totale aux différents âges.

Les résultats du taux de diminution de l'absorption totale dans le temps sont illustrés dans le tableau 3. 10. Tout d'abord, on remarque que le taux de diminution de l'absorption totale pour les briques stabilisées par la chaux sans ajout, est augmenté en fonction de

l'accroissement du temps de cure. Cependant, cette augmentation est inférieure aux briques avec ajouts. On constate aussi que le taux d'augmentation de l'absorption entre (28-56 jours) est plus important lorsque comparé à celui de l'âge de (56-90 jours).

Tableau 3.10 : Taux de diminution de l'absorption totale

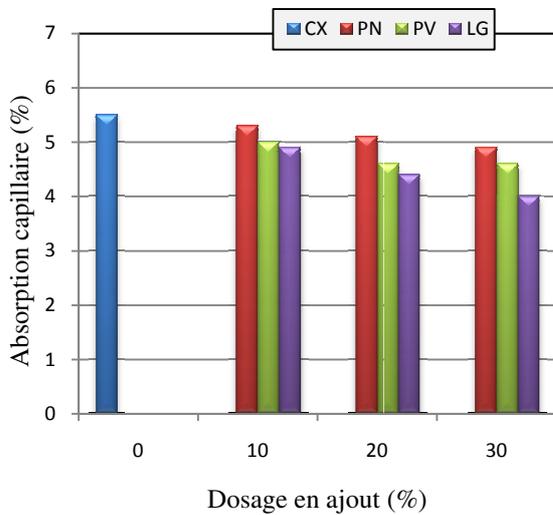
Temps de cure (jours)	Taux de diminution de l'absorption totale									
	Dosage d'ajout (%)									
	0	10			20			30		
		PN	PV	LG	PN	PV	LG	PN	PV	LG
28-56	12.09	13.33	14.45	15.38	16.04	18.42	19.17	18.18	20.58	20.58
56-90	8.53	9.33	11.26	12.12	11.76	12.90	13.55	12.69	13.79	14.81
90-180	13.33	14.70	15.87	17.24	16.12	18.51	19.60	18.18	20.0	21.73
28-180	30.10	31.76	36.14	38.46	35.80	43.24	43.85	41.55	44.44	53.84

3.3.2.2 Absorption capillaire

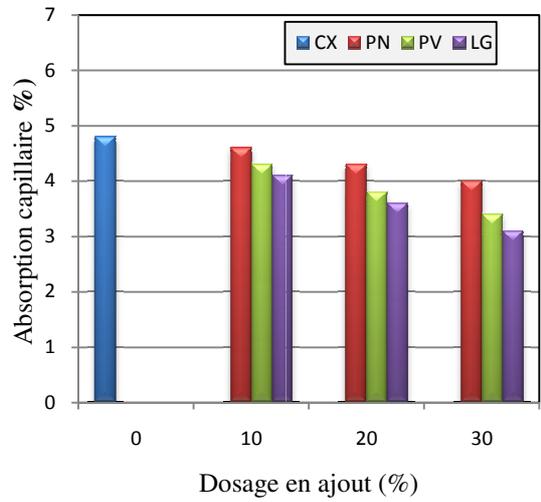
Presque toutes les briques peuvent absorber l'eau par capillarité (Keddie ; Cleghorn 1978). Cette propriété est clairement distincte de la facilité avec laquelle l'eau peut pénétrer dans une brique (Neville, 2000).

Les résultats de l'absorption capillaire en fonction du dosage en ajouts pour différents temps de cure sont illustrés dans la figure 3.19. Les résultats obtenus montrent l'effet favorable de tous les ajouts sur l'absorption capillaire. La tendance de la diminution de l'absorption capillaire est fonction de la nature et du dosage des ajouts. En effet, on remarque une légère diminution de l'absorption à 28 jours pour les BKXP. Cette diminution est de l'ordre de 10.10 % pour 30 % de NP. Ceci peut être expliqué par la lenteur de la réaction pouzzolanique à température ambiante. Cependant, la diminution de l'absorption est de l'ordre de 21.18 % et 27.27 % pour 30 % de PV et LG. Ces résultats significatifs peuvent être expliqués par la présence des alcalins dans la poudre de verre qui accélère la réaction pouzzolanique à 28 jours et par le caractère hydraulique latent pour le laitier. Par ailleurs, l'absorption capillaire continue à diminuer pour 56, 90 et 180 jours avec l'augmentation du dosage des ajouts. Les valeurs minimales de l'absorption capillaire sont obtenues par les briques stabilisées par l'ajout de laitier suivies par la poudre de verre puis la pouzzolane

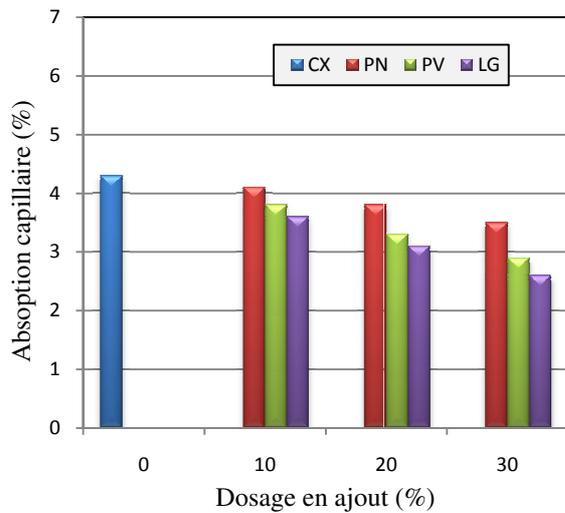
naturelle. A titre d'exemple, au temps de cure de 180 jours et 30 % d'ajout, l'absorption capillaire est atteinte : 2.9 %, 2.3 % et 2 % pour Les BKXP, BKXV et BKXL.



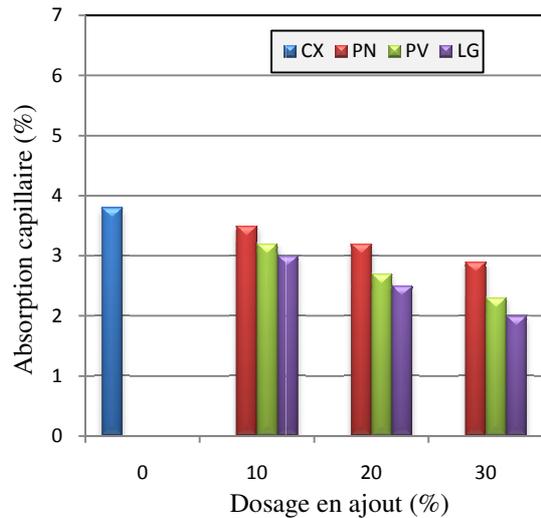
a- 28 jours



b- 56 jours



c- 90 jours



d-180 jours

Fig. 3.19 : Influence du dosage en ajout sur l'absorption capillaire aux différents âges.

Le taux de diminution de l'absorption capillaire en fonction du dosage en ajout et du temps cure, est présenté dans le tableau 3. 18. Comme on peut le remarquer, il y a une augmentation du taux de diminution de l'absorption capillaire avec l'augmentation du dosage

des ajouts pour les différents temps de cure. Cependant, cette augmentation n'est pas régulière. Comme dans le cas d'absorption totale, le taux d'augmentation de l'absorption entre (28-56 jours) est plus important lorsque comparé à celui de l'âge de (56-90 jours). Les meilleurs résultats sont obtenus à l'âge de 180 jours et 30 % d'ajouts. En terme de pourcentage, elles sont de l'ordre de 48.33 %, 56.31% et 61.96 % pour l'ajout de NP, PV et LG respectivement. Ces pourcentages sont considérablement supérieurs aux briques stabilisées par la chaux seule. D'après ces résultats, on constate que l'incorporation des ajouts avec la chaux améliore considérablement l'absorption capillaire à long terme.

Tableau 3.11 Taux de diminution de l'absorption capillaire

Temps de cure (jours)	Taux de diminution de l'absorption capillaire									
	Dosage d'ajout (%)									
	0	10			20			30		
		PN	PV	LG	PN	PV	LG	PN	PV	LG
28-56	12.72	13.20	14	14.58	15.68	17.39	18.18	18.36	20.93	22.5
56-90	10.41	10.86	11.62	12.19	11.62	13.15	13.88	12.5	14.7	16.12
90-180	13.15	14.63	15.78	16.66	15.78	18.18	19.35	17.47	20.68	23.07
28-180	36.28	38.66	41.38	43.53	43.08	48.72	51.41	48.33	56.31	61.69

3.3.3 Séchage/ mouillage

La figure 3. 20 présente l'influence du dosage en ajout sur les pertes en poids après douze cycles de mouillage/séchage des briques, pour différents temps de cure (28, 56, 90, 180 jours). Les résultats obtenus montrent l'effet favorable de tous les ajouts sur la perte en poids après douze cycles de séchage mouillage. La tendance à la diminution de la perte en poids est en fonction du type et dosage des ajouts et temps de cure. En effet, À l'âge de 28 jours, l'ajout de la pouzzolane n'a pas d'effet sur la diminution des pertes en poids, ces valeurs sont légèrement inférieures aux valeurs des briques sans ajout. Dans ce cas les réactions pouzzolaniques de la NP est lente à température ambiante. Cependant, les pertes de poids des briques stabilisées par (chaux+ PV) et par (chaux+LG) sont considérablement inférieures aux briques sans ajouts, puisque le laitier granulé par son caractère hydraulique latent et pouzzolanique s'inscrit dans le long terme. La poudre de verre par son potentiel pouzzolanique et la présence d'alcalins en quantités importantes comme activateurs de réaction

pouzzolanique, participe à la diminution de la perte en poids par la production d'une quantité importante des hydrates. En termes de valeurs, la diminution de la perte en poids est irrégulière, elle est de l'ordre de 11.76 %, 10 % et 3.7 % pour les BKXP dans les intervalles (0-10), (10-20) et (20-30) respectivement. Par contre, pour les BKXL, elle est de l'ordre de 33.82 % et 13.33 % et 20.51 % respectivement dans les intervalles (0-10), (10-20) et (20-30).

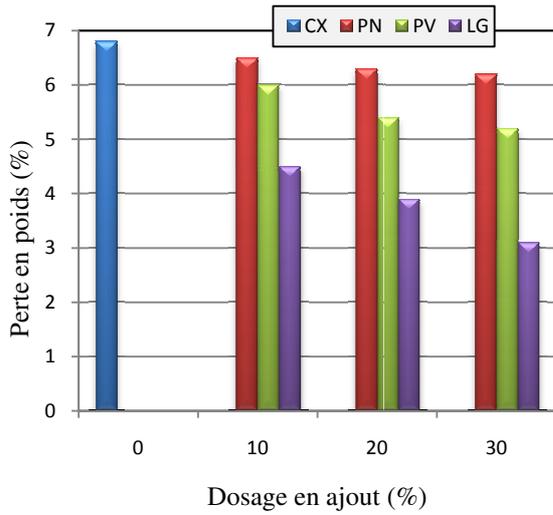
Pour les autres temps de cure (56, 90, 180 jours), les pertes en poids continuent à diminuer jusqu'à 0.9 % pour les BKXL stabilisé par 30 % du laitier. Fitzmaurice (1958), a recommandé des limites sévères pour perte de poids selon la norme ASTM D559.

La perte en poids admissible pour les constructions rurales est de :

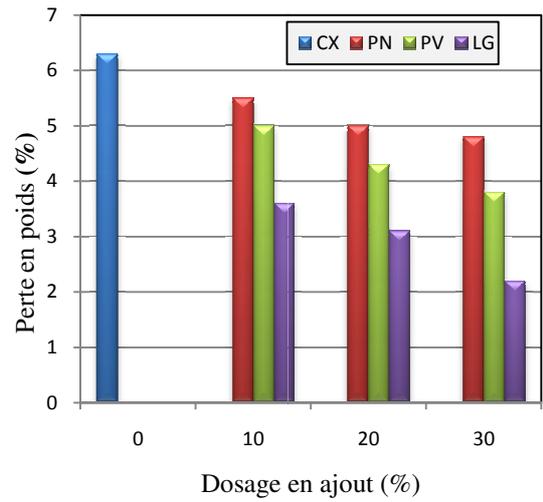
- 05 % pour tout climat dont la pluviométrie annuelle est supérieure à 500mm ;
- 10 % pour les climats secs dont la pluviométrie annuelle est inférieure à 500mm.

