

N° d'ordre: 3188

THESE

En vue de l'obtention du: **DOCTORAT**

Centre de recherche : Centre de Recherche en Energie

Structure de Recherche : Équipe de Mécanique et des Matériaux

Discipline : Physique

Spécialité : Mécanique des matériaux et génie civil

Présentée et soutenue le : 26/03/2019 par :

Abdelmalek AMMARI

Durabilité du bâti en terre : Amélioration des propriétés physico-chimiques et minéralogiques de la terre contre la remontée capillaire du bloc de terre comprimée et du mortier de terre

JURY

Mohammed OUADIA BENSALAH	PES, Université Mohammed V- Rabat, Faculté des Sciences	Président
Abdellah EL HAMMOUMI	PES, Université Mohammed V- Rabat, Faculté des Sciences	Rapporteur/Examineur
Saâd CHARIF D'OUAZZANE	PES, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Rabat,	Rapporteur/Examineur
Hamid BOUABID	PES, Université Mohammed V- Rabat, Faculté des Sciences	Directeur/Examineur
Mohammed CHERRAJ	PH, Université Mohammed V- Rabat, Faculté des Sciences	Co-directeur/Examineur
Zineb BARGACH	Directrice de la société Constr concept, Rabat	Invitée

Année Universitaire : 2018/2019

Dédicace

A Mes très Chers Parents

Mr. AMMARI Mohammed et MOUMENI Fatima

Tous les mots du monde ne sauraient exprimer l'immense amour que je vous porte, ni la gratitude que je vous témoigne pour tous les efforts et les sacrifices que vous n'avez jamais cessé de consentir pour mon et mon bien-être.

J'espère avoir répondu aux espoirs que vous avez fondés en moi. Je vous rends hommage par ce modeste travail en guise de ma reconnaissance éternelle et de mon infini amour.

A mes sœurs et frères.

A tous les membres de ma famille, petits et grands

Veillez trouver dans ce modeste travail l'expression de mon affection.

Remerciements

Avant tout développement, la politesse et la courtoisie voudraient que j'exprime toute ma reconnaissance vis-à-vis de toute personne ayant favorisée l'aboutissement de ce travail, réalisé sous l'encadrement des mes Professeurs **Mr Hamid BOUABID** et **Mr Mohammed CHARRAJ** au sien de la structure de recherche: **Équipe de Mécanique et des Matériaux**.

Tout d'abord, j'ai été chanceux et heureux d'avoir comme directeur de thèse, **Mr Hamid BOUABID** Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, pour m'avoir confié ce travail. Je suis très reconnaissante pour la qualité de ses nombreux conseils, son attention, et bien évidemment pour les connaissances et son expérience dans le domaine de la recherche qu'il a su me transmettre, et qui j'en suis sûre me seront bénéfiques dans les années futures, en particulier pour sa profonde gentillesse, et les discussions.

Je suis heureux et honoré que **Mr Mohammed CHARRAJ**, Professeur de l'Enseignement Supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat assure la co-direction rapprochée de la présente thèse. Je témoigne ici de la reconnaissance que je lui dois et de l'estime que je lui porte. Je le remercie pour son implication dans ce travail, pour sa générosité scientifique et pour sa disponibilité.

Je remercie sincèrement **Mr Mohammed OUADIA BENSALAH**, Professeur à la Faculté des Sciences Rabat, d'avoir accepté de présider le jury de thèse et de mettre en contribution son expérience et son savoir faire pour juger ce travail.

Je remercie, fortement **Mr Saâd CHARIF D'OUAZZANE**, Directeur du Laboratoire de Mécanique, Thermique et Matériaux (LMTM), et Professeur de l'Enseignement Supérieur à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Rabat qui m'a aimablement accueilli dans son laboratoire. Je le remercie d'avoir suivi ce travail en toute rigueur et de son soutien pour la réalisation de cette recherche et d'avoir accepté de faire partie des membres du jury en tant que rapporteur et examinateur.

Je remercie également **Mr Abdellah EL HAMMOUMI**, Professeur de l'enseignement supérieur à la Faculté des Sciences de Rabat, pour l'examen et l'analyse de ce document ainsi que pour sa contribution à enrichir ce travail. Mais surtout d'avoir accepté de faire partie des membres du jury en tant que rapporteur et examinateur.

J'adresse mes respectueux remerciements à Mademoiselle **Zineb BARGACH** Directrice de la société Constru Concept de Rabat pour avoir accepté d'examiner ce travail et d'avoir accepté de faire partie des membres du jury en tant qu'invitée.

Je tiens à remercier tous mes collègues du Laboratoire de Mécanique et des Matériaux(LMM) de la Faculté des Sciences de Rabat, pour l'ambiance amicale qu'ils ont su créer pendant toute la durée de mes travaux. Je m'adresse particulièrement Docteur **Karima BOUASSRIA** d'avoir suivi ce travail ainsi que l'étudiante **Hind DARIF** et doctorante **Najat Zakham** pour ses contributions à la réalisation des essais mécaniques et durabilité.

Finalement, c'est à l'ensemble de ceux qui ont facilité la réalisation de cette thèse, particulièrement **Mr Abderrahim FAMIRI**, Professeur et responsable du Laboratoire de Mécanique de la Direction Régionale de la Recherche Forestière (DREF) a qui j'adresse ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements.

Enfin, merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

Résumé

Les travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette thèse, proposent des techniques et des procédés pour l'amélioration du matériau terre, en étudiant à la fois la minéralogie et la granulométrie pour la durabilité du matériau et contre la remontée capillaire du bloc de terre comprimée et du mortier. Les résultats expérimentaux des analyses chimiques-minéralogiques et des essais de compression uni-axiale sur des éprouvettes de trois terres prélevées de différents sites, et associées à trois dosages de ciment, sont présentés pour analyser et quantifier l'influence de sa fraction granulométrique et les éléments minéralogiques de son argile, sur l'optimum technico-économique du ciment. Les résultats montrent que le comportement mécanique et l'optimum technico-économique de ciment s'améliorent nettement par la minéralogie de la fraction argileuse que par la distribution granulométrique. De plus, ce travail étudie l'amélioration des caractéristiques du mortier de terre en tant que revêtement ou jointement, notamment, en présence de la remontée capillaire, afin d'accroître sa durabilité. Nous présentons les analyses minéralogiques et chimiques sur des éprouvettes de mortier de deux terres et leurs effets sur les caractéristiques mécaniques de ces mortiers. Le coefficient d'absorption de l'eau du mortier est calculé pour différents dosages en ciment afin d'optimiser la durabilité du mortier face aux intempéries, à la pluie et/ou des climats très humides. Les résultats montrent que l'absorption d'eau diminue avec l'ajout du ciment mais que cette diminution dépend beaucoup de la composition minéralogique et chimique de l'argile. Même si la fraction argileuse, absorbante d'eau, est moins présente et que la minéralogie d'un matériau est dominée par l'oxyde de calcium et l'oxyde de magnésium, l'absorption est très élevée sans présence de ciment. La situation s'inverse à partir d'un niveau d'ajout de ciment ou l'hydroxyde de calcium entre en réaction chimique avec le silico-alumineux en présence d'eau. Le silico-alumineux devient à son tour un liant qui stabilise le matériau contre la remontée capillaire.

Mots - Clés: terre, ciment, bloc de terre comprimée, mortier, chimie-minéralogie, comportement mécaniques, remontée capillaire.

Abstract

The research work carried out as part of this thesis proposes technics and processes for the improvement of the earth material, by studying both the mineralogy and the particle size for the durability of the material and against the capillary rise of the compressed earth block and the mortar. Experimental results of chemical-mineralogical analyzes and uni-axial compression tests on specimens of three earths taken from different sites, and associated with three cement content, are presented to analyze and quantify the influence of its granulometric fraction and the mineralogical elements of its clay, on the technico-economic optimum of the cement. The results show that the mechanical behavior and the technico-economic optimum of cement improve significantly by the mineralogy of the clay fraction than by the particle size distribution. In addition, this work studies the improvement of the characteristics of the earth mortar as a coating or jointing, especially in the presence of the capillary rise, in order to increase its durability. We present mineralogical and chemical analyzes on two-earth mortar specimens and their effects on the mechanical properties of these mortars. The water absorption coefficient of the mortar is calculated for different cement content in order to optimize the durability of the mortar in the face of bad weather, rain or very humid climates. The results show that the water absorption decreases with the addition of cement but that this decrease depends very much on the mineralogical and chemical composition of the clay. Even though the clay fraction, which absorbs water, is less present and the mineralogy of a material is dominated by calcium oxide and magnesium oxide, the absorption is very high without the presence of cement. The situation is reversed from a cement addition level where the calcium hydroxide enters a chemical reaction with the silico-aluminous in the presence of water. The silico-aluminous becomes in turn a binder that stabilizes the material against capillary rise.

Keywords: earth, cement, compressed earth block, mortar, chemistry-mineralogy, mechanical behavior, capillary rise.

Sommaire

I.	INTRODUCTION GENERALE	13
II.	CARACTERISATION ET UTILISATION DU MATERIAU TERRE	17
II.1.	INTRODUCTION	18
II.2.	Les constituants du matériau terre	19
II.2.1.	Les graviers	19
II.2.2.	Les sables	19
II.2.3.	Les silts	20
II.2.4.	Les argiles	20
II.3.	Identification du matériau terre	26
II.3.1.	Analyses préliminaires in-situ	26
II.3.2.	Analyses visuelles des fines	29
II.3.3.	Essais de laboratoire	32
II.4.	Propriétés de la stabilisation de la terre	38
II.4.1.	Stabilisation mécanique	39
II.4.2.	Stabilisation physique	42
II.4.3.	Stabilisation chimique - ciment	42
II.4.4.	Conditions de mise en œuvre	43
II.5.	Les techniques de constructions en terre	44
II.5.1.	Le pisé	45
II.5.2.	L'adobe	46
II.5.3.	Le torchis	46
II.5.4.	La bauge (Cob)	47
II.5.5.	La terre paille	48
II.5.6.	Le façonnage	48
II.5.7.	Le bloc de Terre Comprimée (BTC)	49
II.6.	CONCLUSION	53
III.	ETUDE DES EFFETS CONJUGUES DE LA MINERALOGIE ET DE LA GRANULOMETRIE	54
III.1.	INTRODUCTION	55
III.2.	Caractéristiques de la terre d'essai de Fès (F)	55
III.2.1.	Granulométrie	55
III.2.2.	Limites d'Atterberg	56
III.2.3.	Analyses minéralogiques et chimiques	57
III.3.	Essais d'écrasement des éprouvettes de la terre F comprimée et stabilisée	61
III.3.1.	Fabrication des éprouvettes	61
III.3.2.	Comportement et rupture des éprouvettes	63
III.3.3.	Essais comparés des éprouvettes stabilisées (0%, 4%, 7% et 10%)	64
III.3.4.	Interprétation des résultats	66

III.4.	Comparaison avec les terres de Nadialpou (B) et de Tizi-Ouzou (A)	68
III.4.1.	Granulométries et limites d'Atterberg	68
III.4.2.	Compositions chimiques et minéralogiques	69
III.5.	Effets combinés de la minéralogie et de la granulométrie	73
III.5.1.	Effets sur les caractéristiques mécaniques	73
III.5.2.	Effets sur l'Optimum Technico-Economique (OTE)	75
III.6.	CONCLUSION	79
IV.	DURABILITE DU MORTIER	80
IV.1.	INTRODUCTION	81
IV.2.	Les mortiers	81
IV.2.1.	Mortier de jointement	81
IV.2.2.	Mortier de revêtement	82
IV.3.	Analyses expérimentales de la durabilité des mortiers de terre de Fès	82
IV.3.1.	Analyses minéralogiques et chimiques	82
IV.3.2.	Essais d'absorption par capillarité de la terre F	88
IV.3.3.	Résultats expérimentaux des essais mécaniques	94
IV.4.	Analyses expérimentales de la durabilité du mortier de terre de Rabat	102
IV.4.1.	Granulométrie	102
IV.4.2.	Analyses minéralogiques et chimiques	104
IV.4.3.	Essai d'absorption par capillarité de la terre R	110
IV.4.4.	Résultats expérimentaux des essais mécaniques	113
IV.5.	Interprétations et comparaison des résultats expérimentaux de mortier de deux terres F et R	119
IV.5.1.	Résultats expérimentaux de la durabilité du mortier	119
IV.5.2.	Interprétations des résultats expérimentaux des essais mécaniques	120
V.	CONCLUSION GENERALE	128