On constate que toutes les valeurs des pertes en poids est inférieure à la limite de 10 %, sachant que pour la région de Biskra, sa pluviométrie annuelle ne dépasse pas 500mm selon le centre de recherche scientifique et technique des régions arides (CRSTRA). Cependant, toutes les briques stabilisées par l'ajout du laitier sont inférieures à 5 %. Donc, on peut utiliser les BTC pour la construction des bâtiments dans les régions humides où les précipitations annuelles sont supérieures à 500 mm.

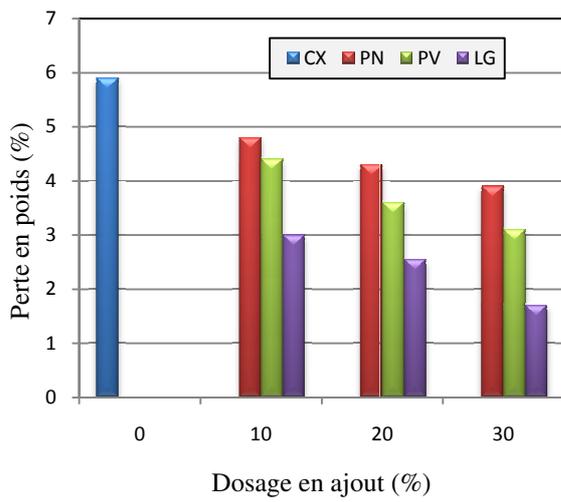
Le taux de diminution des pertes en poids en fonction du temps de cure est présenté dans le tableau 3.12. Les résultats du tableau 3.12 montrent que le taux de diminution de la perte en poids est augmenté avec le dosage en ajouts pour les différents âges de cure. Cependant, lors d'un âge de durcissement de (28-56 jours), le taux de diminution de la perte en poids pour différents dosages en ajouts, a tendance à être plus important lorsque comparé à celui de l'âge de (56-90). Le taux de diminution de la perte en poids pour les briques stabilisées par 30 % d'ajouts, donne les meilleurs résultats à tous les âges de durcissement, il est de l'ordre de 61.29 %, 64.42 % et 70.96 % à l'âge de 180 jours par rapport à 28 jours de cure pour l'ajout de NP, PV et LG respectivement. Ces valeurs montrent que le laitier donne les meilleurs résultats suivis par la poudre de verre puis la pouzzolane naturelle. On remarque aussi qu'il n'y a pas une grande différence entre ces pourcentages. La diminution importance de la perte en poids avec l'augmentation du temps de cure est due essentiellement à la lenteur des réactions pouzzolaniques engendrée par la réaction sol chaux et chaux- ajouts.



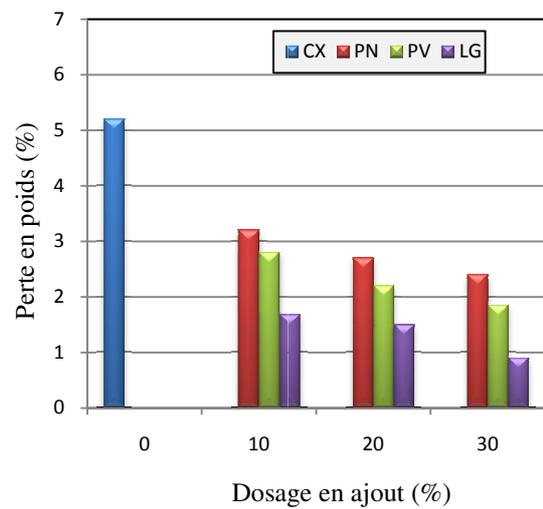
a- 28 jours



b- 56 jours



c- 90 jours



d-180 jours

Fig. 3.20 : Influence du dosage en ajout sur la perte en poids aux différents âges.

Tableau 3.12 : Taux de diminution de la perte en poids.

Temps de cure (jours)	Taux de diminution de la perte en poids (%)									
	Dosage d'ajout									
	0	10			20			30		
		PN	PV	LG	PN	PV	LG	PN	PV	LG
28-56	7.35	15.38	15.25	20	20.63	20.37	20.51	22.58	26.92	29.03
56-90	6.34	12.72	12.0	16.66	14.0	16.27	17.74	18.75	21.52	22.72
90-180	9.66	33.33	36.36	44	37.20	38.88	41.11	38.46	52.25	41.17
28-180	32.52	50.07	53.33	62.66	57.14	59.25	61.53	61.29	64.42	70.96

3.3.2 Gonflement

Le sol (SOLK) est constitué par le minéral argileux l'illite, qui est considéré pour sa stabilité dans l'eau. Par contre, il contient un taux important de SO_3 qui s'oxyde et réagit avec d'autres minéraux contenus dans le sol pour former des sulfates. Cette transformation induit une augmentation du volume. Ces sulfates aussi réagissent avec la chaux pour former d'ettringite. Plusieurs recherches ont traité ce problème; dans la stabilisation des sols, par l'ajout de laitier activé par la chaux (Wild, 1998, Celik, 2013), les résultats ont été satisfaisants. Dans cette étude on a étudié l'effet des ajouts minéraux (pouzzolane naturelle, la poudre de verre, et le laitier) sur le gonflement des BTC.

La figure 3.21 présente l'effet du dosage en ajouts sur le gonflement aux différents âges. D'après cette figure, on constate que le gonflement par émergence est diminué avec l'augmentation du dosage en ajout et temps de cure. À 28 jours, l'analyse des valeurs montrent que la diminution du gonflement des briques BKXP est légèrement inférieure aux briques sans ajout. En termes de valeurs, cette diminution est de 8.8 % pour l'ajout de 30 % de NP. Néanmoins, la diminution du gonflement est de : 15.2 %, 16.8 % pour 30 % de PV et LG respectivement. Avec l'augmentation du temps de cure, ce gonflement continue de diminuer jusqu'à la valeur de 0.068 %, obtenue par l'ajout de 30 % de LG à 180 jours. Les valeurs les plus élevées du gonflement sont celles de BKXP suivies par les valeurs de BKXV, alors que les valeurs les plus basses correspondent aux valeurs de BSKXL. A titre d'exemple, à 180 jours et 30 % de NP, PV et LG, les valeurs de gonflement sont : 0.104 %, 0.076 % et 0.068 % respectivement. L'incorporation des ajouts (PN, PV et LG) diminue significativement le

gonflement grâce à la formation de liants de cimentation issus de la réaction pouzzolanique développée avec le temps.

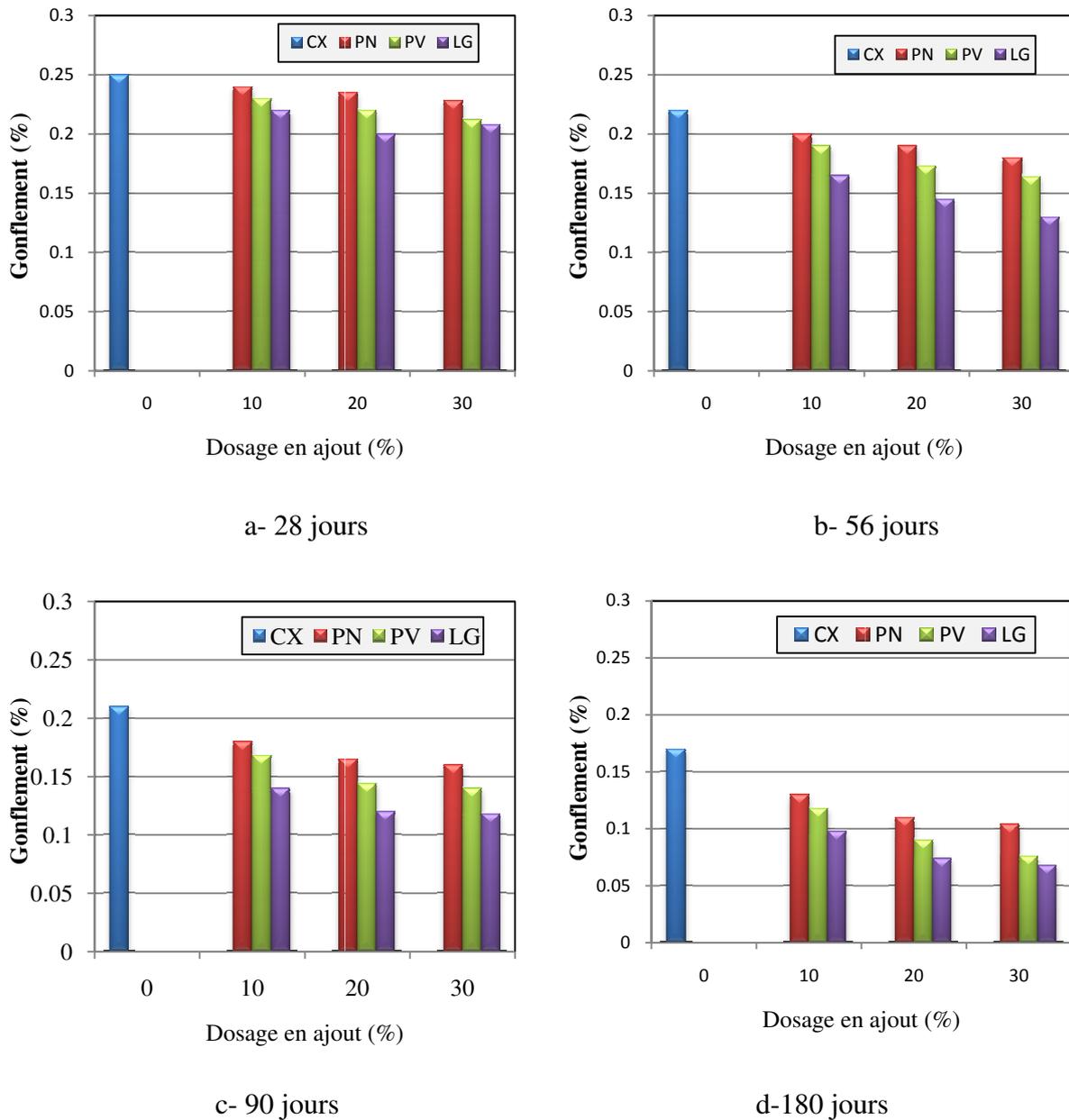


Fig. 3.21 : Influence du dosage en ajout sur le gonflement aux différents âges.

Le tableau 3.13 représente le taux de diminution du gonflement dans le temps. On constate que le gonflement des briques stabilisées par 10 % de chaux est diminué avec l'augmentation du temps de cure. En termes de pourcentage, la diminution du gonflement est de 34 % dans l'intervalle (28-180 jours). Ces résultats sont en accord avec les études antérieures (Bel, 1996, ; Nalbantoglu et Tuncer, 2001 ; Khattab , 2002 ; Al-Rawas et al, 2005 ; Lasladj, 2008) où il est constaté que le gonflement diminue immédiatement lorsque une

quantité de chaux suffisante est ajoutée au sol argileux. Ce comportement est expliqué par l'échange des cations inter-foliaire par les cations de calcium. Cet échange cationique attribué à la réduction des argiles a absorbé l'eau. La diminution du gonflement en fonction du temps de cure s'explique par le développement des nouveaux hydrates issus de la réaction pouzzolanique. Le taux de diminution du gonflement aussi est augmenté avec le dosage des ajouts pour différents temps de cure (tableau 3.13), il est supérieur au taux des BKX. Ce taux de diminution du gonflement est irrégulier. A titre d'exemple, la diminution du gonflement dans l'intervalle (28-56 jours) pour différents dosages en ajouts, a tendance à être plus important lorsqu'il comparé à celui de l'intervalle de (28-56 jours) et l'intervalle de (56-90 jours).

Tableau 3.13 : Taux de diminution du gonflement.

Temps de cure (jours)	Taux de diminution du gonflement (%)									
	Dosage d'ajout									
	0	10			20			30		
		PN	PV	LG	PN	PV	LG	PN	PV	LG
28-56	12.0	16.66	17.39	25	19.14	21.36	27.5	21	22.64	37.5
56-90	4.34	10	13.15	15.24	13.15	17.71	17.24	11.11	15.15	30.76
90-180	25.0	27.77	29.76	30	33.33	34.04	38.33	35.0	36.02	44.44
28-180	34.0	45.83	48.69	55.45	53.19	56.81	63	54.38	64.15	67.92

3.3.5 Résistance à l'abrasion

Le test de résistance à l'abrasion illustre l'érosion d'échantillons de BTC sous l'action abrasive par le vent sable en essayant de simuler les conditions dans les zones sèches et arides. Selon Smith et Webb (1987), la résistance à l'abrasion est indépendante de la forme et la taille du bloc. L'influence du dosage en ajout sur le coefficient d'abrasion aux différents âges est illustrée dans la (figure 3 .22). L'analyse des résultats montre que le coefficient d'abrasion augmente avec l'augmentation de la teneur en ajout et avec le temps de cure. A l'âge de 28 jours, le taux d'augmentation dans la gamme (0 à 30 % d'ajout) est de l'ordre de 22 %, 28.66 % et 38% pour l'ajout de PN, PV et LG respectivement. Le taux d'augmentation dans l'intervalle (28 à 56 jours) est plus grand que dans l'intervalle (56 à 90 jours) voir (le tableau 3.14). À long terme à l'âge de 180 jours, le taux du coefficient d'abrasion est

important, on peut expliquer ces résultats par le développement des liants de cimentation issus des réactions pouzzolaniques de la poudre de verre et pouzzolane naturelle, qui améliorent la cohésion de surface de BTC.

Toutes les valeurs du coefficient d'abrasion sont supérieures aux coefficients minimaux recommandés par les normes des BTC (NF XP 13-901), qui sont égales à 2 cm²/g.

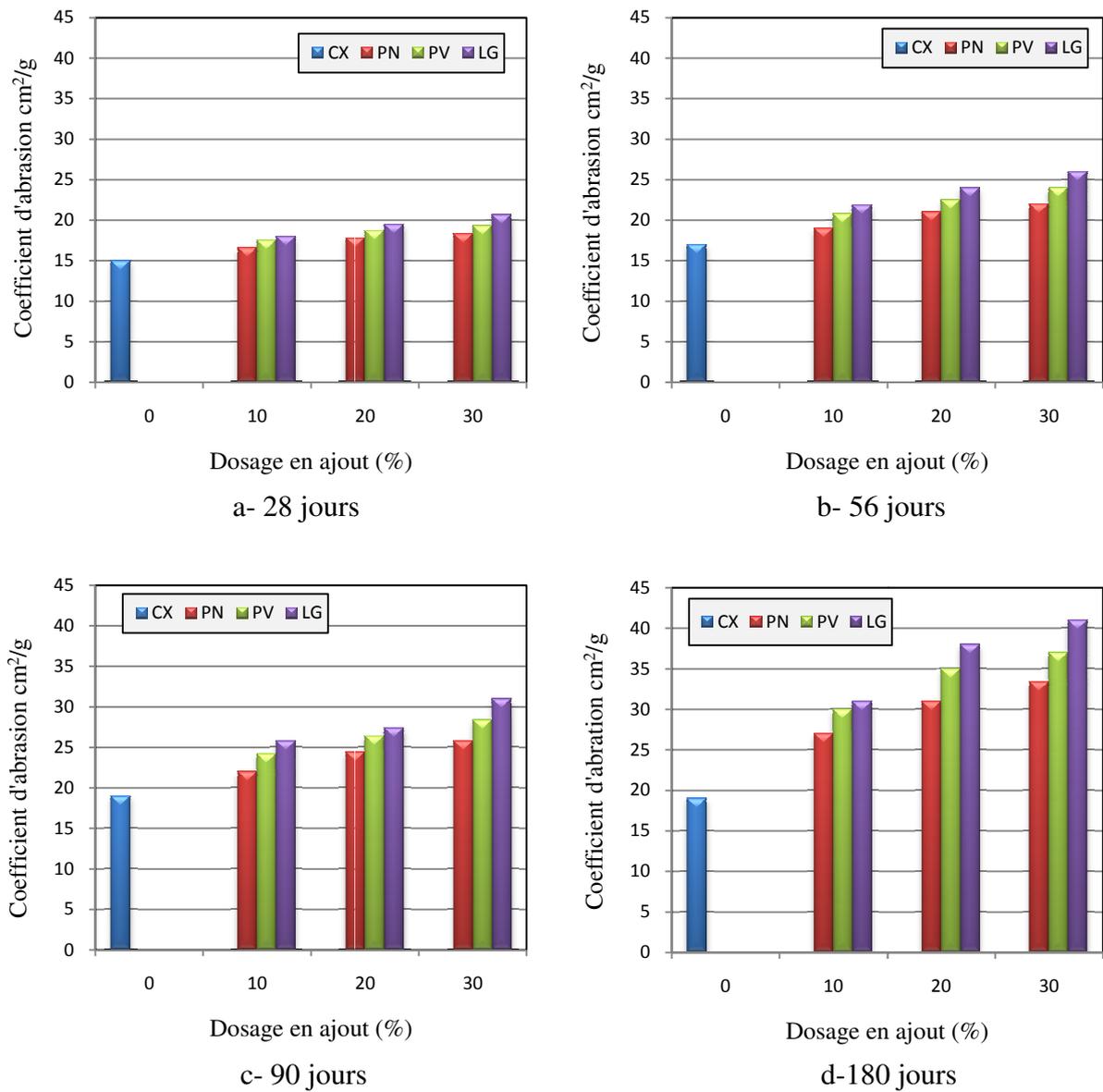


Fig. 3.22: Influence du dosage en ajout sur le coefficient d'abrasion aux différents âges

Tableau 3.14 : Le taux d'augmentation du coefficient d'abrasion.

Temps de cure (jours)	Taux d'augmentation du coefficient d'abrasion (%)									
	Dosage d'ajout									
	0	10			20			30		
		PN	PV	LG	PN	PV	LG	PN	PV	LG
28-56	7.35	16.86	18.85	21.66	17.97	20.32	23.07	20.21	24.35	25.6
56-90	6.34	13	16.34	17.27	16.19	17.33	18.33	17.27	18.33	19.23
90-180	9.66	22.72	23.96	24.31	27	32.57	33.8	29.45	30.28	32.25
28-180	23.35	52.58	59.15	63.24	61.16	70.22	75.2	66.93	72.96	77.06

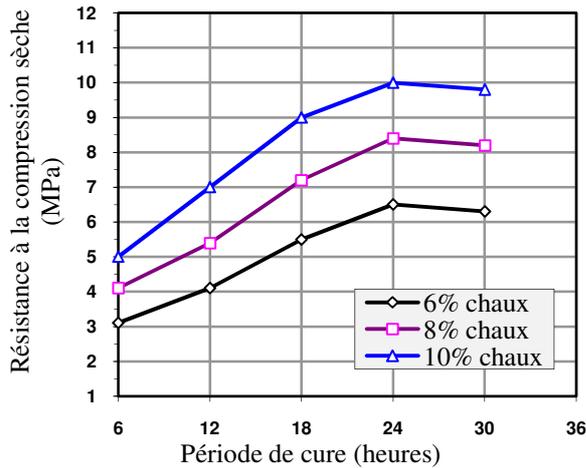
3.4 Influence du mode de cure sur les résistances mécaniques et la durabilité des BTC

3.4.1 Influence de la période de cure à la vapeur sur les résistances mécaniques

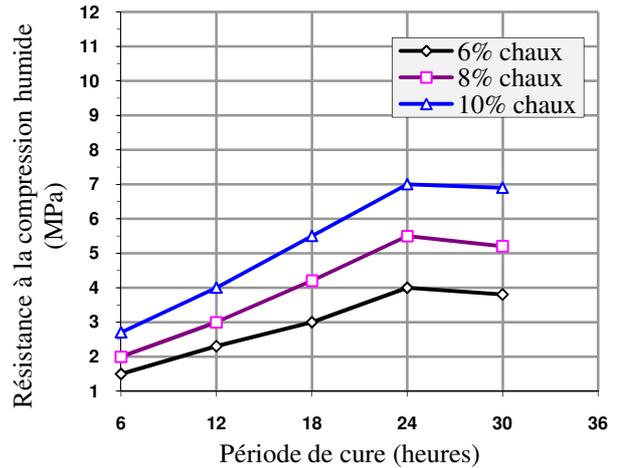
Pour caractériser l'évolution des résistances mécaniques en fonction du temps de cure par vapeur, nous avons opté pour une composition à base du SOLK stabilisée à 6, 8 et 10 % de chaux et avec une teneur en sable constante de 30 %. Les briques sont compactées à 5 MPa, et conservées dans l'enceinte climatique à 75 °C et 100 % d'humidité pendant 6, 12, 18, 24 et 30 heures, puis séchées dans l'étuve à 60 °C. Sur la figure 3.23, nous avons représenté l'illustration graphique des résultats des résistances (RCS, RCH, RTS) en fonction du temps de cure par vapeur pour différents teneurs en chaux.

La résistance à la compression sèche augmente avec le temps de cure jusqu'à 24 heures pour donner la meilleure résistance voir (figure 3.23 a). Au-delà de cette valeur, il y a une diminution de la résistance pour différents teneurs en chaux. La résistance augmente de l'ordre d'environ 100 %, lorsque le temps de cure augmente de 6 à 24 h. Comme mentionné dans la revue bibliographique, la température élevée accélère la cinétique des réactions pouzzolaniques (Arabi et Wild ; 1998 et Rao et Shivananda 2005 ; lasladj 2009 ; cabane, 2004). Les résultats indiquent également que la résistance en compression sèche augmente d'une manière significative de 6 % à 10 %, Cette croissance de la résistance est due à l'augmentation du potentiel de cations échangeables du calcium apporté par la chaux (Bell, 1996).

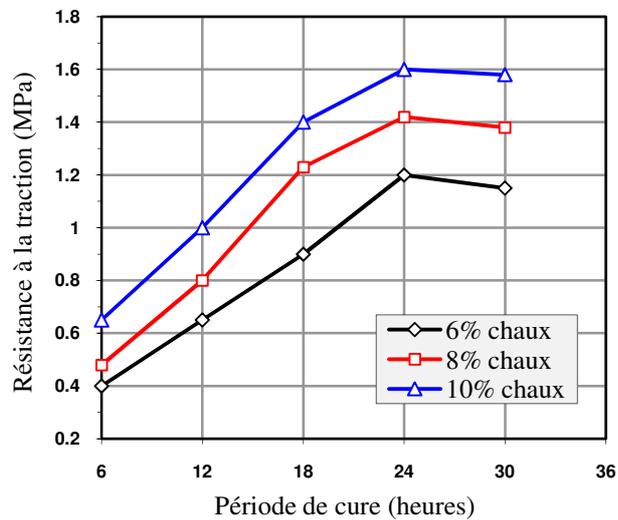
Pour la résistance à la compression humide voir (figure. 3.18 b), l'interprétation des résultats suit les mêmes critères d'évaluation cités précédemment (résistance à la compression sèche). La résistance à la compression humide augmente avec l'évolution du temps de cure jusqu'à 24 heures pour donner la meilleure résistance. Au-delà de cette valeur, il y a une diminution de la résistance pour différents teneurs en chaux. Ceci est en accord avec (Venkataraman et al, 2002).



(a)



(b)



(c)

Fig. 3.23 : Variation des résistances en fonction du temps de cure par vapeur: (a) : RCS, (b) : RCH, (c) : RTS

L'analyse des courbes de la figure (3.18 c) montre que la résistance à la traction augmente en fonction du temps de cure jusqu'à 24 heures pour les différents teneurs en chaux. Pour les intervalles (6 à 12 heures) et (12 à 18 heures) l'évolution de la résistance est plus importante que pour l'intervalle (18 à 24 heures) pour différents teneurs en chaux. Par exemple, pour les briques stabilisées à 10 % en chaux, l'évolution de la résistance est de l'ordre de 40 % pour l'intervalle (18 à 24 %) et 14 % pour l'intervalle (18 à 24 heures).

Au-delà de 24 heures il y a une chute de résistance en traction pour toutes les teneurs en chaux. L'analyse des valeurs montre que la brique stabilisée par 10 % en chaux et curée à 24 heures donne la meilleure résistance à la traction qui atteint une valeur de 1.6 MPa.