Liste des Figures

Figure I-1: La construction en terre dans le monde.....	14
Figure II-11: Test de retrait	29
Figure II-12: Test de résistance à sec	29
Figure II-13: Test de ressuage	30
Figure II-14: Test de consistance	32
Figure II-15: Test de cohésion	32
Figure II-17: Equipement pour sédimentométrie Figure II-18: Test de sédimentation.....	34
Figure II-19: Courbe granulométrique d'après [15].....	34
Figure II-21: Limites d'Atterberg	35
Figure II-23: Zones d'activités de la fraction argileuse [19].....	37
Figure II-25: Diagramme de l'influence de la texture de la terre sur la masse volumique sèche et la T.E.O. (CRATERRE).....	41
Figure II-28: Différentes techniques de construction en terre dans le monde établi par le groupe CRATERRE en 1986 (Houben, 2006)	45
Figure II-29: Construction en Pisé.....	46
Figure II-30: A gauche : des adobes au séchage sous le soleil. A droite :	46
Figure II-32: Construction en Bauge	47
Figure II-33: Construction en Terre Paille (France)	48
Figure II-34: Constructions en façonnage au Togo	48
Figure II-35: A gauche : Maison en BTC ; A droite: Bloc de terre comprimée	49
Figure II-36: Différents produits de blocs de terre comprimée	49
Figure II-37: Format du bloc de terre comprimée	51
Figure II-38: Faces des BTC.....	51
Figure III-1: Courbe granulométrique de la terre F.....	56
Figure III-2: Spectres de diffractions des rayons X.....	58
Figure III-3: Spectres d'Infrarouge de la terre F.....	59
Figure III-4: Images MEB prises de la terre F.....	60
Figure III-5: Opération de compactage des éprouvettes [19]	62
Figure III-6: Eprouvette cylindrique	62
Figure III-7: Dispositif d'essai de compression	63
Figure III-8: Courbe de comportement des éprouvettes	64
Figure III-9: Résistance en compression de la terre F en fonction du dosage en ciment.....	67
Figure III-10: Module d'Young de la terre F en fonction du dosage en ciment	68
Figure III-11: Spectres de diffractions des rayons X de la terre F brute (%)	71
Figure III-12: Spectres de diffractions des rayons X de la terre F stabilisé à 4% de ciment de bloc (b)	71

Figure III-13: Spectres de diffractions des rayons X de l'échantillon non stabilisée (a) et d'échantillon stabilisé à 4% du ciment d'adobe (b) de la terre B [43].....	72
Figure III-14: Images MEB prises sur la terre F (Qz: quartz, Ca: calcite).....	72
Figure III-15: Images de MEB et l'EDS de la Terre B.....	73
Figure III-16: Résultats expérimentaux de la résistance à la compression Rc en fonction du ciment pour les terres B, F, et A [82]	74
Figure III-17: Evolution de la grandeur V en fonction de D ou de C.....	76
Figure III-18: Evolution du gradient de V en fonction de D ou de C	77
Figure III-19: Modèle Numérique de l'évolution de la résistance à la compression Rc en fonction de ciment	78
Figure IV-1: Spectres de diffractions des rayons X de la terre F brute.....	83
Figure IV-2: Spectres de diffractions des rayons X de la terre F à 4% du ciment.....	83
Figure IV-3: Spectres de diffractions des rayons X de la terre F à 7% du ciment.....	84
Figure IV-4: Spectres de diffractions des rayons X de la terre F à 10% du ciment.....	84
Figure IV-5: Spectres d'Infrarouge de la terre de F brute	85
Figure IV-6: Spectres d'Infrarouge de la terre de F à 4% du ciment	86
Figure IV-7: Spectres d'Infrarouge de la terre de F à 7% du ciment	86
Figure IV-8: Spectres d'Infrarouge de la terre de F à 10% du ciment	87
Figure IV-9: Images MEB prises sur la terre F (Qz: quartz, Ca: calcite)	87
Figure IV-10: Schéma de l'essai d'absorption capillaire.....	90
Figure IV-11: La balance Figure IV-12: Le pied à coulisse	90
Figure IV-13: Protocole expérimental Figure IV-14: Pesage des échantillons humides.....	91
Figure IV-15: Coefficient d'absorption d'eau Cb en fonction du dosage en ciment	93
Figure IV-16: Eprouvette cylindrique après le test d'absorption d'eau par capillarité	94
Figure IV-17: Eprouvette cylindrique stabilisée après le test d'absorption d'eau par capillarité et après l'essai de compression	94
Figure IV-18: Les éprouvettes de mortier de deux terres F et R.....	95
Figure IV-19: Eprouvette de mortier.....	95
Figure IV-20: Courbe de comportement du mortier de terre	96
Figure IV-21: Résistance en compression du mortier F humide et sec en fonction du dosage.....	101
Figure IV-22: Module d'Young du mortier F humide et sec en fonction du dosage	101
Figure IV-23: Déformation limite du mortier F humide et sec en fonction du dosage	102
Figure IV-24: Courbe granulométrique de la terre R.....	103
Figure IV-25: Spectres de diffractions des rayons X de la terre R brute	104
Figure IV-26: Spectres de diffractions des rayons X de la terre R à 4% du ciment	105
Figure IV-27: Spectres de diffractions des rayons X de la terre R à 7% du ciment	105
Figure IV-28: Spectres de diffractions des rayons X de la terre R à 10% du ciment	106
Figure IV-29: Spectres d'Infrarouge de la terre R brute.....	107
Figure IV-30: Spectres d'Infrarouge de la terre de R à 4% du ciment.....	107
Figure IV-31: Spectres d'Infrarouge de la terre de R à 7% du ciment.....	108
Figure IV-32: Spectres d'Infrarouge de la terre de R à 10% du ciment.....	108
Figure IV-33: Images MEB prises sur la terre R (Qz: quartz, Ca: calcite)	109

Figure IV-34: Coefficient d'absorption d'eau en fonction du dosage en ciment.....	112
Figure IV-35: Résistance en compression du mortier R humide et sec en fonction du dosage.....	117
Figure IV-36: Module d'Young du mortier R humide et sec en fonction du dosage.....	118
Figure IV-37: Déformation limite du mortier R humide et sec en fonction du dosage.....	118
Figure IV-38: Coefficient d'absorption d'eau en fonction du dosage en ciment pour F et R	119
Figure IV-39: A gauche éprouvette non stabilisée, A droite éprouvette stabilisée	120
Figure IV-40: Résistance en compression du mortier F et R à l'état sec en fonction du dosage du ciment.....	121
Figure IV-41: Résistance en compression du mortier F et R à l'état humide en fonction du dosage du ciment...	122
Figure IV-42: Déformation limite du mortier F et R à l'état sec en fonction du dosage du ciment	122
Figure IV-43: Déformation limites du mortier F et R à l'état humide en fonction du dosage du ciment.....	123
Figure IV-44: Résistance en compression du mortier F dans les deux cas en fonction du dosage du ciment.....	123
Figure IV-45: Déformation limite du mortier F dans les deux cas en fonction du dosage du ciment.....	124
Figure IV-46: Résistance en compression du mortier R dans les deux cas en fonction du dosage du ciment	124
Figure IV-47: Déformation limite du mortier R dans les deux cas en fonction du dosage du ciment.....	125

Liste des Tableaux

Tableau II-1: Coefficient d'Activité	37
Tableau II-2: Appréciation de la terre au compactage suivant sa teneur en eau optimale (Craterre)	41
Tableau III-1: La fraction granulaire de la terre F	56
Tableau III-2: Limites de consistances de la terre F	57
Tableau III-3: Compositions chimiques de la terre F	60
Tableau III-4: La composition chimique du clinker (%)	61
Tableau III-5: La composition minéralogique du clinker (%)	61
Tableau III-6: Densité sèche et la teneur en eau de la terre F brute	63
Tableau III-7: Résultats expérimentaux des blocs de la terre F brute	65
Tableau III-8: Résultats expérimentaux des blocs de la terre F	65
Tableau III-9: Résultats expérimentaux des blocs de la terre F	66
Tableau III-10: Résultats expérimentaux de blocs de la terre F associés à 10%	66
Tableau III-11: Résultats expérimentaux moyens associés aux différents dosages en ciment	67
Tableau III-12: Fractions granulaires des trois terres F, B et A	68
Tableau III-13: Limites de consistances des terres F, B et A	69
Tableau III-14: Taux des éléments chimiques et composition minéralogique du ciment CPJ35 et des deux terres F et B	69
Tableau III-15: Paramètres des équations d'évolution de Rc	78
Tableau III-16: Valeurs d'optimum de ciment des trois terres F, B et A	78
Tableau IV-1: Compositions chimiques de la terre de Fès et de ciment en (%)	88
Tableau IV-2: Résultats de l'essai d'absorption de la terre brute	91
Tableau IV-3: Résultats de l'essai d'absorption de la terre à 4% de ciment	92
Tableau IV-4: Résultats de l'essai d'absorption de la terre à 7% de ciment	92
Tableau IV-5: Résultats de l'essai d'absorption de la terre à 10% de ciment	92
Tableau IV-6: Le coefficient d'absorption de l'eau	93
Tableau IV-7: Résultats expérimentaux du mortier F associés au dosage de 0% de ciment	96
Tableau IV-8: Résultats expérimentaux du mortier F associés au dosage de 0% à l'état humide	97
Tableau IV-9: Résultats expérimentaux du mortier F associés au dosage de 4%	97
Tableau IV-10: Résultats expérimentaux du mortier F humide associés au dosage de 4%	98
Tableau IV-11: Résultats expérimentaux du mortier F Sec associés au dosage de 7%	98
Tableau IV-12: Résultats expérimentaux du mortier F humide associés au dosage de 7%	98
Tableau IV-13: Résultats expérimentaux du mortier F sec associés au dosage de 10%	99
Tableau IV-14: Résultats expérimentaux du mortier F humide associés au dosage de 10%	99
Tableau IV-15: Résultats expérimentaux des propriétés mécaniques du mortier F Sec en fonction du dosage	99
Tableau IV-16: Résultats expérimentaux des propriétés mécaniques du mortier F humide en fonction du dosage	100
Tableau IV-17: La fraction granulaire de la terre de Rabat	103
Tableau IV-18: Limites de consistance de la terre R	103
Tableau IV-19: Composition chimique de la terre de Rabat (R)	109
Tableau IV-20: Résultats de l'essai d'absorption de la terre brute	111
Tableau IV-21: Résultats de l'essai d'absorption de la terre à 4% de ciment	111
Tableau IV-22: résultats de l'essai d'absorption de la terre à 7% de ciment	111
Tableau IV-23: résultats de l'essai d'absorption de la terre à 10% de ciment	112

Tableau IV-24: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 0%	113
Tableau IV-25: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 0% à l'état humide	113
Tableau IV-26: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 4%	114
Tableau IV-27: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 4%	114
Tableau IV-28: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 7%	115
Tableau IV-29: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 7%	115
Tableau IV-30: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 10%	115
Tableau IV-31: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 10%	116
Tableau IV-32: Résultats expérimentaux du mortier R Sec associés aux différents dosages	116
Tableau IV-33: Résultats expérimentaux du mortier R humide associés aux différents dosages	116
Tableau IV-34: Résultats expérimentaux des propriétés mécaniques en fonction du dosage au ciment à l'état sec	121
Tableau IV-35: Résultats expérimentaux des propriétés mécaniques en fonction du dosage au ciment à l'état humide	121

I. Introduction générale

La terre est l'un des plus anciens matériaux de construction utilisés sur la planète. C'est l'un des plus répandus dans le monde. Plusieurs civilisations construisaient leurs maisons, forteresses ou cités en terre. Une bonne partie de ces édifices, inscrits sur la liste du patrimoine mondial par l'UNESCO, existe encore et fait preuve de durabilité comme la Grande Muraille de Chine, la cité Ur en Irak et la cité antique de Shibam au Yémen, ou encore les Kasbahs et Ksours dans le Tafilalet ou le Daraa au Maroc.

Depuis les années soixante du siècle dernier, pour des raisons économiques et environnementales, plusieurs pays ont réinvesti dans ce matériau en valorisant le patrimoine existant et en encourageant la construction de nouvelles habitations modernes respectant des normes et des règles de conception techniques modernes. A la tête de ces pays se placent l'Australie, la Nouvelle Zélande et le Pérou suivis par l'Allemagne, l'Espagne, le Maroc, l'Algérie, le Zimbabwe. Certains pays disposent même de réglementation antisismique [1].

De plus, s'ajoutent les nécessités tant urgentes que coûteuses pour la réhabilitation et la rénovation des sites historiques comme au Maroc. Ce patrimoine aussi riche que diversifié, comprenant les anciennes médinas, les ksours, les kasbahs, et les remparts, constitue non seulement une valeur culturelle et traditionnelle qu'il faut absolument restaurer et préserver, mais aussi un pôle touristique attractif.

Aujourd'hui encore, environ 30% de la population mondiale vit dans des constructions en terre [6, 28]. Il existe plusieurs zones à travers les continents [29].