3.4.2 Influence des méthodes de cure sur les résistances mécaniques

Les résistances mécaniques (résistance à la traction et résistance à la compression sèche et humide) pour les briques curées à la vapeur et pour les briques humides curées à la température ambiante sont présentées sur le tableau 3.15

Tableau 3.15 : Comparaison entre les résistances

<i>Conditions de cure</i>	<i>Dosage en chaux (%)</i>	<i>RTS (MPa)</i>	<i>RCS (MPa)</i>	<i>RCH (MPa)</i>
Cure par vapeur à 24h	6	1,2	6,5	4
	8	1,42	8,4	5,5
	10	1,58	10	7
Cure humide à 28 jours	6	0,5	3	2,1
	8	0,60	3,7	2,7
	10	0,68	4,8	3,4
Cure humide à 18 mois	6	1,25	7,1	5
	8	1,48	9	6,2
	10	1,65	11,65	8,4

Les résultats obtenus montrent que la cure par vapeur des briques augmente de manière significative la résistance à la traction sèche et la résistance à la compression sèche et humide, lorsqu'ils sont comparés aux résistances des briques curées par voie humide à 28 jours à température ambiante. La cure par vapeur conduit à doubler les résistances par rapport aux briques curées à 28 jours à température ambiante. Cependant, les résistances mécaniques des BTC curées par vapeur à environ 24 h sont à proximité des résistances mécaniques des

BTC curées par une température ambiante à 18 mois. Ceci pourrait être expliqué par la cure par vapeur, qui a provoqué l'accélération d'hydratation et la réaction pouzzolanique entre la chaux et le sol (Venkataraman et al. 2002).

Ces résultats peuvent être confirmés que :

- La cure à 24 h par vapeur à 75°C est suffisante pour atteindre presque des résistances maximales (résistance à la traction à sec compression, sec et humide force) pour la BTC stabilisée par la chaux.
- La cinétique de la réaction pouzzolanique est très lente à température ambiante plusieurs mois avant que ses effets puissent être appréciés.

En effet, la cure par vapeur pendant environ 24 h à 75° C peut accélérer ces réactions conduisant à une haute résistance pour la BTC. Ces résultats sont conformes à ceux rapportés par d'autres auteurs (Venkataraman et al, 2002; Bell, 1996).

3.4.3 Influence de la teneur en pouzzolane naturelle

Pour étudier l'influence de la pouzzolane naturelle sur les propriétés mécaniques et la durabilité des briques de terre comprimée, les échantillons ont été préparés à partir de traitement mixte (pouzzolane de chaux naturelle) et ont subi une cure par vapeur pendant 24 h et compactés à 5 MPa.

3.3.3.1 Résistance à la compression sèche

L'effet de la variation du dosage en NP sur la résistance à la compression du BTC est illustré sur la (figure 3.24). A partir de ces résultats, on peut constater que la teneur en chaux et NP dans les BTC a une influence significative sur RCH. Les résistances augmentent de manière significative avec l'augmentation de la teneur en NP. En termes de pourcentage, elle est de l'ordre de 45, 59 et 60 % comme NP croît de 0 à 30 % pour 6, 8, 10 % de chaux respectivement. Cette résistance peut être à nouveau expliquée par la réaction entre la chaux et la pouzzolane naturelle fournie par les minéraux du sol. Ces réactions sont accélérées par la cure par vapeur (Venkataraman et al., 1993 ; 1998 ; 2002 ; 2011). Pour tous les pourcentages de chaux l'optimum de la teneur de NP est d'environ 30 %, au-delà du quel il y a une diminution de la résistance à la compression sèche. Au delà de cette valeur, le NP n'aura pas de chaux suffisante pour les réactions pouzzolaniques et donc il restera comme une charge inerte sans contribuer beaucoup au gain de résistance (Venkataraman et al, 2002). La valeur

maximale de RCS est de 16 MPa obtenue par la BTC stabilisée par 10 % en chaux et 30 % en NP.

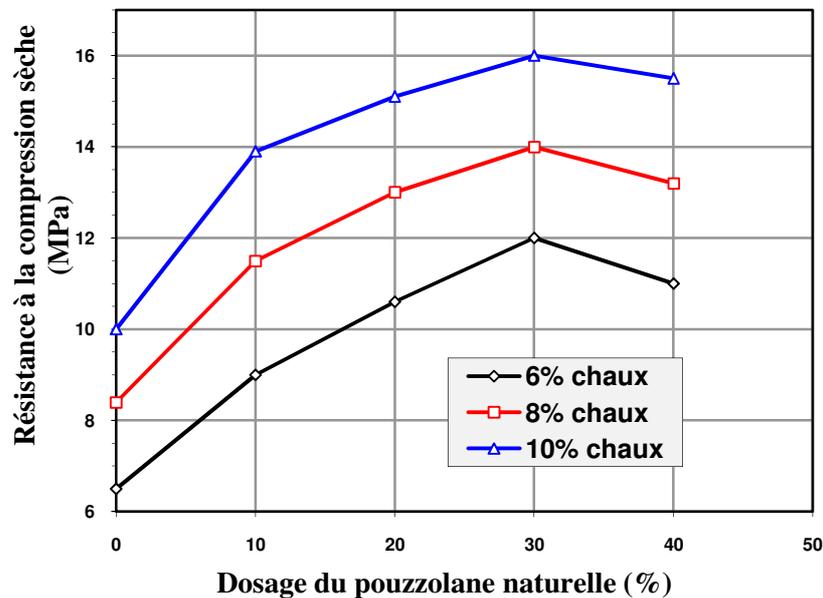


Fig. 3.24 : Influence du dosage en pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression sèche (cure par vapeur à 24 h)

3.4.3.2 Résistance à la compression humide

La figure 3.25 montre l'effet du dosage de la pouzzolane naturelle sur la résistance à la compression humide pour différents pourcentages en chaux. En général, la RCH augmente avec l'augmentation de la teneur en PN entre 0 et 30 % pour différents teneurs en chaux. Par exemple, il varie de 7 à 14,72 MPa lorsque la teneur en NP varie de 0 à 30 % pour 10 % en chaux. L'incorporation de 30 % NP a abouti à un doublement de la RCH dans les briques pour tous les teneurs en chaux. Cela s'explique par l'effet de la cure par vapeur qui accélère la réaction pouzzolanique de NP et de chaux avec les constituants minéraux du sol ayant tendance à augmenter la résistance à la compression humide. Un comportement similaire a également été observé dans le cas des BTC destinées à la maçonnerie, stabilisée par un traitement mixte chaux et les cendres volantes et curées à la vapeur (Venkataraman et al. 2002). La substitution partielle de la chaux par un matériau tel que la pouzzolane naturelle ainsi semble être un moyen efficace d'augmenter la RCH. Ces résultats sont également susceptibles d'être utiles surtout pour les BTC exposées à des conditions environnementales sévères.

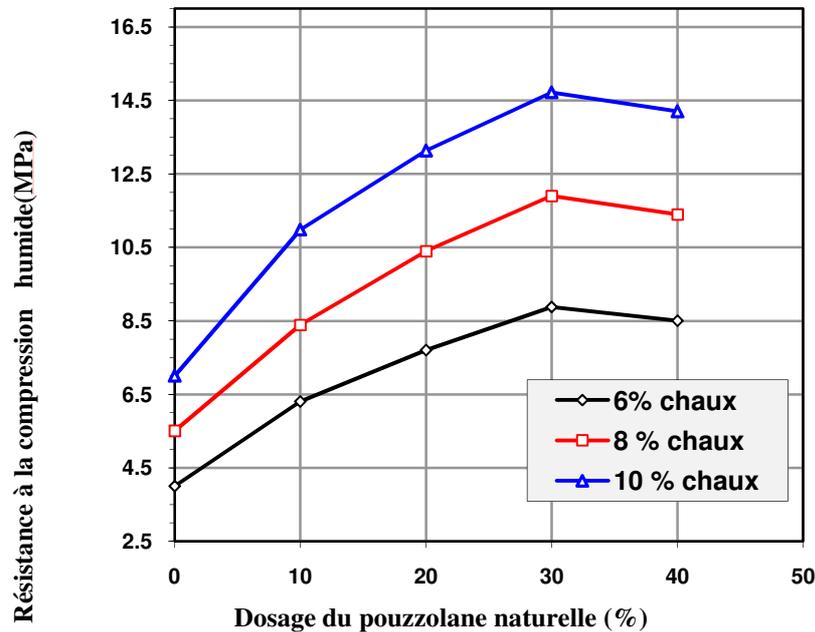


Fig.3.25 : Influence du dosage en pouzzolane sur la résistance à la compression humide (cure par vapeur à 24 h)

3.4.3.3 Coefficient de résistance à l'eau

L'effet de la teneur de pouzzolane naturelle pour différents teneurs en chaux sur le coefficient de résistance à l'eau (CR) était étudié expérimentalement; les valeurs obtenues sont représentées sur la (figure 3.26). Le coefficient de résistance à l'eau augmente avec l'augmentation de la teneur en NP pour différents teneurs en chaux. Pour 10 % de la chaux et dans la gamme (0-30 %) de NP, le coefficient de résistance à l'eau augmente de 0,70 à 0,92. Tenons compte des recommandations prescrites pour les coefficients de résistance à l'eau qui ne devraient pas être inférieures à 0.5 (Houben et al., 1996). Les résultats obtenus pour les briques BKX et les briques BKXP se situent bien dans cette limite. Cependant, le CR des briques BKX (0,61 à 0,70) est beaucoup inférieur à celui des briques stabilisées par la chaux et 30 % de NP (0,80 à 0,92). L'écart entre la résistance à la compression sèche et humide caractérise un matériau durable.

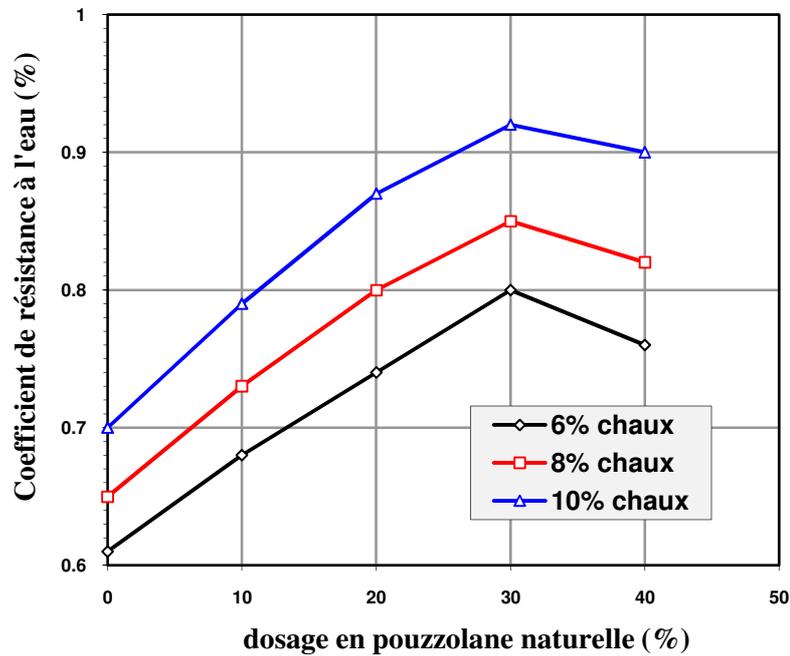


Fig.3.26 : Influence du dosage en pouzzolane sur le coefficient de résistance à l'eau (cure par vapeur à 24 h)

3.4.3.4 Résistance à la traction sèche

La figure 3.27 montre l'influence des différentes teneurs en NP avec différents pourcentages en chaux sur la résistance à la traction sèche. L'analyse des courbes indique clairement que la résistance à la traction sèche augmente avec l'augmentation du dosage en NP de 10 à 30 % pour différentes teneurs en chaux. Au-delà de cette valeur la RTS décroît quelle que soit la teneur en chaux. Un comportement similaire a été observé pour la résistance à la compression sèche et humide. Pour 10 % de chaux la RTS varie de 1,58 à 1,86 MPa, lorsque la teneur en PN est comprise entre 0 et 10 %. Par contre la RTS varie de 1,86 à 1,98 MPa et 1,98 à 2,10 MPa pour la teneur de NP comprise entre 10-20 et 20 à 30 %, respectivement. Ces valeurs montrent que pour la plage (0-10 %) du dosage en NP le développement de la résistance est plus important que pour la gamme (10-20 % et 20-30 %) ; même remarque pour 6 et 8% de la chaux. Il peut également être observé l'augmentation de la RTS d'environ 33% avec une variation de NP entre 0 et 30 %, pour toutes les teneurs en chaux.

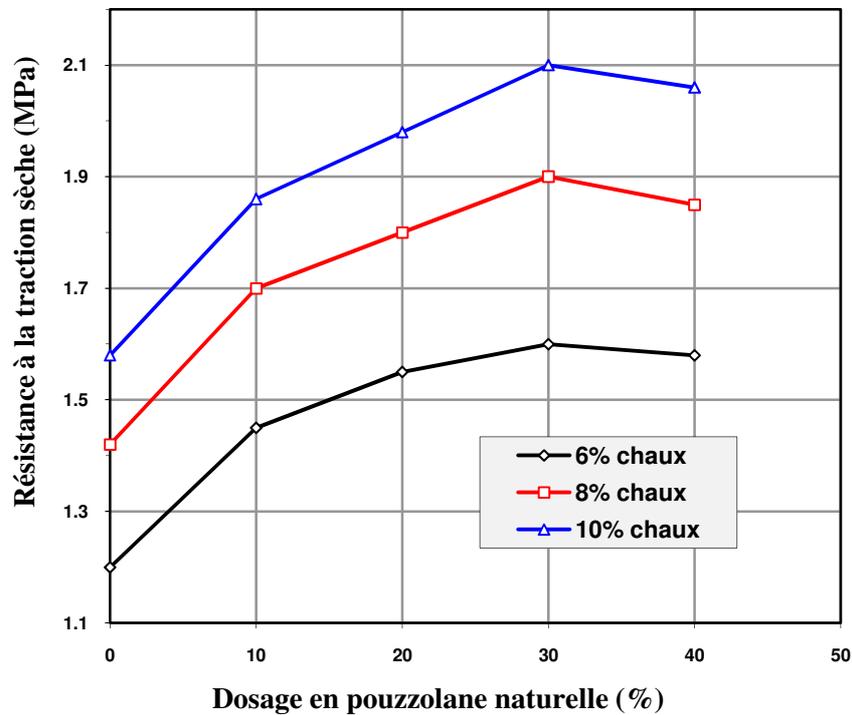


Fig.3.27 : Influence du dosage en pouzzolane sur la résistance à la traction sèche (cure par vapeur à 24 h)

3.4.3.5 Absorption capillaire

La figure 10.28 montre que l'absorption capillaire diminue avec l'augmentation de la teneur en chaux et le dosage en NP. En effet, elle varie de 12,23 % à 10,5 % lorsque la teneur en chaux varie de 6 % à 8 %. Pour le cas de 10 % de chaux, la valeur d'absorption capillaire varie de 10,5 à 5,3 % lorsque la pouzzolane naturelle varie de 0 à 30%. Au-delà de 30 % NP l'absorption capillaire reste constante pour toutes les teneurs de la chaux. L'effet positif de la réduction de l'absorption capillaire des briques avec l'incorporation de la pouzzolane naturelle peut s'expliquer par le fait de la cimentation des particules du sol en même temps que par le remplissage de l'espace des pores dans le sol et la prévention de la réorientation et de la floculation des particules du sol (Broderick et Daniel 1990).

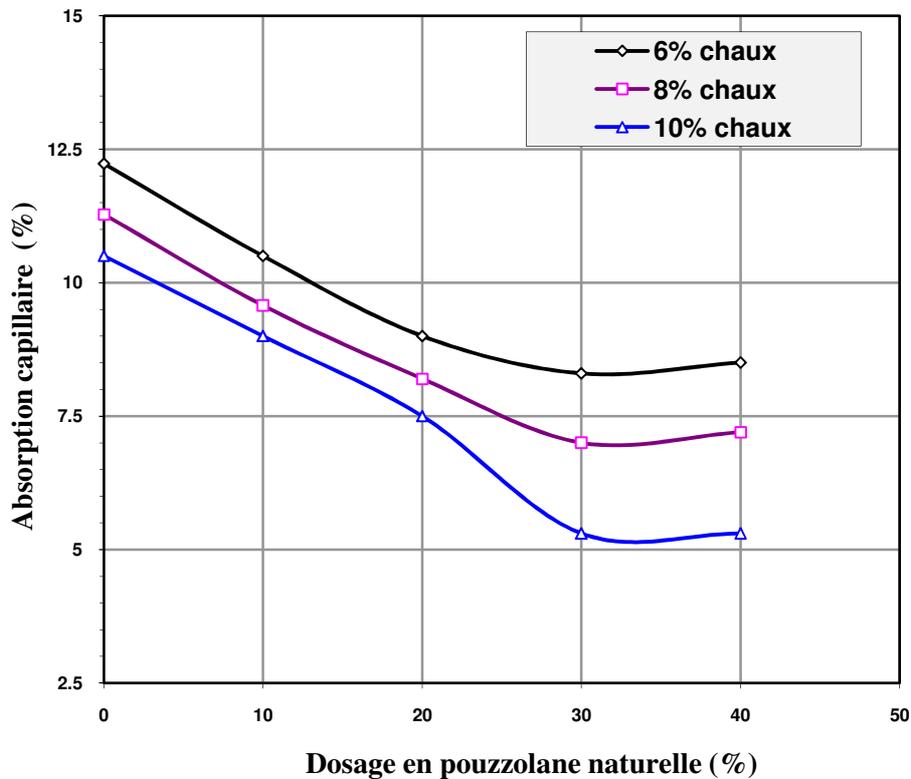


Fig. 3. 28 : Influence du dosage en pouzzolane naturelle sur l'absorption capillaire (cure par vapeur à 24 h)

3.4.3.5 Absorption totale

L'absorption totale est obtenue par l'essai d'ébullition (5 heures). La figure 3.30 montre clairement qu'il y avait une diminution générale de l'absorption d'eau avec l'augmentation de la proportion de pouzzolane naturelle et teneur en chaux. On peut constater la diminution de l'absorption d'eau d'environ (33, 43 et 50 %) avec une variation de la pouzzolane naturelle de 0 à 30 % pour 6 %, 8 % et 10 % de chaux, respectivement. Au-delà de 30% de NP, l'augmentation de la teneur en NP ne résulte pas d'une réduction remarquable de l'absorption. La valeur de l'absorption d'eau reste d'abord autour de 13,5 % pour 6 % de chaux qui est inférieure à la valeur maximale recommandée de 15 % (IS 1725 1982). Les valeurs de l'absorption totale pour les briques stabilisées par la chaux et la pouzzolane naturelle étaient

considérablement inférieures aux valeurs recommandées. L'absorption minimale d'eau est d'environ 5,6 % pour la BTC stabilisée par 10 % en chaux et 30 % en pouzzolane naturelle.

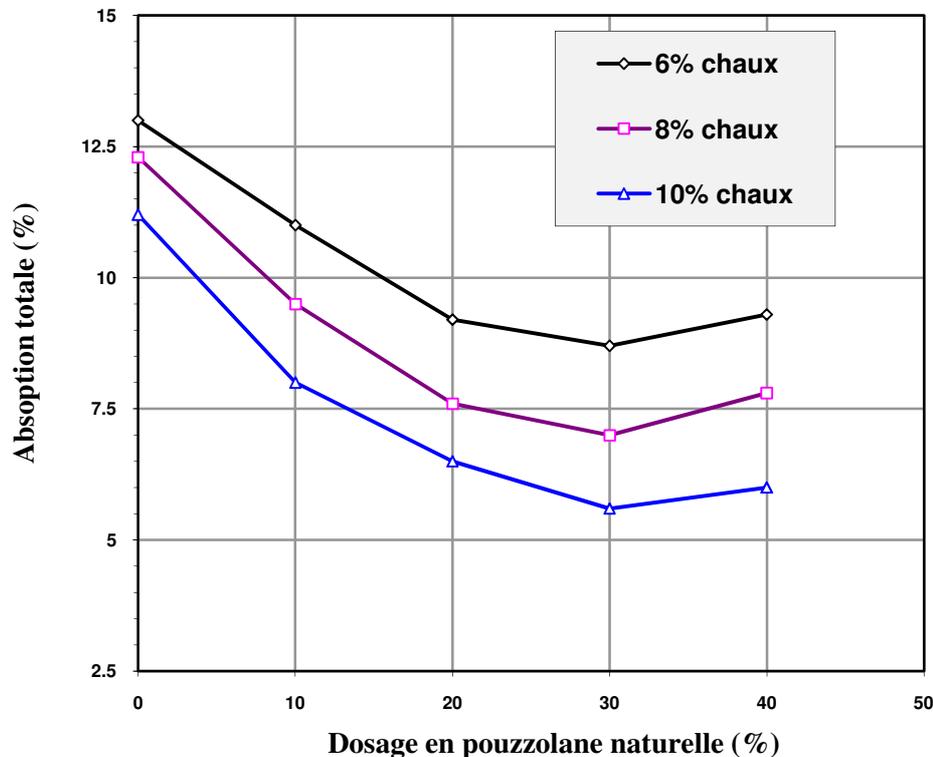


Fig. 3.29 : Influence du dosage en chaux sur l'absorption totale (cure par vapeur à 24 h)

3.4.3.6 Séchage/mouillage

Selon USACE (2003), la durabilité des argiles stabilisées par la chaux et la pouzzolane est proposée comme la perte de poids maximale de 14 %. Mais pour Fitzmaurice (1958), il a recommandé des limites sévères pour la perte de poids selon la norme ASTM D559 pour les bâtiments situés dans les zones urbaines : 5 % dans les régions à précipitations annuelles <500 mm et 10 % dans les régions où les précipitations annuelles > 500 mm. Les résultats illustrés sur la (figure 3.30) montrent la perte en poids après 12 cycles de séchage / mouillage compris entre (6.2 et 1 %). Il est connu que la pluviométrie annuelle ne dépasse pas 500 mm. Donc, dans la région de Biskra l'ensemble des BTC satisfont au critère de durabilité. L'ajout de NP de (10-30 %) a diminué de manière significative la perte de poids. Par conséquent, et en termes de pourcentage, la diminution de la perte en poids est de l'ordre de 40,32, 57,44 et 62 % pour 6, 8 et 10 % de chaux respectivement. Cependant, à des teneurs (30-40 %) de NP la

perte en poids diminue pour tous les cas de la chaux. Ainsi, toutes les briques stabilisées par l'ajout de la pouzzolane naturelle sont inférieures à 5 %. Donc, on peut les utiliser pour la construction des bâtiments dans les régions humides où les précipitations annuelles sont supérieures à 500 mm.