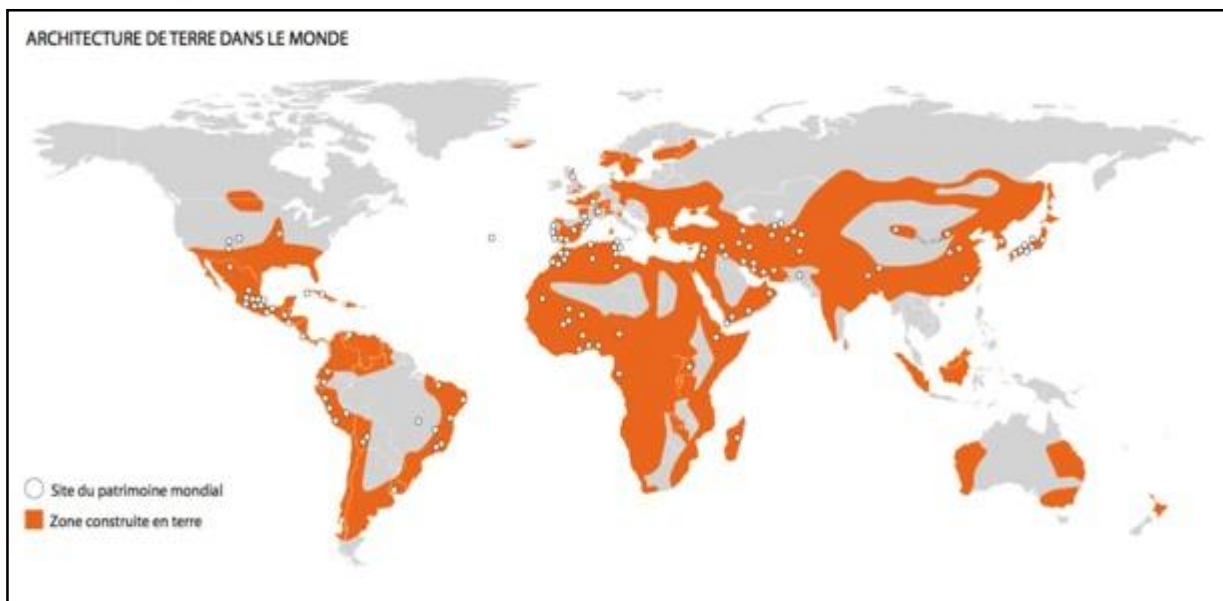


Figure I-1: La construction en terre dans le monde

Le matériau terre est un matériau local et naturel. Il est moins cher que les matériaux conventionnels, facilement disponible et accessible au plus grand nombre. La fiabilité de la construction en terre a été démontrée non seulement dans les pays en développement où la majorité de la population n'ont pas assez de moyens pour construire des maisons "modernes", mais elle l'a été aussi dans les pays riches.

Si l'avantage économique du matériau terre est un point fort, c'est l'avantage environnemental qui met le matériau terre dans la position d'un matériau "du futur".

L'avantage environnemental réside dans la très faible énergie grise consommée pour son extraction et la très faible pollution pendant la fabrication, et ce, on comparaison avec les matériaux conventionnels, tel que le béton basé essentiellement sur le ciment.

Le deuxième avantage réside dans la phase de démolition des bâtiments. Le bâti en terre est presque totalement recyclé. Le matériau terre traditionnel ne pose pas de problème de déchets comme dans le cas des matériaux conventionnels.

Les potentialités de la construction en terre ne se limitent pas seulement à sa disponibilité et au respect de l'environnement, mais comprennent aussi ses qualités de résistance, de durabilité, son caractère non toxique et ses remarquables caractéristiques thermiques, acoustiques et antisismiques.

Les recherches antérieures effectuées dans le domaine de la construction en terre s'intéressaient principalement à la résistance mécanique et à la durabilité du bloc ou du mortier en fonction du ciment ou en fonction de la granulométrie. Par un retour aux techniques de construction en terre, on cherche à obtenir et à disposer d'un autre matériau de construction efficace, économique et durable, apportant des performances techniques pouvant à même concurrencer le béton.

C'est dans ce sens que le présent travail se veut une contribution à la recherche des effets mutuels des compositions minéralogiques-chimiques et granulométriques sur le comportement mécanique du bloc de terre et du mortier. L'objectif est de pouvoir maîtriser les micros adjuvants contre la remontée capillaire du bloc de terre comprimée et du mortier de terre.

La structure de cette thèse s'articule autour de quatre chapitres. Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique relative à la caractérisation du matériau terre : son identification, sa composition granulaire, sa cohésion, son degré d'activité de sa fraction argileuse, son taux de retrait et de gonflement et son aptitude à la construction en BTC.

Le deuxième chapitre donne un aperçu général sur les différentes techniques de construction en terre et les avantages socio-économiques et environnementaux du matériau.

Le troisième chapitre présente les essais et les analyses de la terre prélevée de la ville de Fès (F) pour caractériser ses compositions minéralogique et chimique. Ce chapitre comporte la détermination de l'optimum technico-économique (OTE) pour la construction en bloc de terre comprimée stabilisé (BTC) et d'adobe, ainsi qu'une comparaison de la terre de Fès avec deux autres terres du Burkina Faso et de l'Algérie. L'OTE permet de prévoir le taux de ciment et de compactage nécessaires pour obtenir un bloc ou un mortier avec des propriétés optimales au moindre coût (ciment, compactage). L'optimum est aussi important particulièrement pour les opérations de restauration ou de réhabilitation d'une construction déjà en service.

Le quatrième chapitre est réservé aux résultats expérimentaux de l'étude du mortier de terre qui joue le rôle de la matrice de jointement des blocs et qui assure, en fait, leur cohésion dans la construction. Il joue aussi le rôle de mortier du revêtement qui protège la construction contre les agents extérieurs tels que le vent, la pluie, l'érosion etc. Ensuite, ce chapitre présente les propriétés chimiques-minéralogiques et de durabilité du mortier des terres de Rabat et de

Fès. Les éprouvettes d'essai sont stabilisées aux différents dosages en ciment 0%, 4%, 7% et 10%. On détermine également dans ce chapitre le coefficient d'absorption de l'eau pour ces différentes éprouvettes pour mieux réduire et maîtriser le phénomène de la remonté capillaire.

II. Caractérisation et utilisation du matériau terre

II.1. INTRODUCTION

Le sol est la fraction solide superficielle de la sphère terrestre. Il est constitué de plusieurs couches appelées :

- La litière: c'est la couche la plus superficielle du sol. Elle est constituée de feuilles mortes et de brindilles. Elle contient de la matière organique.
- L'humus: c'est une couche intermédiaire. Elle est de couleur brune et constituée de restes d'animaux et végétaux décomposés. On y trouve quelques petits débris de roches (grains de sable). L'humus contient de la matière organique et minérale.
- La couche minérale: c'est la couche la plus profonde. Plus ou moins brune, elle est constituée uniquement de débris de roches, donc de matière minérale.

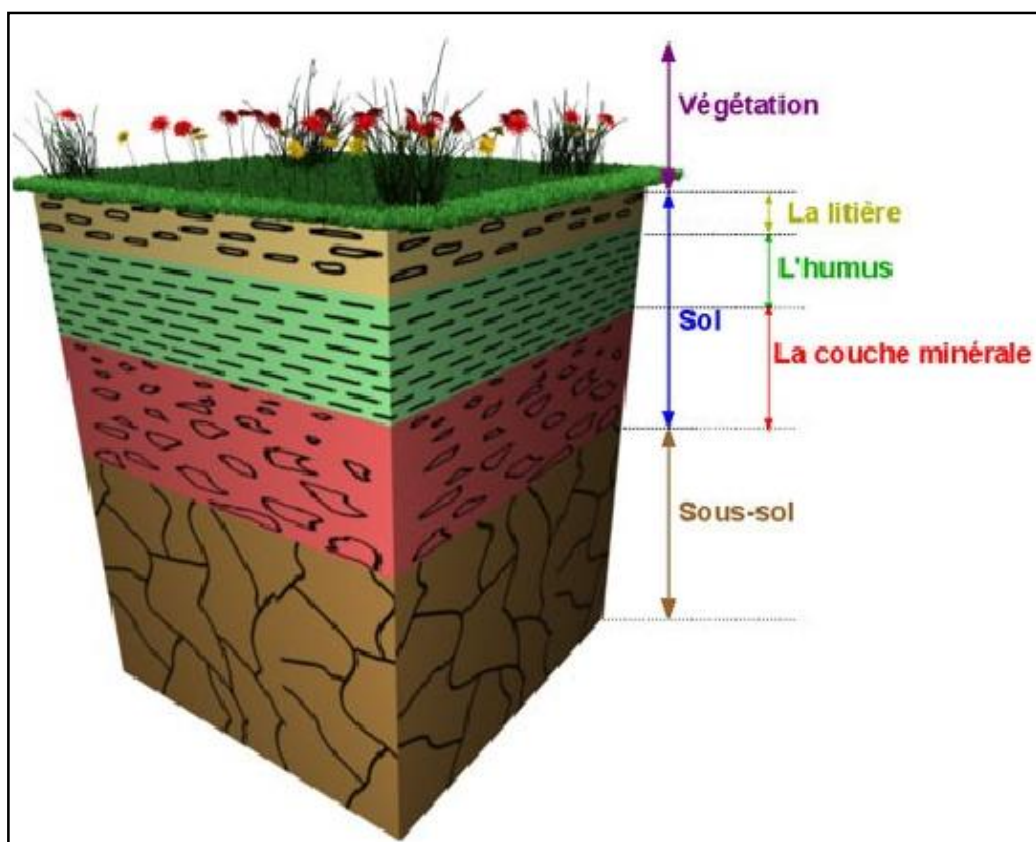


Figure II-2 : Schéma d'une coupe du sol

A la surface du sol, la terre est un matériau meuble, d'épaisseur variable. Elle est formée à partir d'une roche mère par des processus très lents de dégradation et par des mécanismes très complexes de migration de particules. Il en résulte une infinité de sortes de terres avec une variation illimitée de leurs caractéristiques. La terre végétale ou sol des agronomes, riche en matière organique, surmonte la roche mère, plus ou moins altérée. Elle est inutilisable pour la construction. Lorsque les terres sous-jacentes sont meubles et contiennent très peu de matière organique, elles sont utilisables pour la construction.

L'objet de ce chapitre est d'étudier la constitution du matériau terre afin de déterminer les caractéristiques minéralogiques et granulométriques pour lesquelles le matériau est utilisable en construction.

II.2. Les constituants du matériau terre

Le sol est un matériau hétérogène. Il est constitué par une phase solide comprenant les éléments minéraux et organiques, une phase liquide représentant essentiellement l'eau qui remplit les espaces libres existant entre les constituants de la phase solide, et une phase gazeuse représentant la porosité du matériau (Figure II.3). Cette dernière est composée de gaz ou de vapeur d'eau occupant les espaces (interstices) entre les grains de la phase solide et non remplis par la phase liquide. Les proportions respectives et la répartition de ces constituants caractérisent la structure et la texture de la terre.

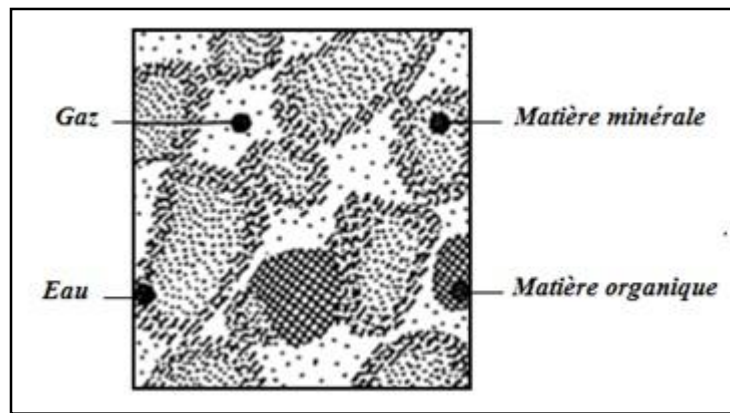


Figure II-3 : Vue du sol au microscope

Quatre grands types d'éléments, des plus gros au plus fins, composent le matériau terre : les graviers, les sables, les silts et les argiles. Chacun de ces types d'élément peut être subdivisé à son tour en gros, moyen et fin.

II.2.1. Les graviers

Les graviers sont des constituants stables qui n'interviennent que par leur poids et leur résistance propre pour donner au matériau un squelette rigide. Ce sont des éléments chimiquement inertes, grossiers, dont les dimensions sont supérieures à 2 mm. Leurs propriétés mécaniques ne subissent aucune modification sensible en présence d'eau.

II.2.2. Les sables

Ce sont des grains dont les dimensions sont comprises entre 0,02 et 2 mm. Ce sont des éléments stables. Les sables, à l'état sec, n'ont aucune cohésion, mais ils manifestent une grande résistance mécanique de frottement entre les grains. En revanche, les sables légèrement humides développent une cohésion apparente occasionnée par la tension superficielle de l'eau qui occupe les vides.

II.2.3. Les silts

La taille des particules de silt se situe entre 0.002mm (2 μ m) et 0.06 mm. Du point de vue physique et chimique, la fraction silteuse est presque identique à la fraction sableuse avec pour seule différence l'écart de taille. La contribution du silt à la stabilité d'une terre est due à sa friction interne. Les films d'eau interparticules confèrent un certain degré de cohésion aux terres silteuses. Du fait de leur perméabilité élevée, les terres silteuses sont très sensibles au gel.

II.2.4. Les argiles

Les argiles sont des minéraux issus de la décomposition de la roche mère. Il s'agit de matériaux hétérogènes à différentes échelles. A l'échelle macroscopique, elles sont généralement associées à d'autres minéraux (quartz, feldspath...). A l'échelle microscopique, elles présentent une structure en feuillets.

La taille des particules d'argile est inférieure à 0,002mm (2 μ m). Les particules d'argile diffèrent de celles des autres fractions de la terre par leur constitution chimique et leurs propriétés physiques. Selon EL YAKOUBI [2] les argiles sont des aluminosilicates plus ou moins hydratés et la majorité des minéraux argileux appartiennent au groupe des silico-aluminates phylliteux. Ils sont organisés en couches planes, constituées d'unités structurales tétraédriques et octaédriques reliées par leurs sommets. Ce type de structure à très grande surface spécifique, associée à des caractéristiques physico-chimiques très particulières, explique la capacité des argiles à admettre de nombreux échanges de cations et d'anions dans le réseau.

II.2.4.1. Caractéristiques microscopiques de l'argile

Les argiles sont des minéraux d'altération, c'est-à-dire qu'elles proviennent de l'altération et de la dégradation des roches : altération physique sous l'effet des variations de température mais surtout d'altération chimique au contact avec l'eau. L'effet de cette dernière permet la dégradation des particules très fines.

Les conditions dans lesquelles cette dégradation a lieu (température, pH de l'eau, etc.), ainsi que son état d'avancement, peuvent expliquer la grande variété des argiles. Par ailleurs, l'effet des phénomènes physico-chimiques jouent un rôle important lors de la désaturation–resaturation de l'argile. Il importe donc de comprendre la microstructure des argiles et l'état de l'eau dans les matériaux argileux [3]. L'argile est ainsi responsable du retrait et du gonflement de la terre.

Les minéraux argileux sont caractérisés par leur unité structurale ou cellule de base (cristallite) qui est constituée d'un feuillet et d'un interfeuillet appelé aussi interfoliaire (Figure II.4).

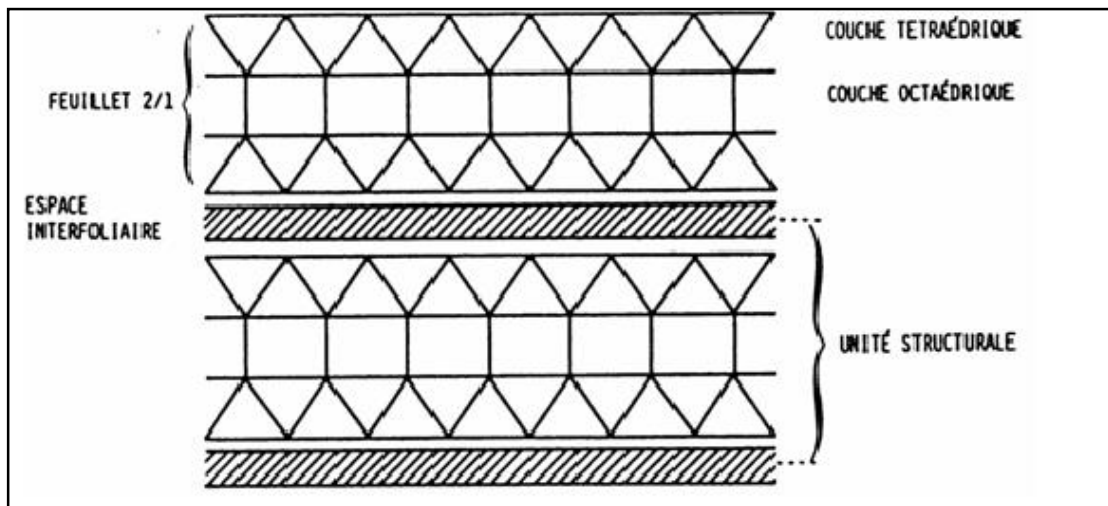


Figure II-4: Structure d'une couche argileuse [4]

L'interfeuillet est constitué de fluide d'eau assurant une liaison électrochimique entre les feuillets. Il existe différents types de liaisons interfeuillet liées notamment à des phénomènes de substitutions isomorphiques à la surface des cristallites. Une particule d'argile résulte de l'empilement de quelques cristallites élémentaires face à face. Des différentes possibilités d'empilement des couches dans les feuillets, de substitutions isomorphiques, de liaisons interfeuillets et d'arrangement spatial des cristallites, donnent la grande diversité de structures et de propriétés des argiles [4].

La structure de base du feuillet est elle même formée de deux ou trois couches cristallisées. Il existe deux types de couches :

- **La couche tétraédrique (T)** formée de tétraèdres Si^{4+} entourés par quatre anions O^{2-} aux sommets. Son épaisseur est de 4,6 Å, son bilan est de charge -1 (Figure II.5).
- **La couche octaédrique (O)** constituée par Al^{3+} ou Mg^{2+} , entouré par six groupes hydroxyle OH^- . Son épaisseur est de 5,05 Å et son bilan est de charge +2 (Figure II.6).

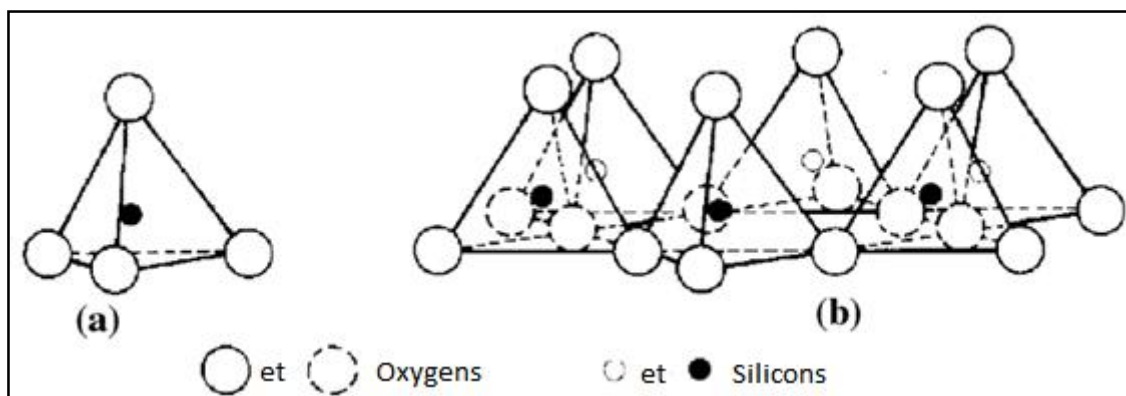


Figure II-5: a) Unité tétraédrique à cœur de silicium, b) Schéma d'une couche de tétraèdre $[\text{Si}_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2]^{6-}$ avec arrangement hexagonal [4]

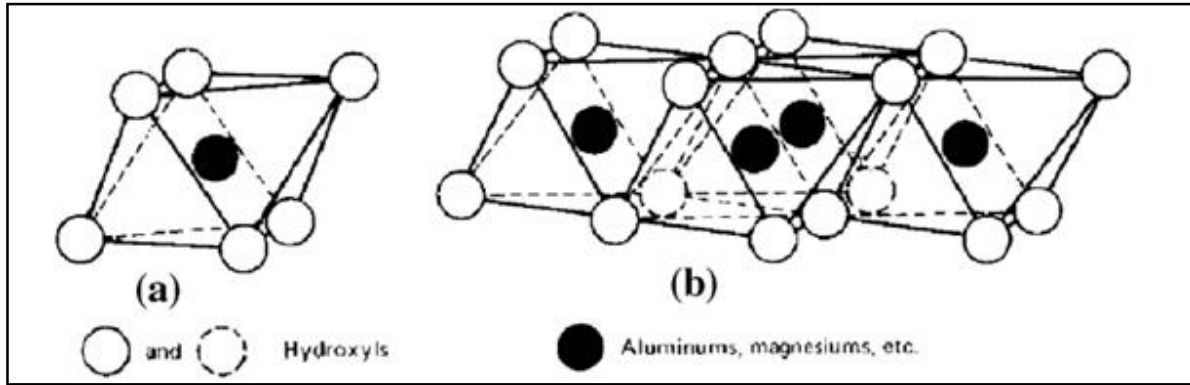


Figure II-6: a) Unité octaédrique b) Structure en couche à base d'octaèdre de Brucite $Mg(OH)_2$ ou de Gibbsite $Al(OH)_3$ [4]

Selon l'ordre d'empilement pour les deux couches octaédriques (O) et tétraédriques (T), on peut diviser les minéraux argileux en deux types :

- **le type TO (1 : 1)** est constitué par d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique (Figure II.7). Ces argiles, dont l'unité structurale de base est dissymétrique, sont constituées des groupes des kaolinites et des serpentines, ces derniers étant beaucoup plus rares.
- **le type TOT (2 : 1)** est formé d'une couche octaédrique (O) disposée entre deux couches tétraédriques (T). Ces argiles, dont l'unité structurale de base est symétrique, comportent de nombreux groupes (illite, smectites, interstratifiés, chlorites et montmorillonites) dont la structure et les propriétés sont très variables.

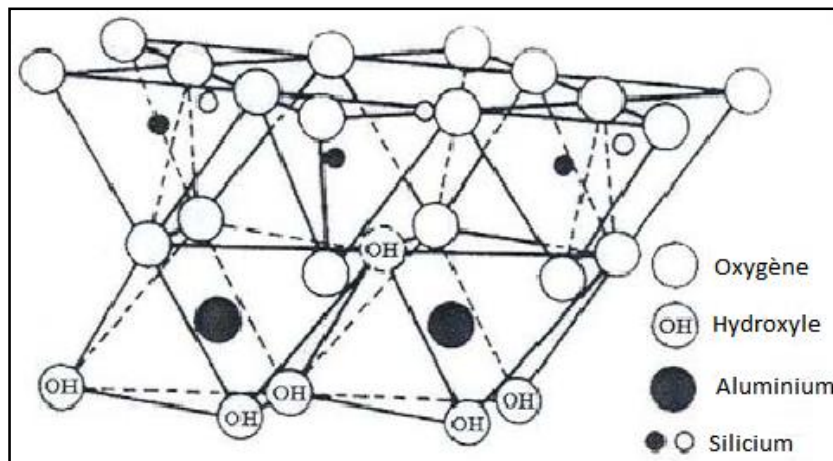


Figure II-7: Structure d'une couche tétraédrique et d'une couche octaédrique pour l'argile TO [3]

A partir de la structure de base des feuillets argileux, des substitutions entre cations sont possibles. On parle alors de substitutions isomorphes car les dimensions des feuillets ne varient quasiment pas. Ainsi, on remarque fréquemment le remplacement de Si^{4+} par Al^{3+} , dans le feuillet tétraédrique, et de Al^{3+} par Mg^{2+} et Mg^{2+} par Fe^{2+} dans le feuillet octaédrique. D'autres ions tels que Fe^{3+} , Mn^{2+} , Ti^{4+} , Ni^{2+} et Cr^{3+} peuvent également être retrouvés, mais avec une très faible quantité.

De plus, le cas où le feuillet est chargé négativement, afin d'assurer l'électro neutralité à cette échelle, un processus de compensation de charges peut s'opérer à deux niveaux : soit au sein du feuillet qui, de fait, reste neutre ; soit, et c'est la majorité des cas, à l'extérieur du feuillet, par adsorption de divers cations métalliques appelés alors cations compensateurs. Ces cations compensateurs peuvent être plus ou moins mobiles et dépendent des propriétés des surfaces des feuillets argileux et de la nature de ces cations.

Les cations mobiles peuvent donc être échangés avec d'autres ions présents dans la solution interstitielle. Par exemple, dans le groupe des montmorillonites (ou smectites), l'électro neutralité est assurée grâce à la présence de cations interfoliaires hydratés. La présence de molécules d'eau associées aux cations compensateurs concourt alors à l'écartement des feuillets argileux et donc au gonflement macroscopique observé.

II.2.4.2. Principales familles de minéraux argileux

Les principales familles de minéraux argileux sont représentées dans la Figure II.8 d'après Quoc Thai PHAM [4].

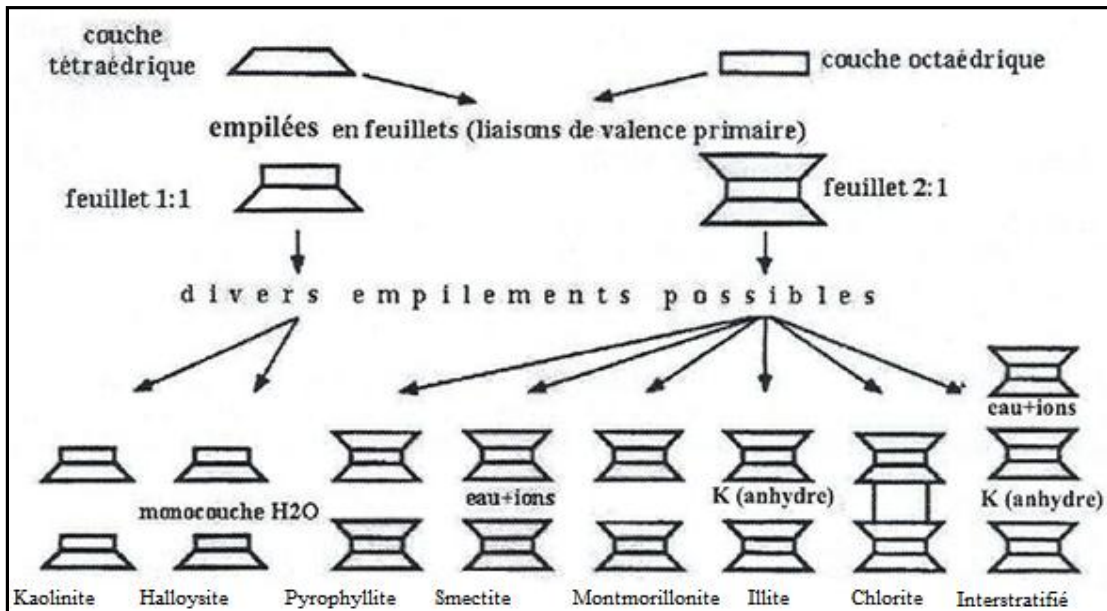


Figure II-8: Quelques groupes de minéraux argileux

a) Kaolinites

Les kaolinites sont des argiles de type 1:1 dont l'empilement des feuillets est fixé et ordonné. Les kaolins sont formés par altération atmosphérique ou hydrothermale de roches riches en aluminium. Ce sont donc des argiles très stables. Les feldspaths sont fréquemment le siège d'une alkanalisation avec élimination des métaux alcalins et d'une partie de la silice. Sous forme hydratée $\text{Al}_4[(\text{OH})_8\text{Si}_4\text{O}_{10}] \cdot 4\text{H}_2\text{O}$, la kaolinite se présente en masses compactes blanches qui deviennent translucides à l'eau. Les plaquettes elles-mêmes s'orientent spontanément et parallèlement les unes aux autres au sein de paquets [4].