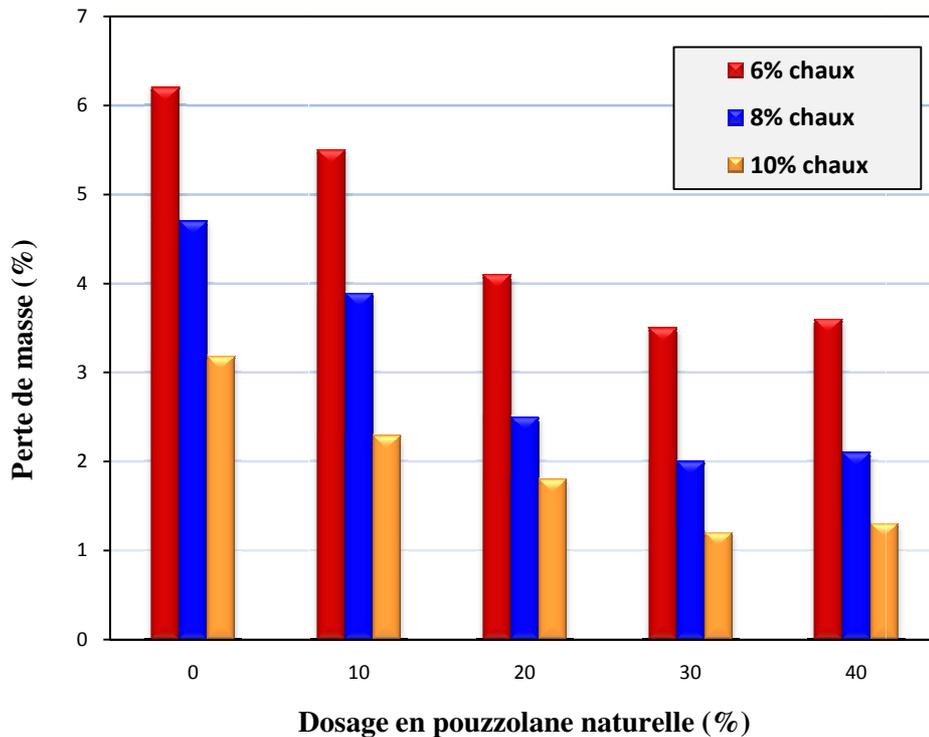


Fig. 3.30 : Influence du dosage en chaux sur la perte de masse (cure par vapeur à 24)

3.4.3.7 Résistance à l'abrasion

Les résultats illustrés sur la Figure. 3.31 mettent en évidence l'effet positif de l'addition de NP (au niveau de 10-30 %) sur la résistance à l'abrasion pour les différents teneurs en chaux. En effet, L'augmentation de la résistance à l'abrasion est de l'ordre de 111,6, 118,3 et 120 % avec l'évolution de NP de 0 à 30 % pour 6, 8 et 10 % en chaux respectivement, Cependant, pour 40 % de NP, il y a une diminution de la résistance à l'abrasion pour différents teneurs en chaux.

L'augmentation significative de résistance à l'abrasion est due à la cure par vapeur qui accélère le développement de nouveaux hydrates.

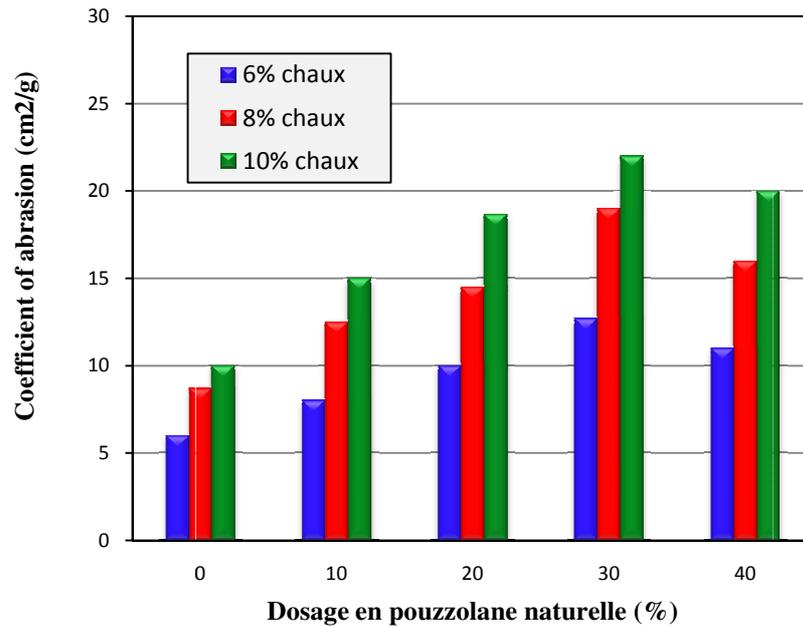


Fig. 3.31 : Influence du dosage en chaux sur le coefficient d'abrasion (cure par vapeur à 24)

3.5 Conclusion

Le présent chapitre était consacré à l'étude de l'effet des ajouts minéraux sur les résistances mécaniques et la durabilité des BTC. Cette étude a été réalisée en trois phases.

- Première phase : les effets du dosage des ajouts minéraux et la nature des sols sur les résistances mécaniques des BTC stabilisé par différents dosage en chaux.
- Deuxième phase : l'effet du dosage dans le temps de différents ajouts sur les résistances mécaniques et la durabilité des BTC à base du SOLK.
- Troisième phase : l'effet des conditions de cure sur les résistances mécaniques et la durabilité des BTC à base du SOLK stabilisées par la chaux et l'ajout de la pouzzolane.

À la lumière des résultats obtenus le long de cette étude expérimentale, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Le traitement de deux sols à un dosage en chaux plus élevé que le point de fixation de la chaux augmente les résistances mécaniques de ces matériaux.
- À l'âge de 28 jours, l'ajout de la pouzzolane naturelle jusqu'à une teneur de 30 % a conduit à une légère augmentation des RCS, RCH et RCT pour les deux types de sols.

- Les RCS, RCH et RCT augmentent avec l'augmentation des teneurs en poudre de verre jusqu'à une teneur de 30 %, à l'âge de 28 jours pour les deux types de sols.
- Une augmentation significative des RCS, RCH et RCT pour les BTC stabilisée par l'ajout du laitier à l'âge de 28 jours, cette augmentation évolue avec l'augmentation du dosage en laitier.
- Les BTC à base du SOLK donnent de meilleures résistances par rapport aux BTC à base du SOLA
- Les BTC stabilisées par l'ajout du laitier et de la poudre de verre donnent des RCS, RCH et RCT meilleures que les BTC stabilisées par l'ajout de la pouzzolane, à l'âge de 28 jours.
- A 28 jours, le coefficient de résistance à l'eau augmente avec l'évolution du dosage en chaux et du dosage en ajout, ces valeurs sont inférieures à 0.5, qui est la limite recommandée par certains auteurs (Houben, 2006).
- Il y a un gain des résistances (RCS, RCH et RTS) significatif à partir de 56 jours de cure pour l'ajout de 30 % de (NP, PV et LG).
- L'augmentation significative de la résistances à la compression humide à long terme à l'âge de 180 jours par rapport à l'âge de 28 jours, est de l'ordre de 46.34 %, 48,53 % et 53.73 % pour l'ajout de 30 % de la pouzzolane naturelle, la poudre de verre et le laitier respectivement.
- L'augmentation des résistances (RCS, RCH et RTS) dans le temps de 28 à 56 jours est plus importante que dans le temps de 56 et 90 jours pour différents dosages en ajout (NP, PV et LG)
- La perte en poids lors de l'essai de séchage/mouillage diminue avec l'augmentation du dosage en ajout et avec le temps de cure pour les BTC à base du SOLK.
- La diminution importante des pertes en poids à long terme à l'âge de 180 jours par rapport à l'âge de 28 jours, est de l'ordre de 61.29, 64.42 et 70.96 % pour l'ajout de la pouzzolane, la poudre de verre et le laitier respectivement.
- La diminution de l'absorption totale et capillaire augmente avec le dosage des ajouts (PN, PV et LG) et temps de cure.
- Le gonflement par immersion diminue avec l'augmentation du dosage en ajouts et avec le temps de cure pour les BTC à base du SOLK.
- La diminution significative du gonflement par l'ajout du laitier atteint un taux de 75.97% à 180 jours par rapport à 28 jours.

- Le coefficient d'abrasion augmente avec l'augmentation du dosage en ajouts avec le temps de cure pour les BTC à base du SOLK.
- L'augmentation importante du coefficient d'abrasion à long terme à l'âge de 180 jours par rapport à l'âge de 28 jours, elle est de l'ordre de 66.93 %, 72.96 % et 77.06 % pour l'ajout de la pouzzolane, la poudre de verre et le laitier respectivement.
- Le taux de diminution de (l'absorption totale et capillaire, la perte en poids, le gonflement) et le taux d'augmentation du coefficient de l'abrasion dans le temps de 28 à 56 jours sont plus importants que dans le temps de 56 et 90 jours pour différents dosages en ajout (NP, PV et LG)
- La cure par vapeur à 24 heures accélère le durcissement des BTC à la chaux et donne des meilleures résistances mécaniques surtout la résistance en compression humide par rapport au durcissement à l'atmosphère humide à 28 jours.
- Les résistances mécaniques des BTC stabilisées par la chaux et curées par vapeur à environ 24 h sont proches aux résistances mécaniques des BTC curées à 18 mois à l'atmosphère humide.
- L'addition de petites quantités de la pouzzolane naturelle avec la chaux améliore significativement les propriétés mécaniques et la durabilité : l'absorption totale et capillaire, séchage/mouillage et l'abrasion des BTC curées par vapeur à 24 heures.
- la cure par vapeur à 24 heures des BTC stabilisées par la chaux et la pouzzolane à réduit l'écart entre la résistance à la compression humide et sèche.

CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GENERALE

Des ajouts de différentes natures ont été étudiés dans le but de constater leurs effets sur les résistances mécaniques et la durabilité des briques de terre comprimée (BTC) : de la poudre de verre, de la pouzzolane naturelle et du laitier granulé. Le choix de ces matériaux est justifié par leur faible coût et par leur abondance en quantités importantes en Algérie.

Pour atteindre notre but, nous avons scindé notre étude en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à la revue bibliographique qui a permis de mettre en évidence l'intérêt de recherches sur la stabilisation des briques de terre comprimée (BTC) par la chaux avec les ajouts minéraux. Il faut noter que plusieurs études expérimentales ont été réalisées sur la stabilisation des BTC par la chaux ou le ciment combinés avec les ajouts minéraux (laitier, cendre volante, fumée de silice et d'autre). Cependant, il y a un manque d'investigations concernant les BTC stabilisées par la chaux avec la poudre de verre et la pouzzolane naturelle.

Les études antérieures ont montré que

- les minéraux argileux sont des matériaux pouzzolaniques responsables de l'augmentation de la résistance et de la durabilité des sols stabilisés en chaux
- l'ajout des additions minérales avec la chaux pourrait être bénéfique pour l'augmentation de ces performances.

Par ailleurs, la cinétique de cette réaction pouzzolanique est très lente à température ambiante. En effet, elle est influencée par la température de cure, le dosage et la nature minéralogique de la fraction argileuse.

Le deuxième chapitre a fait le point sur l'identification, la caractérisation et les techniques de mesure préconisées pour les matériaux utilisés à savoir : (le sol, le sable, la chaux, la pouzzolane naturelle, la poudre de verre et le laitier). Les résultats présentés dans ce chapitre ont montré que les deux sols satisfont aux critères de stabilisation pour la production des BTC en ce qui concerne la granulométrie, les limites de plasticité et la présence de matière organique. Toutefois, les deux sols contiennent un taux important de gypse. L'analyse par diffraction des rayons X du laitier a donné une structure vitreuse. Par ailleurs, le verre de vitrage, lui, est caractérisé par une nature minérale amorphe, contenant une quantité importante d'alcalins pouvant engendrer des réactions alcali-silice. Selon certains auteurs, le

verre a un effet bénéfique associé à la réaction pouzzolanique, s'il est utilisé sous forme de poudre. Encore la pouzzolane naturelle présente une phase amorphe.

Le troisième chapitre rassemble l'ensemble des résultats obtenus et les discussions. Dans ce chapitre, nous avons étudié l'effet des ajouts minéraux, notamment l'effet de la nature et du dosage de l'ajout minéral sur les résistances mécaniques et la durabilité des BTC à moyen terme et à long terme. En plus, l'influence des conditions de cure sur les résistances mécaniques et durabilité des BTC à base du SOLK stabilisé par la chaux et la pouzzolane. Nous avons utilisé deux modes de conservation pour les BTC. Le premier mode de cure par vapeur à 75°C et de 100 % d'humidité (enceinte climatique). Le deuxième mode de cure en atmosphère humide dont les briques sont couvertes par un film plastique et curées jusqu'à 28 jours et 18 mois.

En ce qui concerne les résistances mécaniques (RCS, RCH et RTS) à moyen terme (28 jours) pour les BAX et BKX, les résultats obtenus montrent que :

- Le traitement de deux types de sols à un dosage en chaux plus élevé que le point de fixation de la chaux, augmente les résistances mécaniques de ces matériaux.
- L'incorporation de la poudre de verre et la pouzzolane naturelle améliore les résistances mécaniques jusqu'à une teneur de 30 %. Au-delà de cette valeur il y a une chute des résistances pour les deux types de sols et pour les différentes teneurs en chaux. Dans ce cas cet ajout n'aura pas suffisamment de la chaux pour la réaction pouzzolanique et donc il restera comme une charge inerte sans contribuer beaucoup au gain de résistance. Cependant, les résistances mécaniques augmentent avec l'augmentation du dosage en laitier.
- L'ajout de 40 % du laitier améliore considérablement les résistances mécaniques, surtout la résistance à la compression humide pour les deux types de sols.
- Le coefficient de résistance à l'eau augmente avec l'augmentation de la teneur en PV jusqu'à 30 % et de la teneur de LG jusqu'à 40 %. Contrairement au PV et LG, la NP n'a pas d'influence sur le coefficient de résistance à l'eau pour les deux types de sols.
- Les résistances mécaniques des BTC à base du SOLK stabilisées par la chaux et les ajouts sont importantes par rapport aux BTC à base du SOLA. Ce résultat s'explique par l'importance du taux d'argile dans le SOLK par rapport à celui dans le SOLA et le taux inférieur de gypse dans le SOLK que dans le SOLA

Par ailleurs, les résultats des résistances mécaniques à long terme des BKX (28 jours à 180 jours) indiquent :

- Les BTC stabilisé par la chaux et les ajouts donnent des résistances importantes (RCS, RCH et RTS) à long terme. Cela est dû à la progression de la réaction pouzzolanique pour les BTC traités à température ambiante (22 à 24°C) avec le temps, ce qui indique que cette réaction n'est pas finie dans un temps de 28 jours : elle progresse jusqu'à 180 jours de cure.
- Les meilleures valeurs des résistances sont obtenues par l'ajout de laitier suivis de la poudre de verre puis la pouzzolane naturelle à moyen et à long terme.
- Le taux d'augmentation des résistances croît avec l'augmentation du dosage en ajouts dans le temps. Cependant, lors d'un âge de cure de (28-56 jours), les taux d'augmentation des résistances ont tendance à être plus importants lorsqu'ils sont comparés à ceux de l'âge de (56-90).

En ce qui concerne la durabilité des BKX les résultats obtenus montrent que :

- L'absorption totale et capillaire diminue avec l'augmentation du dosage d'ajouts (PN, PV et LG) jusqu'à une teneur de 30 % à moyen et à long terme. A l'âge de 28 jours, une légère diminution de l'absorption totale et capillaire a été enregistrée par l'ajout de NP par rapport aux LG et PV. A partir de 56 jours cette diminution est significative pour tous les ajouts.
- L'incorporation de 30 % de ces ajouts améliore la perte en poids (Essai séchage mouillage) des BKX à moyen terme et à long terme. Le gonflement par immersion diminue avec l'augmentation du dosage en ajouts et avec le temps de cure.
- Une augmentation importante du coefficient d'abrasion à long terme à l'âge de 180 jours par rapport à l'âge de 28 jours pour l'ajout de la pouzzolane, la poudre de verre et le laitier.
- La durabilité des BKX avec l'ajout de laitier et de poudre de verre est bien meilleure que celle du BKX avec l'ajout de la pouzzolane naturelle.

En outre, les résultats concernant les conditions de cure, nous permettent de conclure que :

- La cure par vapeur à 24 heures accélère le durcissement des BTC à la chaux et donne des meilleures résistances mécaniques, surtout la résistance en compression humide par rapport au durcissement à l'atmosphère humide à 28 jours. Aussi, les résistances mécaniques des BTC stabilisées par la chaux et curées par vapeur à environ 24 heures sont proches aux résistances mécaniques des BTC curées à 18 mois à l'atmosphère humide. D'après ces résultats, on peut déduire que la cure par vapeur à 75°C des BTC stabilisé par la chaux à 24 heures, est suffisante pour atteindre des résistances maximales (résistance à la traction sèche, résistance à compression sèche et humide).
- L'addition de petites quantités de la pouzzolane naturelle avec la chaux améliore significativement les propriétés mécaniques et la durabilité : l'absorption totale et capillaire, séchage/mouillage et l'abrasion des BTC curées par vapeur.

Finalement, on a montré l'effet bénéfique des ajouts minéraux (pouzzolane naturelle, poudre de verre et laitier granulé sur les performances mécaniques, et notamment sur la durabilité des BTC stabilisé par la chaux. On peut aussi conclure que les résultats de cette étude pourraient être utiles pour les BTC exposés à des conditions climatiques sévères.

PERSPECTIVES

PERSPECTIVES

Dans une perspective de recherche, trois domaines méritent ainsi d'être approfondis :

- Pour bien comprendre les phénomènes liés aux réactions physique-chimiques entre les minéraux argileux et la chaux avec les ajouts (Poudre de verre, Pouzzolane naturelle et le laitier), il faut coupler l'étude par des approches microstructures (DRX, MEB).
- Etudier l'effet des ajouts minéraux (pouzzolane naturelle, poudre de verre) avec le ciment sur la durabilité des BTC.
- Etudier les propriétés thermiques des BTC à base de chaux et d'ajouts minéraux.

RÉFÉRENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Aladdine, F. Propriétés mécaniques et durabilité des bétons incorporant le verre finement broyé. Mémoire de maîtrise, Université de Sherbrooke, Qc, Canada, 124 p, 2009.

Alexandre I, Sebileau jl. Le laitier de haut fourneau, édité par le centre technique et de promotion des laitiers, 340 p, 1988.

Al-Mukhtar M, Lasledj A, Alcover JF. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 20 °C. Appl. Clay Sci. 50, 191–198, (2010 a).

Al-Mukhtar M, Lasledj A, Alcover JF. Behaviour and mineralogy changes in lime-treated expansive soil at 50 °C. Applied Clay Science 50 , 199–203, (2010 b).

Al-Rawas A.A, Hago A.W, Al-Sarmi H.: Effect of lime, cement and Sarooj (artificial pozzolan) on the swelling potential of an expansive soil from Oman. Building and Environment. vol. 40, n° 5, pp 681 – 687, (2005).

Arquie. Théorie générale de l'influence de la teneur en eau sur les résultats de compactage" Bull. Liaison Labo. Ponts et chaussées N°64, pp.145-158, 1973.

ASTMD559. Wetting and drying compacted soil cement mixtures., 1989.

ASTM C618-12a. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Book of standards volume 04.02, 1994.

ASTM D6276-99. Standard test method for using pH to 426 estimate the soil–lime proportion requirement for soil stabilization. 427 American Testing and Materials Society, Philadelphia, United States, 1996.

Attoh-Okine N. Lime treatment - revisited of laterite soils and gravels. Construction and Building materials. 9(5) : 283–7, 1995.

Arabi M, Wild S. Property changes induced in clay soils when using lime stabilization. Municipal Engineer (London). vol.6, April, pp 85 – 99, 1989.

Bahar R, Benazzoug M, Kenai S. Performance of compacted cement stabilised soil. Cement and Concrete Composites. Elsevier Applied Science Publishers, U.K., Vol. 25, No 6, pp 633-641, 2004.

- Behim M.** Sous produits industriels et développement durable : réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'el hadjar dans les matériaux a matrice cimentaire. thèse de doctorat, Université de Annaba, 173 p, 2005.
- Bell, FG.** Lime stabilization of clay minerals and soil. *Eng. Geol.* 42 (4), 223–237, 1996.
- Bish, DL, Von Dreele, RB.** Rietveld refinement of non-hydrogen atomic positions in kaolinite, Locality: Keokuk, Iowa, USA, Note: *clay Clays and Clay Minerals*, v. 37, p. 289-296. 1989.
- Boardman DI, Glendinning S, Rogers C.D.F.** Development of stabilisation and solidification in lime-clay mixes. *Geotechnique*, 51(6): 533-543. 2001.
- Bousetta TA.** Contribution du laitier granulé et de la poudre de verre sur les propriétés d'écoulement et de durabilité des bétons autoplaçants et de hautes performances. Doctorat 3^{eme} cycle, Université de Annaba, p 210, 2014.
- British standards institution (BSI)** Specification for clay bricks. BS 3921 London, 1985.
- Bui QB.** Stabilité des structures en pisé: Durabilité, caractéristiques mécaniques. INSA de Lyon, p. 250, 2008.
- Cabane N.** Sols traités à la chaux et aux liants hydrauliques: contribution à l'identification et à l'analyse des éléments perturbateurs de la stabilisation, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de St Etienne, Université Jean Monet, 182 p, 2004.
- Caillère S, Hénin S, Rautureau M.** Minéralogie des argiles Tome 01. Dunod, editor. Masson, p. 184, 1982.
- Celik E, Nalbantoglu Z.** Effects of ground granulated blastfurnace slag (GGBS) on the swelling properties of lime-stabilized sulfate-bearing soils. *Engineering geology* 163 (2013) 20–25, 2013.
- Centre for Development of Enterprise (C.D.E).** Compressed earth blocks: Testing procedures. In: C.D.E., ENTPE et CRATerre Coed, Brussels, Belgium, 2000.
- Chindaprasirt P, Pimraksa K.** A study of fly ash–lime granule unfired brick; *Powder Technology* 182 (2008) 33–41.

Colleparidi M, Marcialis A, Massidda L, Sanna U, Low pressure steam curing of compacted lime-pozzolana mixtures. *Cem. Concr. Res.* 6, 497–506 (1976).

Diamond S, Kinter EB. Mechanism of soil-lime stabilization. An interpretative review, Presentation at the 44th Annual Meeting, Highway Research Board. Washington, 1965.

Divet L, Le Roy R. Etude de la durabilité vis-à-vis de la corrosion des armatures des bétons formulés avec des ciments à forte teneur en laitier de haut fourneau. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, pp 63-84, 2013.

Doat P, Hays A, Houben H, Matuk S, Vitoux F. Construire en terre. Editions Alternatives et Parallèles, collection AnArchitecture, Paris, France, 265p, 1979.

Eades, JL, Grim, RE. A quick test to determine lime requirements for lime stabilization. *Highway Research Board Bulletin*, n°139, 61-72, 1966.

Elouahabi M. Valorisation industrielle et artisanale des argiles du Maroc. Thèse de Doctorat, Université de Liège France, p 189, 2013.

F.O. Ogunye, H. Diagnosis of assessment methods for weatherability of stabilised compressed soil blocks. *Construction and Building Materials* 16 163–172, 2002.

Flament C. Valorisation des fines de lavage de granulats : application à la construction en terre crue. thèse de doctorat, Université d'Artois, France. 2013.

Ghrichi M, Kenai S, Said-Mansour M. Mechanical properties and durability of mortar and concrete containing natural pozzolana and limestone blended cements. *Cement & Concrete Composites* 29 (2007) 542–549.

Grim RE. "Physico-chemical properties of soils: clay minerals", *Journal of the soil mechanics and foundation division, ASCE*, Vol. 85, n° SM2, 1959, pp, 1-17.

Guettala A, Abibsi A., Houari H. Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure, *Construction and Building Materials* 20 119-127.2005.

Guettala A. Béton de terre stabilisé: amélioration de sa durabilité à l'eau. thèse de doctorat, Université de Biskra, 203 p, 2003.

Guettala A, Houari H., Mezghiche B., Chebili R. Durability of lime stabilized earth blocks. *Courrier du Savoir*, N°02, pp. 61-66, 2002.

Harichane K, Ghrici M, Kenai S. Effect of the combination of lime and natural pozzolana on the compaction and strength of soft clayey soils: a preliminary study. *Environ Earth Sci* (2012) 66:2197–2205.

Heathcote KA. Durability earthwall buildings. *Construct Building Mater* 1985;9(3):185–9.

Heiri, O., Lotter, A. F., and Lemcke, G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproductibility and comparability of results: *Journal of Paleolimnology*, v. 25, p. 101-110.1999.

Lea's Hewlh P. chemistry of cement and concrete, 4 édition 2004.

Hibouche A. Sols traité aux liants, performance hydro- mécaniques et Hydro-thermiques application aux BTP. Thèse de doctorat, Université de havre France: 231p, 2013.

Hossain KMA, Mol L. Some engineering properties of stabilized clayey soils incorporating natural pozzolans and industrial wastes. *Constr Build Mater* 2011;25(8):3495–501.

Hossain KMA, Lachemi M, Easa S. Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua new Guinea. *Resour Conserv Recy* 2007;51(4):711–31.

Houben H, Guillaud H. Earth construction—a comprehensive guide. London: Intermediate Technology; 1994.

Houben H, Guillaud H. Traité de construction en terre. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, 355 p, 2006.