b) Semectites

Les smectites sont également des argiles de type 2:1. Dans la couche tétraédrique les Si sont remplacés par des Fe, Cr et Zn. De plus les cations compensateurs sont très mobiles et donc facilement échangeables. Les feuillets sont faiblement liés si bien que leur empilement au sein d'une particule est relativement désordonné et que des couches d'eau peuvent s'intercaler entre les feuillets (Figure II.9). Dans l'espace interfoliaire, peuvent se loger divers cations, de l'eau et des molécules organiques, par conséquent la distance interfoliaire peut varier de 10 à 18 Å, ce qui donne aussi la grande variété de minéraux rattachés à cette famille [4].

c) Montmorillonites

La montmorillonite est composée de silicate d'aluminium et de magnésium hydraté, de formule générale $\text{Na}(\text{Al}, \text{Mg})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Sa structure est comme l'illite de type 2:1. Sa distance réticulaire est cependant plus importante, de 14 à 17 Å selon le taux d'hydratation de l'espace interfoliaire. C'est une argile gonflante [5].

d) Illites

Ce sont des argiles dites 2:1 dans lesquelles les substitutions ont surtout lieu dans la couche octaédrique. Le feuillet primaire est constitué d'un feuillet octaédrique entouré par deux feuillets tétraédriques. Les cations de compensations sont les ions potassium K^+ .

De plus, la superposition des feuillets est réalisée par contact et de manière parfaitement ordonnée et jointive. Ainsi, le potassium situé entre deux feuillets ne peut être échangé. Ceci induit une liaison très forte entre feuillets élémentaires : l'« emboîtement » des cations K^+ dans les cavités hexagonales interdit tout glissement ou séparation des feuillets, si bien que l'empilement des feuillets est alors ordonné et rigide et qu'il n'existe pas d'eau interfoliaire (Figure II.9). Ce type d'empilement confère à la particule élémentaire associée une grande stabilité.

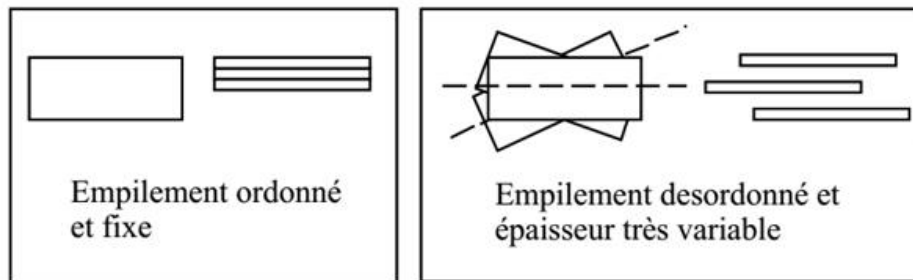


Figure II-9: Organisation des feuillets argileux à l'échelle de la particule [4]

e) Chlorites

De type 2:1, les Chlorites sont des aluminosilicates de magnésium, fer et aluminium formant un groupe de minéraux ressemblant aux micas mais avec un clivage moins facile. Les chlorites magnésiennes (pennine, clinochlore, ripidolite) $(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})_3[(\text{OH})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]\text{Mg}_3(\text{OH})_6$ sont sous forme de cristaux désordonnés à aspect hexagonal, organisés en agrégats.

De plus, ce sont des minéraux très répandus qui proviennent de la transformation hydrothermale de silicates ferromagnésiens de type biotite. Les chlorites ferrifères se trouveront dans les roches sédimentaires formant des bancs au milieu des calcaires [4].

f) Interstratifiés

Les minéraux interstratifiés, qui résultent de l'empilement de feuillets ou de paquets de feuillets, appartiennent à des familles différentes. On trouve généralement des interstratifications smectites-illites et smectites-kaolinites.

II.2.4.3. Etat de l'eau dans les matériaux argileux

L'eau joue un rôle majeur dans le comportement du matériau argileux. Sa cohabitation avec l'air dans les pores prend des formes variées, selon que l'eau domine et que l'air ne peut se déplacer librement, que l'air occupe l'essentiel des pores et que l'eau est bloquée aux contacts des particules, ou encore que l'eau et l'air peuvent se déplacer tous les deux.

Outre les phénomènes capillaires qui se développent aux contacts entre l'eau et l'air dans le matériau non saturé, l'eau peut interagir avec les minéraux des particules argileuses : ces interactions physicochimiques sont particulièrement importantes dans les argiles.

On cite trois types principaux d'état de l'eau [4], qui ont une grande influence dans le processus de la désaturation-resaturation, dans les matériaux argileux :

II.2.4.3.1. Eau libre

On retrouve l'eau libre principalement dans les espaces inter agrégats et éventuellement dans l'espace interparticulaire (loin des surfaces externes des particules) des matériaux argileux. L'eau dans ce cas circule librement dans le milieu sous l'effet d'un gradient de charge hydraulique.

II.2.4.3.2. Eau Capillaire

Le phénomène de capillarité se produit à l'interface entre deux fluides, car les molécules y sont soumises à un ensemble de forces d'interaction non équilibrée, à la différence d'une molécule située au sein du fluide.

II.2.4.3.3. L'absorption

L'absorption est un phénomène physique par laquelle un liquide migre de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux grâce à un phénomène de remontée capillaire.

II.2.4.3.4. Mécanismes de gonflement

Selon la force des liens unissant les feuillets d'argile avec l'arrivée d'eau ou non dans l'espace interfoliaire, on peut distinguer l'argile gonflante ou non gonflante. Dans certaines argiles (kaolinites, illites), l'eau ne peut s'engager entre les feuillets. Elles sont faiblement gonflantes dans ce cas. Par contre, dans les argiles des smectites, la faible liaison entre feuillets fait que chaque espace interfeuille peut s'hydrater. L'amplitude du gonflement dépend de l'état

initial, et des contraintes appliquées. Les smectites font partie des argiles gonflantes. Le phénomène de gonflement devient visible en raisons: de l'hydratation des espaces interfoliaires et de la répulsion entre les particules (feuillets).

L'eau peut latéralement pénétrer dans l'espace interfeuille. Les feuillets s'écartent, et la liaison entre deux feuillets parallèles doit alors être assurée différemment. Ce qui nous donne une réorganisation complète de la matrice solide. Cette réorganisation est sans doute le premier des deux points essentiels permettant de distinguer le gonflement des argiles gonflantes et celui d'un autre matériau naturellement poreux.

Le deuxième point est l'interaction eau argile liée aux ions présents dans l'eau. Les cations présents en solution sont attirés vers les surfaces des feuillets d'argiles chargées négativement. Il résulte de ces deux effets opposés une certaine distribution des cations au voisinage des feuillets. La même chose pour les anions qui sont repoussés électrostatiquement par les feuillets, ont une distribution spatiale particulière au voisinage des feuillets. La distribution des ions dans l'espace interfoliaire est généralement différente de celle dans les gros pores. [4]

II.3. Identification du matériau terre

II.3.1. Analyses préliminaires in-situ

On procède au prélèvement de la terre sur le site étudié (in-situ), la bonne terre est celle qui appartient au sous-sol pauvre en matière organique. Une fois cette terre est extraite, il importe de la caractériser en pratiquant quelques essais rapides d'identification.

Ces essais de terrain, simples à réaliser, permettent d'apprécier certaines caractéristiques du matériau que l'on se propose d'utiliser [7]:

II.3.1.1. Examen visuel

La terre sèche est examinée à l'œil nu pour apprécier l'importance de sa fraction sableuse et de sa fraction fine. On enlève les gros cailloux, les graviers et les gros sables pour faciliter l'évaluation (cette opération est également applicable à tous les essais qui suivent). La fraction fine est formée par les particules d'un diamètre inférieur à 0,08 mm, mesuré à l'œil nu.

II.3.1.2. Essai de l'odeur

La terre est de nature organique si l'odeur évoque le « moisi ». Cette odeur est amplifiée si l'on chauffe ou humidifie la terre.

II.3.1.3. Essai de morsure

On mord une pincée de terre et on l'écrase légèrement entre les dents. La terre est sableuse si elle crise avec une sensation désagréable. Par contre, la terre est silteuse si le crissement ne donne pas une sensation désagréable. La terre est argileuse si l'on éprouve une

sensation lisse ou farineuse, ou si une pastille de terre sèche est collante quand on y applique la langue. On fera attention à la qualité hygiénique de l'échantillon prélevé lors de cet essai.

II.3.1.4. Essai du toucher

Cet essai consiste à écraser l'échantillon entre les doigts et la paume de la main après avoir éliminé les plus grosses particules :

- Si on éprouve une sensation de rugosité sans cohésion à l'état humide, on dit que la terre est sableuse ;
- Si la rugosité est faible et si l'échantillon humidifié devient moyennement plastique, la terre est silteuse ;
- Si à l'état sec, la terre présente des mottes ou concrétions qui résistent à l'écrasement, et si elle devient plastique et collante lorsqu'elle est humidifiée, la terre est argileuse.

II.3.1.5. Essai de lavage

On se lave les mains avec la terre légèrement mouillée :

- Si les mains se rincent facilement, la terre est sableuse ;
- Si les mains ne sont pas trop difficiles à rincer et si la terre paraît pulvérulente, la terre est silteuse ;
- Si les mains sont difficiles à rincer avec une sensation savonneuse, la terre est argileuse.

II.3.1.6. Essai de l'éclat

Une boulette de terre légèrement humide est coupée en deux avec un couteau :

- Un aspect terne de la surface entaillée indique une terre plutôt silteuse ;
- Un aspect brillant indique que l'on est en présence d'une terre argileuse plastique.

II.3.1.7. Essai d'adhérence

Dans cet essai on prend une masse de terre humide qui ne colle pas aux doigts et on y enfonce une spatule ou un couteau (figure II.10) :

- Dans le cas où la spatule s'enfonce difficilement et si la terre y adhère lorsqu'on la retire, la terre est argileuse ;
- Dans le cas où la spatule pénètre sans grande difficulté et si la terre y adhère quand on la retire, la terre est moyennement argileuse ;
- Dans le cas où l'on pénètre et retire la spatule sans effort même si elle demeure sale lorsqu'on la retire, la terre dans ce cas est peu argileuse.

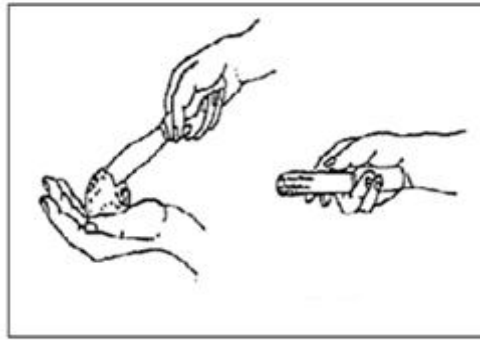


Figure II-10: Test d'adhérence

II.3.1.8. Sédimentation

Les essais précédents donnent des informations sur la texture de la terre et les quantités relatives des fractions granulaires. Pour acquérir plus de précision, le test de sédimentation suivant (Figure I.11), facile à réaliser sur le terrain, est recommandé.

Le matériel utilisé pour le dit test est un flacon de verre transparent, cylindrique à fond plat, de capacité minimale de 1 litre et doté d'un col assez large pour pouvoir l'obturer à la main.

La procédure du test consiste à :

- Remplir le flacon avec de la terre jusqu'au 1/4 de sa hauteur;
- Compléter les 3/4 du volume du flacon avec de l'eau pure;
- Laisser reposer le flacon pour permettre une imprégnation par une trituration manuelle;
- Obturer l'ouverture avec la main ou un couvercle approprié et agiter vigoureusement le flacon;
- Laisser décanter le mélange troublé sur une surface horizontale;
- Agiter de nouveau après 1 heure et laisser décanter.

Après environ 45 minutes, on peut constater que les sables se sont déposés au fond du flacon, surmontés d'une couche de silt couronnée par une couche d'argile. Au-dessus de l'eau surnagent des débris organiques. Après 8 heures, on mesure la hauteur totale des sédiments (100%) sans tenir compte de la hauteur d'eau claire qui les recouvre puis on mesure chaque couche distincte.

Ce calcul permet d'apprécier les pourcentages de chaque fraction granulaire [6,7]. Mais il est légèrement faussé par le fait que les fractions silteuses et argileuses sont expansées et apparaissent donc un peu plus importants qu'en réalité.