Houze C. Etude de la valorisation des laitiers de l'industrie sidérurgique et de production des alliages silico- manganèse. Universit_e Paris-Est Fance, 263p, 2013.

Idir R. Mécanisme d'action des fines et des granulats de verre sur la réaction alcali-silice et la réaction pouzzolanique. Thèse de doctorat Cotutelle, Université de Toulouse (France) et Université de Sherbrooke (Canada), 284 p, 2009.

IS 1725. Specification for soil based blocks used in general building construction. Bureau of Indian Standards, New Delhi, 1982.

Izemouren O, Guettala A. Amélioration de la durabilité des blocs de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra. Matec web of conférence, vol 11 02001, 2014.

Jagadish K S. The progress of stabilised soil construction in India', Proceedings of National Seminar on Application of Stabilised Mud Blocks in Housing and Building, Bangalore, India, , 17-43, Nov. 1988.

Jiménez Delgado MC, Guerrero IC. The selection of soils for unstabilised earth building: A normative review. Construction and Building Materials vol 21 (2007) 237–251.

Keddi J, Cleghorn W. Brick manufacture in developing countries. Scottgish academic press ltd. Edinburg, Scotland, 1978**Kenai S,**

Kerali AG. Durability of compressed and cement-stabilized building blocks. Ph.D Thesis. UK: University of Warwick, school of Engineering, September 2001.

Khatab, S. Etude multi-échelles d'un sol argileux plastique traité à la chaux, PhD. Orléans. France, 249 p, 2002.

Lambe TW. The Structure of Inorganic Soil, Proceeding. ASCE, Vol. 79, Separate No. 315,.49p, 1953.

Lasledj A. Traitement des sols argileux à la chaux: processus physico-chimique et propriétés géotechniques, Thèse de Doctorat, Université d'Orléans, 359 p, 2009.

Lasledj A. Effect of Hydrated Lime on the Engineering Behaviour and the Microstructure of Highly Expansive Clay. 2008;1–6.

Le Roux A, Rivière A. Traitement des sols argileux par la chaux. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, Paris.* 1969;(40):59–95.

Little D N. Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime. National Lime Association, Arlington, 219, 1995.

Locat J, Trembley H, Lerouil S. Mechanical and hydraulic behavior of a soft inorganic clay treated with lime. Canadian Geotechnical Journal, 33 (4), 654-669, 1996.

Marrot, L.. Contribution à l'étude de la résistance des sols traités à la chaux face au gel pour une application en couche de forme. Nivelles: Lhoist RetD, Nivelles, Belgique, 2010.

Mckinley, J.D., Thomas, H.R., Williams, K.P., Reid, J.M., 2001. Chemical analysis of

contaminated soil strengthened by the addition of lime. *Engineering Geology* 60 (1–4), 181–192.

Mering J, Pedro G. Discussion a propos des critères de classification des phyllosilicates 2/1: Bulletin du groupe francais des argiles, v. 21, p. 1-30, 1969.

Mielenz RC, Witte LP, Glantz OJ, Effect of calcination on natural pozzolanas-symposium on use of pozzolanic materials in mortars and concretes. American Society of Testing and Materials Special Technical Publication no. 99, pp. 43–92 (1950).

Michel J. Etude sur la stabilisation et la compression des terres pour leur utilisation dans la construction. *Annales de l'Institut Technique de Bâtiment et des Travaux Publics Série Matériaux N° 339*, pp.22-35, 1999.

Millogo Y, Morel JC, Ouedraogo R. Microstructure, geotechnical and mechanical characteristics of quicklime-lateritic gravels mixtures used in road construction. *Construction and Building Materials* 26, 663–669, 2012.

Mitchell JK. Fundamentals of soil behavior, 2ème edition, John Wiley and sons, New York, 437 pp, 1993.

Moubec N. Approche multi-échelle du traitement des sols a la chaux études des interactions avec les argiles. Thèse de doctorat, université de Nantes, France. p217, 2010.

Nalbantoglu Z, Gucbilmez E.: Improvement of calcareous expansive soils in semi-arid Environments, *Journal of Arid Environments*. vol. 47, pp 453 – 463, 2001.

Neville AM. Properties of concretes. Springer, Berlin, pp 345–350, 2000.

NF XP P13-901: Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons: définitions - Spécifications- Méthodes d'essais - Conditions de réception. AFNOR. p. 35, 2001.

NF P18-560. Granulometric analysis by sieving. AFNOR; 5p. Oct 1978.

NF P94-057. Granulometric analysis of soils (by sedimentation method). AFNOR; 17p, May 1992.

Oti JE, Kinuthia JM, Bai J. Engineering properties of unfired clay masonry bricks. *Eng Geol*;107:130–9, (2009a)

Oti JE, Kinuthia JM, Bai J. Compressive strength and microstructural analysis of unfired clay masonry bricks. *Eng Geol*;109:230–40, (2009b)

- Pomakhina, E., Deneele, D., Gaillot, A.-C., Paris, M., Ouvrard, G., 2012.** 29 Si solid state NMR investigation of pozzolanic reaction occurring in lime-treated Ca-bentonite. *Cem. Concr. Res.* 42 (4), 626–632.
- Poppe, L.J., Paskevich, V.F., Hathaway, J.C., Blackwood, D.S.,** A laboratory manual for X-ray powder diffraction. U.S. Geological Survey, Open-File Report 01-041, 2001.
- Puppala JA, Griffin JA, Hoyos, LR, Chomtid S.** Studies on sulfate-resistant cement stabilization methods to address sulfate-induced soil heave. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 391–402 (ASCE), 2004..
- Ramezani pour A A,** *Cement Replacement Materials*, Springer Geochemistry/Mineralogy, DOI: 10.1007/978-3-642-36721-2_1,2014.
- Rigassi V.** Blocs de terre comprimée. Volume I. Manuel de production, CRA Terre-EAG, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, Allemagne, 104 p, 1995.
- Rao, SM., Shivananda, P.,** 2005. Role of curing temperature in progress of lime–soil reactions. *Geotech. Geol. Eng.* 23 (1), 79–85.
- Rao. S M, Shivananda. P.** Swelling behaviour of lime-stabilized specimens after wetting and drying cycles. *Workshop in clay behaviour: chemico-mechanical coupling from nanostructures to engineering applications*, vol.2, Italy, 2001.
- Shao. Y., Lefort. T., Moras, S. et Rodriguez, D.** Studies on concrete containing ground waste glass. *Cement and Concrete Research*, 30(1), 91-100, 2000.
- Shayan A, Xu A.** Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, volume 36, n° 3, p. 457-468, 2006.
- Shi. C. et Wu, Y.** Mixture proportioning and properties of self-consolidating lightweight concrete containing glass powder. *ACI Materials Journal*, volume 102, n° 5, p. 355-363, 2005.
- Siddique A, Hossain A.** Effect of lime stabilisation on engineering properties of an expansive soil for use in road construction. *Journal of Society for Transportation and Traffic Studies.*;2(4):9, 2013.
- Smith RG, Webb DJT.** *Small-scale manufacture of stabilised soil blocks.* ILO Publications, International Labour Office, p 204, 1987.
- Tasong, A.W., Wild, S., Tilley, R.J.D., 1999.** Mechanisms by which ground granular blastfurnace slag prevents sulfate attack of lime-stabilized kaolinite. *Cement and Concrete Research* 29, 975–982.

Temimi M, Camps JP, Laquerbe M. Valorization of fly ash in the cold stabilization of clay materials. *Resour Conserv Recy* 1995;15(3–4): 219–34.

Thompson M R. Lime stabilisation of soils for highway purposes. Illinois: Illinois Highway Engineering Series, No. 25, 1968.

Thompson MR. Lime reactivity of Illinois soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 67–92 (ASCE, Vol. 92, No. SM5, Proc. Paper 4970), 1966.

Tuncer E.T et Basma A.A. Strength and stress–strain characteristics of a lime–treated cohesive soil. *Transportation research record*. N° 1295, pp 70 – 78, 1991.

Umit Calik, Erol Sadoglu, Classification, shear strength, and durability of expansive clayey soil stabilized with lime and perlite. *Nat Hazards* 71:1289–1303, 2014.

USACE Guidelines on ground improvement for structures and facilities. Research No. 20314-1000, Department of the Army, Washington, 2003.

Van Rompaey G, Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chlorure. The`se de Doctorat, Université Libre de Bruxelles, p 462, 2006.

Venkatarama Reddy BV, Gourav K. Strength of lime–fly ash compacts using different curing techniques and gypsum additive. *Mater Struct* 44(10):1793–1808, (2011)

Venkatamara R. Hubli. Propriétés of lime satbilised steam-cured Blocks for masonry, materials and structures(Rilem): pp293-300, 2002.

Venkatarama Reddy BV, Lokras SS. Steam-cured stabilized soil blocks for masonry construction. *Energy Build* 29(1):29–33, 1998.

Venkatarama Reddy, B. V. and Jagadish, K. S., 'The static compaction of soils', *geotechnique* 43 (2) 337-341, 1993.

Vilenkina N. Utilisation de matériau sol dans la construction des bâtiments ruraux, Mouscou, 1956.

Wild S, Arabi M, Leng–Ward G. (1986): Soil–lime reaction and microstructure evelopment at elevated temperature. *Clay Minerals*. Vol. 21, pp 279 – 292.

Wild S, Arabi M. Relation between pore size distribution, permeability, and cementitious gel formation in cured clay–lime systems. *Journal of Materials Science and Technology*. vol. 3, December, pp 1005 – 1011, 1987.

Walker P J. Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks. *Cement & Concrete Composites* 17 (1995) 301-310.

Wild. S., Kinuthia.J.M., Jones, G.I. Higgins, D.D., 1998. Effect of partial substitution of lime with ground granular furnace slag (GGBS) on the strength properties of lime-stabilised sulphate-bearing clay soils. *Engineering Geology* 51, 35–53.

Wild, S., Kinuthia, J.M., Jones, G.I., Higgins, D.D., 1999. Suppression of swelling associated with ettringite formation in lime stabilized sulfate bearing clay soils by partial substitution of lime with Ground Granulated Blastfurnace Slag. *Engineering Geology* 51, 257–277, 1999.

Zachariasen W. The atomic arrangement in glass. *Journal of the American Chemical Society*, 196(1), 3841–3851, 1932.

Zidol, A. Valorisation de la poudre de verre dans le béton autoplaçant. thèse de doctotat, université de Sherbrooke (Québec) Canada. 116p, 2014.

**LISTE DES PUBLICATIONS ET
COMMUNICATIONS ISSUES DE LA
THESE**

Liste des publications et communications issues de la thèse

Publications internationales :

O IZEMMOUREN, A GUETTALA, S GUETTALA. Mechanical Properties and Durability of Lime and Natural Pozzolana Stabilized Steam-Cured Compressed Earth Block Bricks Geotechnical and Geological Engineering 33 (5), 1321-1333. 2015.

O IZEMMOUREN, A GUETTALA. Effet du laitier de haut fourneau sur les propriétés d'ingénierie des briques de terre comprimée à base d'un sol portant de sulfate. Conférence Matériaux -Colloque Ecomatériau. Archives ouvertes hal-01144594. France, 2015.

O IZEMMOURENA, A GUETTALA. Amélioration de la durabilité des briques de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra. MATEC Web of Conférences 11, 02001. 2014.

Communications internationales :

O IZEMMOUREN, A GUETTALA. Effet de la pouzzolane naturelle sur les propriétés mécaniques des blocs de terre comprimée. AFM, Association Française de Mécanique, Lyon France. 2015.

O IZEMMOUREN, A GUETTALA. Effet du laitier de haut fourneau sur les propriétés d'ingénierie des briques de terre comprimée à base d'un sol portant de sulfate. Conférence Matériaux -Colloque Ecomatériau, Montpellier France, 2014

O IZEMMOURENA, A GUETTALA. Amélioration de la durabilité des briques de terre comprimée à base d'un sol de la région de Biskra. Congress on Materials & Structural Stability, Rabat, Morocco, 27-30 November 2013.

O IZEMMOUREN, A GUETTALA, K GADRI. Effet des conditions de cure sur les propriétés physiques et mécaniques des blocs de terre comprimée. 21ème Congrès Français de Mécanique, 26 au 30 août 2013, Bordeaux, France, 2013.