II.3.1.9. Test de retrait

Le test de retrait linéaire ou test d'Alcock est opéré à l'aide d'une boîte en bois de 60 cm de longueur, 4 cm de largeur et 4 cm de profondeur. De plus les faces internes de la boîte sont graissées avant de la remplir de terre humide à la teneur en eau optimale (figure II.11). La terre est compactée dans les angles de la boîte avec une petite palette en bois qui sert aussi à aplanir la surface. La boîte remplie est exposée au soleil 3 jours ou à l'ombre 7 jours. Après ce délai,

on pousse la masse de terre sèche et durcie en l'une des extrémités de la boîte et l'on mesure le retrait total de la terre en l'autre extrémité de la boîte.

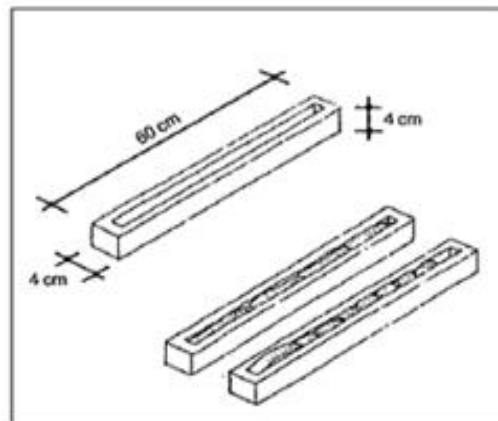


Figure II-1: Test de retrait

II.3.2. Analyses visuelles des fines

Les analyses visuelles sont réalisées sur la fraction « mortier fin » diamètre $< 0,4$ mm isolée par tamisage ou par le test de décantation à partir de la fraction de grains de diamètre < 2 mm.

II.3.2.1. Test de résistance

Ce test passe par les étapes suivantes (figure II.12) :

- Préparer deux ou trois pastilles de terre molle;
- Sécher les pastilles au soleil ou au four jusqu'à ce qu'elles soient totalement sèches;
- Casser la pastille de terre et essayer de la réduire en poudre entre le pouce et l'index;
- Tester l'évaluation de la résistance de la pastille.

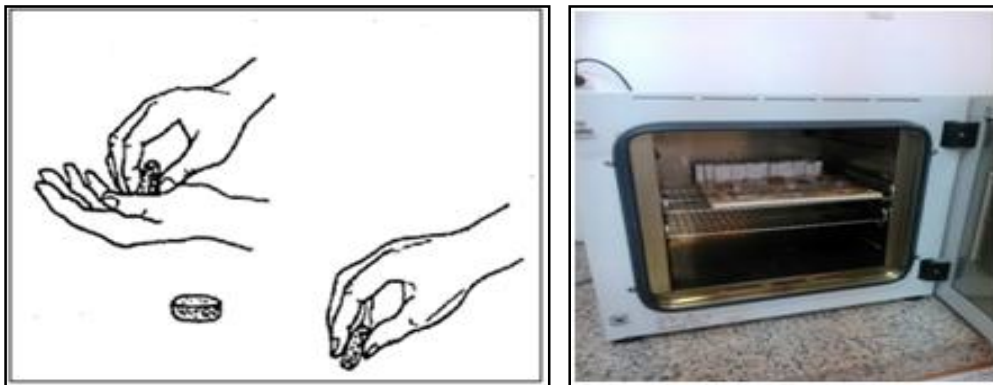


Figure II-2: Test de résistance à sec

Observations	Interprétations
Grande résistance à sec	- La pastille est très difficile à casser, elle se brise avec un claquement, tel un biscuit sec. On ne peut pas écraser la terre entre le pouce et l'index, seulement l'effriter sans la réduire en poudre: Argile presque pure.
Résistance moyenne à sec	- La pastille n'est pas trop difficile à casser. On arrive à la réduire en poudre entre le pouce et l'index après quelques efforts: Argile silteuse ou sableuse.
Faible résistance à sec	- La pastille se casse facilement et se réduit en poudre entre le pouce et l'index sans aucune difficulté: silt ou sable fin, peu d'argile.

II.3.2.2. Test de ressuage

Ce test comprend les étapes suivantes :

- Confectionner une boule de « mortier fin » de 2 ou 3 cm de diamètre ;
- Mouiller la boule de façon ce qu'elle se tienne sans coller aux doigts ;
- Aplatir légèrement la boule dans la paume de la main en extension horizontale ;
- Frapper vigoureusement la paume portant la boule aplatie pour en faire sortir l'eau. L'aspect terre peut être lisse, brillant ou gras ;
- Presser ensuite la boule plate entre le pouce et l'index et observer les réactions (figure II.13).



Figure II-33: Test de ressuage

Observations	Interprétations
Réaction rapide	- 5 à 6 coups suffisent pour faire remonter l'eau à la surface. - En pressant, l'eau disparaît puis la boule s'effrite: sables très fins ou silts grossiers.
Réaction lente	- 20 à 30 coups sont nécessaires pour que l'eau remonte à la surface. - En pressant, la boule ne se craquelle pas ni s'effrite; elle s'aplatit: silt légèrement plastique ou argile silteuse.
Réaction très lente ou nulle	- Aucune réaction de ressuage en surface. - En pressant, la boule demeure brillante: terre argileuse

II.3.2.3. Test de consistance

Ce test passe par les étapes suivantes (figure II.14) :

- Confectionner une boule de « mortier fin » de 2 à 3 cm de diamètre ;
- Mouiller pour pouvoir modeler sans que la terre soit collante ;
- Rouler la boule sur une surface plane et propre. Si la terre est trop sèche, rajouter un peu d'eau ;
- Si le cordon casse avant un diamètre de 3 mm, la terre est trop sèche, rajouter un peu d'eau ;
- Le cordon doit se fractionner lorsque son diamètre est égale à 3 mm ;
- Le cordon brisé, reconstituer une boulette et l'écraser entre le pouce et l'index :
 - ✓ Si la boulette s'écrase difficilement sans se fissurer ni s'émietter, la terre contient beaucoup d'argile et dans ce cas l'argile est pure.
 - ✓ Si la boulette se fissure et s'émiette, la terre contient peu d'argile, et le cordon mi-dur.
 - ✓ S'il est impossible de reconstituer une boulette sans qu'elle ne se casse ni s'émiette, la terre contient beaucoup de sables et de silts et très peu d'argile, et le cordon est fragile.
 - ✓ Si le cordon et les boulettes sont mous et spongieux, la terre est organique.



Figure II-44: Test de consistance

II.3.2.4. Test de cohésion

- Confectionner un rouleau de terre de la taille d'un cigare de diamètre 12 mm (figure II.15) ;
- Le cordon est placé dans la paume de la main. On l'aplatit entre le pouce et l'index en commençant par une extrémité jusqu'à obtenir un ruban de 3 à 6 mm de largeur (manipuler avec précaution) pour obtenir la plus grande longueur possible ;
- Mesurer la longueur obtenue avant que le rouleau ne se casse :
- ✓ Si le ruban a une longueur comprise entre 25 et 30 cm, la terre contient beaucoup de d'argile.
- ✓ Si le ruban est court et a une longueur comprise entre 5 et 10 cm difficilement obtenue, la terre contient une faible teneur en argile.
- ✓ Si pas de ruban : la terre contient une très faible teneur en argile.



Figure II-55: Test de cohésion

II.3.3. Essais de laboratoire

II.3.3.1. Granulométrie

L'analyse granulométrique est l'opération qui consiste à étudier la répartition des différents grains d'un échantillon, en fonction de leurs caractéristiques taille et masse. L'analyse granulométrique consiste à déterminer la distribution dimensionnelle des grains constituant un granulat dont les dimensions sont comprises entre 0,08 et 200 mm. On appelle [8]:

- Refus : la quantité de matériau qui est retenue sur le tamis.
- Tamisat (ou passant) : la quantité de matériau qui passe à travers le tamis.

Il y a plusieurs techniques d'analyse granulométrique qui sont basées sur des principes variés : séparation mécanique (tamisage) ou par l'intermédiaire d'un fluide, gaz ou liquide,

variation de résistance électrique, imagerie, diffraction ou absorption de rayonnements. Ces techniques sont :

- Le tamisage ;
- La sédimentation ;
- Le compteur Coulter ;
- L'analyse par imagerie ;
- La granulométrie laser.

Dans ce travail, on va utiliser pour la détermination de la granulométrie de nos échantillons, la technique de Tamisage (Figure II.16), qui est l'une des plus anciennes méthodes d'analyse granulométrique, et aussi l'une des méthodes les plus largement utilisées pour son faible coût. Le principe de base du tamisage consiste à diviser un matériau pulvérulent en le faisant passer à travers plusieurs tamis dont les caractéristiques dimensionnelles sont connues [9].



Figure II-16: Tamisage

II.3.3.2. Sédimentométrie

Après l'essai de tamisage, on recueille les particules qui ont traversé le tamis d'ouverture 80 μm . Ensuite, on mesure leurs grosseurs par sédimentométrie (Figure II.17).

La procédure utilise le matériel suivant [5,10–13]:

- Deux éprouvettes graduées de 1000 ml, de diamètre = 5,5 cm;
- Un thermomètre et une montre ;
- Un densimètre gradué de 0,995 à 0,1030 g/cm^3 [14].

La fraction de terre de diamètre inférieure à 0,08 mm qui doit être analysée est préparée sur la base des fines qui ont été étuvées après tamisage : 20 g prélevées et mélangées avec 20 cm^3 de défloculant.

La solution est remuée avec un agitateur pendant 3 min et laissée au repos pendant 18 heures. Les mesures commencent après ce délai. On agite à nouveau la solution de la 1^{re} éprouvette pendant 3 min puis on y plonge le densimètre doucement, après 45 secondes. On prend avec le chronomètre les mesures à 1 min et 2 min, sans sortir le densimètre. Les autres mesures sont prises à 5 min, 10 min, 30 min, 1 h, 2 h, 5 h, et 24 h.

On plonge le densimètre environ 15 secondes avant de faire la lecture et on le retire aussitôt pour le plonger dans l'éprouvette témoin (figure II.18). Il est très important de vérifier à chaque mesure l'égalité de température des 2 éprouvettes car une différence peut influencer la qualité de l'analyse. On ne poursuit pas l'analyse au-delà de 0,001mm car pour cette taille de grains, des phénomènes de turbulence et de défloculation perturbent la sédimentométrie. La procédure de cet essai consiste à mesurer la vitesse de sédimentation des grains. Cette vitesse dépend de leurs tailles et est déduite par la mesure de la densité de l'échantillon en suspension dans une solution aqueuse à des instants bien déterminés.

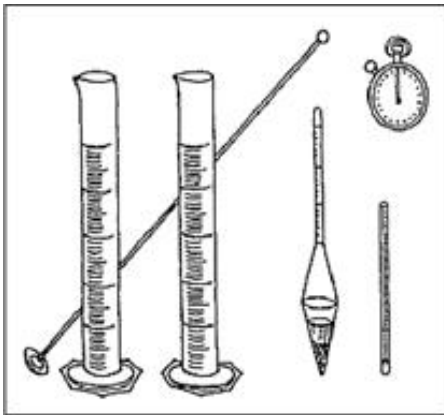


Figure II-6: Equipement pour sédimentométrie

Figure II-78: Test de sédimentation

Les résultats de cette analyse se présentent sous forme d'une « courbe granulométrique » tracée sur un diagramme spécial (diagramme granulométrique), comportant en abscisse, la grosseur des grains en échelle logarithmique, et en ordonnée le pourcentage des tamisats cumulés (figure II.19). Ce pourcentage exprime la proportion en poids des grains par rapport au poids de l'échantillon sec.

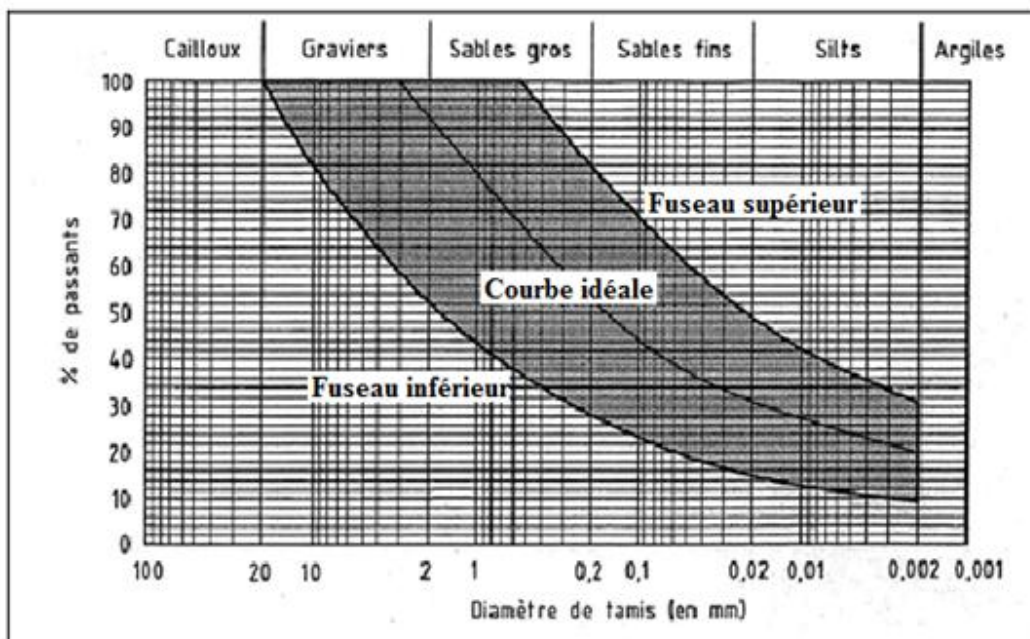


Figure II-8: Courbe granulométrique d'après [15]

II.3.3.3. Granularité optimale

Les conditions auxquelles devra répondre une granularité optimale pour une terre utilisée pour les constructions sont [16]:

- Sa courbe granulométrique doit être inscrite dans les fuseaux limites préconisés par CRATerre [6];
- Elle doit se rapprocher le plus possible de la courbe idéale (Figure II.19);
- Elle doit être approximativement parallèle aux courbes limites et à la courbe idéale, surtout dans les régions des limons.

II.3.3.4. Les limites d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont déterminées selon la norme française (NF P 94-051) et par la méthode à la coupelle avec l'appareil de Casagrande (figure II.20) [16,17]. Elle a pour but de déterminer la teneur en eau des différents sols prélevés à leur passage de l'état liquide à l'état plastique.



Figure II-20: Essai de liquidité; Appareil de Casagrande

Cet essai se pratique sur la fraction de sol dont les particules ont une dimension inférieure à 0,42 mm. Si à un échantillon de sol préalablement desséché et pulvérisé, on fait croître la teneur en eau de façon homogène par malaxage, il passe progressivement de l'état solide, à l'état plastique, puis à l'état liquide quand on augmente la quantité d'eau (figure II.21). Par définition, la teneur en eau W d'un sol est le rapport entre le poids d'eau et le poids de sol sec. Elle est exprimée en pourcentage. En 1905, Atterberg a défini des teneurs en eau fixant les limites entre les 3 états :

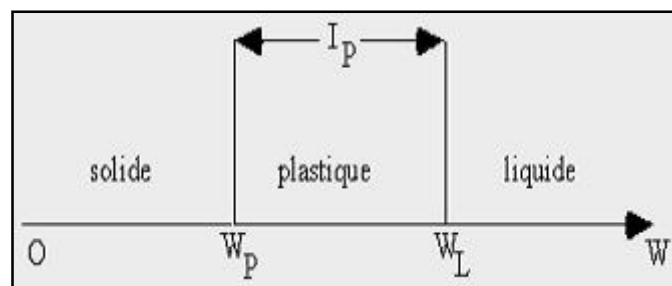


Figure II-9: Limites d'Atterberg

Ces limites ne représentent pas un état physique précis. Elles ont un caractère conventionnel et sont définies à partir d'essais normalisés.

II.3.3.5. Limite de liquidité W_L

Le mortier est placé dans une coupelle et est séparé en 2 parties par une rainure. Des coups secs sont imprimés à la coupelle avec un appareillage spécial. Par définition, la limite de liquidité est la teneur en eau pour laquelle les deux lèvres de la saignée se rejoignent sur une longueur supérieure à 1 cm pour un nombre de coups donnés à la coupelle égal à 25. (Norme NF P 94-051 et la fiche aide mémoire du laboratoire de génie civil 2iE).

II.3.3.6. Limite de plasticité W_P

C'est la teneur en eau au-dessous de laquelle il n'est plus possible de confectionner des boudins de sol de 3 mm sans qu'ils ne se rompent ou ne s'émiettent. Elle détermine la teneur en eau associée au passage de l'état plastique à l'état solide.

II.3.3.7. Indice de plasticité I_P

L'indice de plasticité donne l'étendue du domaine plastique $I_P = W_L - W_P$. La plasticité d'un sol (c'est-à-dire sa faculté à devenir très déformable en absorbant de l'eau) est appréciée par le couple (W_L , I_P) qui dépende de la nature des minéraux argileux contenus dans le sol et de leur quantité.

Ainsi, plus ' I_P ' est important, plus le gonflement par humidification de la terre et son retrait par dessiccation seront importants. ' I_P ' précise donc les risques de déformation du matériau [7]. L'indice de plasticité croît avec la teneur en éléments fins et cohérents.

La figure II.22, représente les différentes zones associées à la cohésion de la terre en fonction de la limite de liquidité.

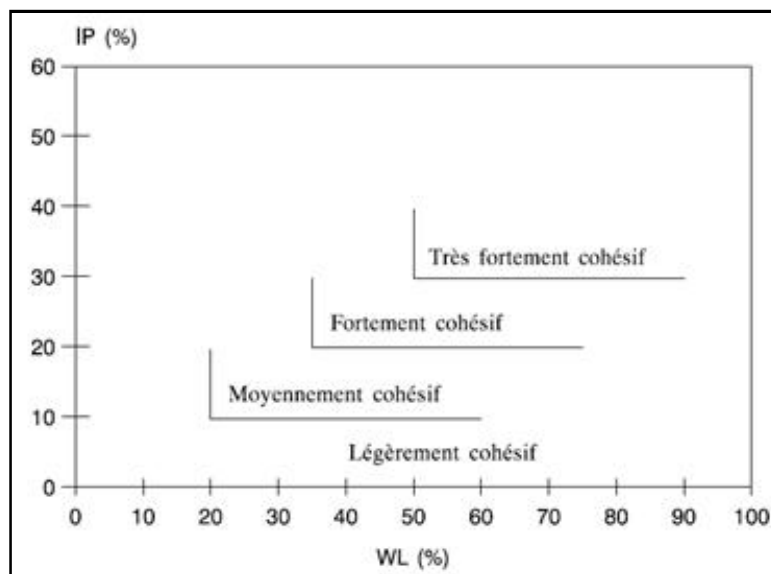


Figure II-22: Diagramme de cohésion [17]

II.3.3.8. Coefficient d'activité

Le coefficient d'activité donne une information sur le choix entre les différents types des matériaux fins et l'élimination des sols qui auraient un retrait ou un gonflement. Il est noté par '**Ca**', on calcule ce coefficient par la relation suivante [14, 18]: $Ca = \frac{Ip}{\% \text{ argiles}}$

Ce coefficient exprime le rapport de l'indice de plasticité sur le pourcentage d'argile de la terre dont le diamètre est inférieur à 2 µm car cette fraction granulaire est la plus sensible à l'eau. Les différentes zones d'activité sont décrites dans la figure II.23 [19].

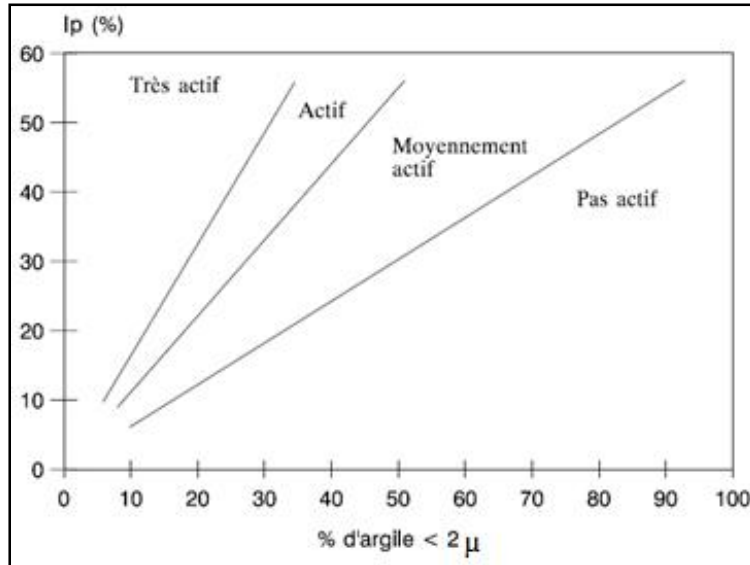


Figure II-103: Zones d'activités de la fraction argileuse [19]

Les terres peuvent être classées selon leurs degrés d'activité de la façon suivante :

Tableau II-1: Coefficient d'Activité

Activité	Inactif	Activité Moyenne	Actif	Très actif
Ca	< 0,75	0,75 < Ca < 1,25	1,25 < Ca < 2	> 2

II.3.3.9. Essais au Bleu de Méthylène

La mesure de la surface spécifique des particules présentes dans un sol offre une caractérisation de la teneur en argile de ce sol, puisque cette surface spécifique varie de façon très importante avec la nature des particules. L'essai au bleu de méthylène permet de le faire dans des conditions simples et rapides, en utilisant la propriété de la molécule du bleu de méthylène de s'adsorber sur la surface des particules minérales [14, 20].

L'essai est effectué en ajoutant successivement des doses d'une solution de bleu de méthylène dans une suspension aqueuse de matériau et par vérification de l'absorption de la solution colorée par un test à la tâche sur papier filtre pour déceler la présence de colorant libre.

Le bleu de méthylène a la propriété d'être absorbé préférentiellement par les argiles et les matières organiques.

Une masse connue de fines est dispersée dans l'eau distillée à laquelle on ajoute des doses croissantes de bleu de méthylène. Tant que le bleu de méthylène est absorbé, il ne colore pas l'eau. On le vérifie en déposant une goutte sur un papier buvard: le centre de la tache est bleu vif (argile ayant absorbé le bleu) et l'auréole de la tache reste incolore. A partir d'une certaine dose de bleu, l'auréole se colore aussi: c'est le signe que toute l'argile a épuisé sa capacité d'absorption. Le calcul de la surface spécifique, à partir du volume du bleu de méthylène V_B absorbé, est donné par : $S_B = 20,93 V_B$

II.4. Propriétés de la stabilisation de la terre

La stabilisation de la terre c'est la modification des caractéristiques de la structure terre – eau – air, pour obtenir des propriétés permanentes compatibles avec une application particulière [21]. Cela implique des changements affectant directement les interactions terre, eau et air dans la terre et permettant d'obtenir des propriétés permanentes qui rendent le sol adopté à diverses sollicitations telles que dans la construction [22,23].

La stabilisation est un processus complexe qui résulte de nombreux paramètres qui interagissent. Une connaissance des propriétés du sol permet de mieux envisager:

- Les propriétés de la terre à stabiliser ;
- Les améliorations ;
- L'économie du projet : coûts et délais de réalisation ;
- Les techniques de mise en œuvre ;
- La maintenance du projet réalisé : coût d'entretien.

Il est possible de modifier par la stabilisation deux principales caractéristiques de la terre : la texture et la structure. Ces changements améliorent les propriétés du sol telles que la porosité, la perméabilité et la résistance mécanique [21, 22]. Les objectifs visés par la stabilisation sont :

- La réduction de la porosité et de la tendance du sol au gonflement et à la fissuration ;
- L'obtention d'une meilleure cohésion ;
- L'amélioration de la résistance à l'érosion (création des liens ou amélioration des liaisons existantes entre les particules afin d'obtenir une résistance mécanique plus importante) ;
- L'amélioration de la force de compression humide et sèche, la force de traction et de cisaillement.

On dénombre trois principaux procédés de stabilisation :

II.4.1. Stabilisation mécanique

C'est le compactage de la terre qui modifie sa densité, sa résistance mécanique, sa compressibilité, sa perméabilité et sa porosité. Le sol est mécaniquement traité de sorte qu'un maximum d'air puisse être éliminé, ce qui contribue à une augmentation de sa densité. Dans la stabilisation mécanique, la distribution granulométrique des particules constitutives du matériau n'est pas affectée, mais sa structure est changée, car les particules sont redistribuées et mieux réorganisées [21,22]. La stabilisation mécanique est très utilisée en construction routière et nécessite une analyse préalable du sol afin de déterminer la teneur en eau optimale pour une meilleure compressibilité du sol.

Le compactage se pratique avec la teneur en eau optimale assurant une bonne lubrification des grains leur permettant de se réarranger entre eux pour occuper le moins de place possible.

En effet, si la teneur en eau est trop élevée, la terre risque de gonfler et la pression de l'engin de compactage est amortie par l'eau qui ne peut être chassée entre les grains. A l'opposé, si la teneur en eau est trop faible, la lubrification des grains est insuffisante et la terre ne pourra pas être compactée à son volume minimal.

La teneur en eau optimale (T.E.O.) à laquelle on obtient une densité sèche maximale est déterminée par l'essai Proctor. Les résultats sont consignés sur un diagramme qui note en ordonnée la masse volumique sèche, ' ρ_d ' exprimée en Kg/m^3 et en abscisse la teneur en eau, w , exprimée en % pondéral.

Les trois variables principales intervenant pour l'obtention de la masse volumique sèche maximale sont : l'énergie de compactage, la teneur en eau et la texture de la terre [24].

II.4.1.1. Energie de compactage

Une énergie de compactage croissante entraîne une augmentation de la densité sèche et une diminution de la T.E.O. [6]. En général, pour un compactage croissant, le sommet de la courbe Proctor est accentué alors qu'il s'aplatit pour un compactage moins énergétique. Au-dessus de la T.E.O., pour un volume d'air insignifiant, un compactage croissant n'a que peu d'effet sur la masse volumique sèche, ' ρ_d ' alors qu'en dessous de la T.E.O., pour un volume d'air important, l'effet d'un compactage croissant est manifeste (figure II.24). On ne parvient jamais à éliminer le volume d'air en totalité et donc à atteindre le maximum théorique de la densité sèche (souvent fixé à 2400 Kg/m^3) [6].

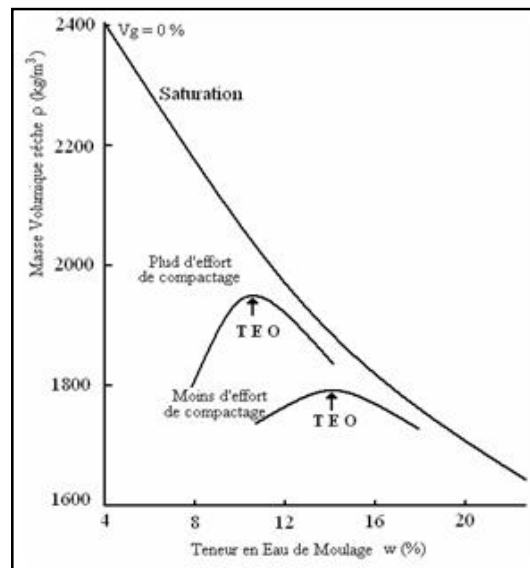


Figure II-24: Diagramme de l'influence de l'énergie de compactage sur la masse volumique sèche et la T.E.O.

II.4.1.2. Effet de la teneur en eau sur ρ_d

Pour une faible teneur en eau, la terre est difficile à comprimer, on obtient des ' ρ_d ' basses et des volumes d'air ' V_a ' importants.

Avec une augmentation de la teneur en eau, la terre est lubrifiée et plus ouvrable : les ' ρ_d ' sont plus importantes et les ' V_a ' plus réduits; ' ρ_d ' maximale correspond à la T.E.O.

Si la teneur en eau augmente davantage, ' V_a ' décroît mais la combinaison de l'eau et de l'air s'oppose à une réduction appréciable du volume d'air. Le volume total d'eau et d'air croît et ' ρ_d ' diminue.

II.4.1.3. Effet de la texture sur ρ_d

La densité sèche maximale dépend du type de terre et de ses caractéristiques principales, notamment, la dimension moyenne des grains pour un passant de 50% dans la courbe granulométrique.

- Les terres argileuses: $\rho_{d \max} = 2\,000 \text{ Kg/m}^3$
- Les terres sableuses: $\rho_{d \max} = 2\,200 \text{ Kg/m}^3$
- Les terres graveleuses: $\rho_{d \max} = 2\,500 \text{ Kg/m}^3$

En moyenne, la ' $\rho_{d \max}$ ' d'une terre comprimée varie de 1700 à 2300 Kg/m³ [19].

Etendue granulométrique:

- ✓ pour une texture uniforme, la porosité est élevée et la sensibilité à la teneur en eau réduite: La courbe Proctor est aplatie;
- ✓ Pour une texture étalée: la courbe Proctor est plus pointue.

Argile: le pourcentage des grains avec un $\phi < 0,08 \text{ mm}$ accentue les variations de ρ_d suivant la teneur en eau : courbes plus pointues.

L'appréciation de la terre à partir de la Teneur en Eau Optimale selon CRATerre, est présentée dans le tableau I.2.

Tableau II-2: Appréciation de la terre au compactage suivant sa teneur en eau optimale (Craterre)

<i>T.E.O.</i>	<i>de 7 à 9</i>	<i>de 9 à 17</i>	<i>de 17 à 22</i>	<i>de 22 à 25</i>
Appréciation	<i>Bien</i>	<i>Excellent</i>	<i>Acceptable</i>	<i>Eventuellement acceptable</i>

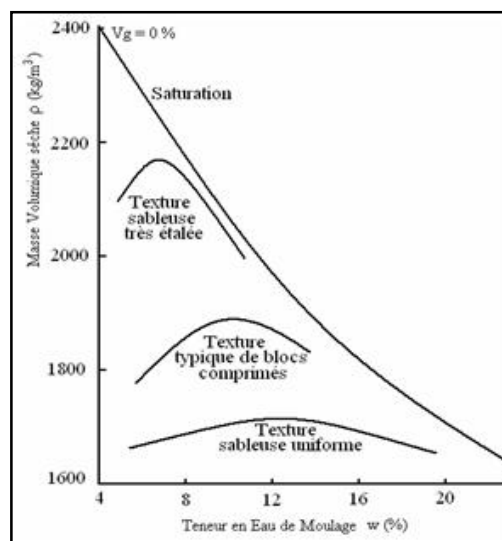


Figure II-115: Diagramme de l'influence de la texture de la terre sur la masse volumique sèche et la T.E.O. (CRATERRE)

II.4.1.4. Essai de compactage statique

L'essai de compactage statique est un essai de moulage sous pression, à force et teneur en eau variables, en compression à double effet. L'essai de résistance à la rupture se fait en compression simple, après avoir interposé un système anti frettage entre l'éprouvette et les plateaux de la presse (figure II.26).

Cet essai permet aussi d'établir les relations entre les paramètres de fabrication (teneur en eau, force de compression), les caractéristiques mécaniques du matériau obtenu (densité sèche, résistance à la compression) et des éventuelles stabilisations (ciment, chaux, paille,... etc.).

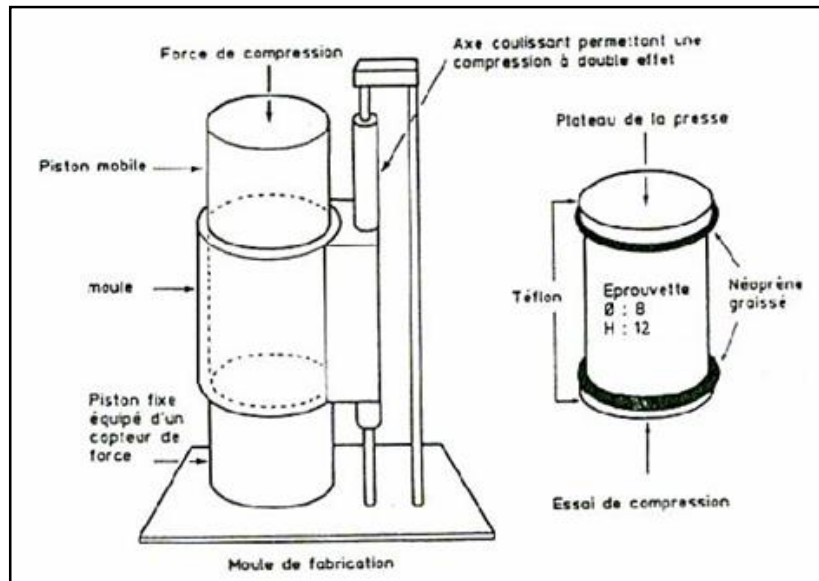


Figure II-26: Dispositif de l'essai de compactage statique [19]

II.4.2. Stabilisation physique

Les propriétés d'une terre peuvent être modifiées en intervenant sur la distribution granulométrique. Un mélange contrôlé de fractions de grains différents peut être envisagé soit par apport des fractions faisant défaut, soit par exclusion des fractions en excès. [21,22].

La stabilisation physique peut également consister à l'introduction des fibres végétales, animales, minérales ou synthétiques dans une terre. Ce procédé est utilisé soit avec la stabilisation mécanique soit tout seul, lorsqu'il y a des raisons de ne pas agir sur la distribution granulométrique, ou si le matériau est sensible aux mouvements induits par des causes telles que l'action de l'eau, l'expansion thermique, etc.

II.4.3. Stabilisation chimique - ciment

Cette stabilisation est basée sur un ajout à la terre d'un autre matériau ou produits chimiques pour modifier ses propriétés, soit par une réaction physico-chimique entre les particules et le matériau ou le produit ajouté, soit encore, par la création d'une matrice qui lie ou enrobe les particules de la terre. La réaction physico-chimique peut entraîner la formation d'un nouveau matériau : composé pouzzolanique issu d'une réaction entre l'argile et la chaux par exemple [21]. Les ajouts les plus utilisés pour la stabilisation des sols sont le ciment, la chaux ou le mélange ciment/chaux [25].

L'ajout de ciment avant le compactage (figure II.27), permet d'obtenir un matériau aux caractéristiques améliorées et dont la sensibilité à l'eau est réduite par l'irréversibilité des liens qu'il crée entre les particules les plus grosses. De ce fait, dans la terre, le ciment hydraté réagit de deux façons [16, 21, 26]:

- Réaction avec lui-même : formation d'un mortier de ciment peu hydraté; réaction avec le squelette sableux : mécanisme et classique du mortier.
- Réaction avec l'argile selon trois phases :

- L'hydratation provoque la formation de gels de ciment à la surface des agglomérats d'argile. La chaux libérée pendant l'hydratation du ciment réagit aussitôt avec l'argile. La chaux est vite consommée et l'argile entame une dégradation ;
- Progression de l'hydratation qui active la désagrégation des agglomérats d'argile, ces derniers sont pénétrés en profondeur par les gels de ciment ;
- Interpénétration intime des gels de ciment et des agglomérats argileux. L'hydratation persiste mais plus lente.

On obtient à cet effet trois structures mêlées :

- Une matrice inerte sableuse liée au ciment ;
- Une matrice d'argile stabilisée ;
- Une matrice de terre non stabilisée.

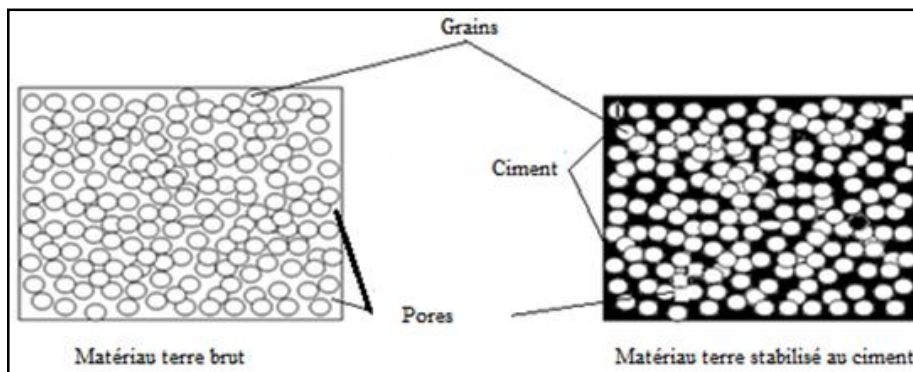


Figure II-27: Phase de saturation par ajout de ciment

La terre à stabiliser doit posséder après façonnage une bonne cohésion naturelle, c'est-à-dire que la teneur en argile doit être suffisamment élevée : supérieur à 10% [19] et pas trop argileuse inférieure à 20% [27].

Plus la terre est composée d'éléments fins, plus il faudra de ciment pour lier les éléments entre eux. Dans le cas où il est difficile de se procurer du ciment, il est moins coûteux d'avoir une terre contenant des éléments plus gros car nécessitant moins de ciment pour un même degré de stabilisation.

II.4.4. Conditions de mise en œuvre

II.4.4.1. Pulvérisation

Cette opération est importante et doit être effectuée avec grand soin. Plus d'argile et le silt seront finement désagregés, plus la terre sera homogène et dans le cas d'une stabilisation, l'action du stabilisant sera plus efficace. L'opération peut être difficile car l'argile présente une forte cohésion. Les éléments fins ne doivent pas se trouver trop concentrés dans des agglomérats dont la grosseur n'excédera pas 10 mm. La présence de 50% en poids d'agglomérats de fines de grosseur $\geq 5\text{mm}$ peut réduire la résistance à la compression de moitié [6,19].

II.4.4.2. Malaxage de mélange

L'homogénéité du matériau stabilisé au ciment est conditionnée par la qualité du malaxage. Il importe d'avoir de la terre sèche pour réunir les meilleures conditions de malaxage cela peut nécessiter un séchage préalable de la terre humide. L'eau nécessaire au mouillage ne sera ajoutée qu'en fin de malaxage [17,20].

II.4.4.3. Moulage

Juste après le malaxage, le matériau sera compacté avant le début de la prise de ciment et à une teneur en eau contrôlée, proche de l'optimum. Un écart de 4% de teneur en eau, en plus ou en moins, réduira très sensiblement la qualité du matériau. En règle générale, les terres riches en argile seront compactées du côté humide de la T.E.O. (valeur supérieure) et les terres riches en sables du côté sec de la T.E.O. (valeur inférieure) [6].

II.4.4.4. Séchage

La résistance d'une terre-ciment croît avec l'âge. 14 jours de cure de séchage sont absolument indispensables, 28 jours sont recommandés [6]. Pendant cette période, on maintiendra le matériau en ambiance humide, à l'abri du soleil et en prenant garde du vent pour éviter le risque de dessèchement rapide en surface conduisant la formation de fissures de retrait.

Les matériaux seront séchés en configuration compacte, humidifiés par aspersion ou recouverts d'une feuille de plastique qui maintient une élévation des températures tout en donnant une humidité relative proche de 100%. La durée de cette cure de séchage humide augmentera la résistance du matériau.

II.5. Les techniques de constructions en terre

Les techniques traditionnelles de construction en terre ont connu des développements considérables qui améliorent la durabilité et la qualité de la terre comme matériau de construction des habitats économiques et durables. De telles méthodes étudiées incluent l'adobe, le pisé, la bauge, le torchis, les blocs de terre comprimée...

Il existe ainsi de nombreux modes de construction en terre avec plusieurs variantes qui traduisent l'identité des lieux, des cultures, et des traditions constructives. On reconnaît principalement douze modes d'utilisation suivants (Figure II.28).

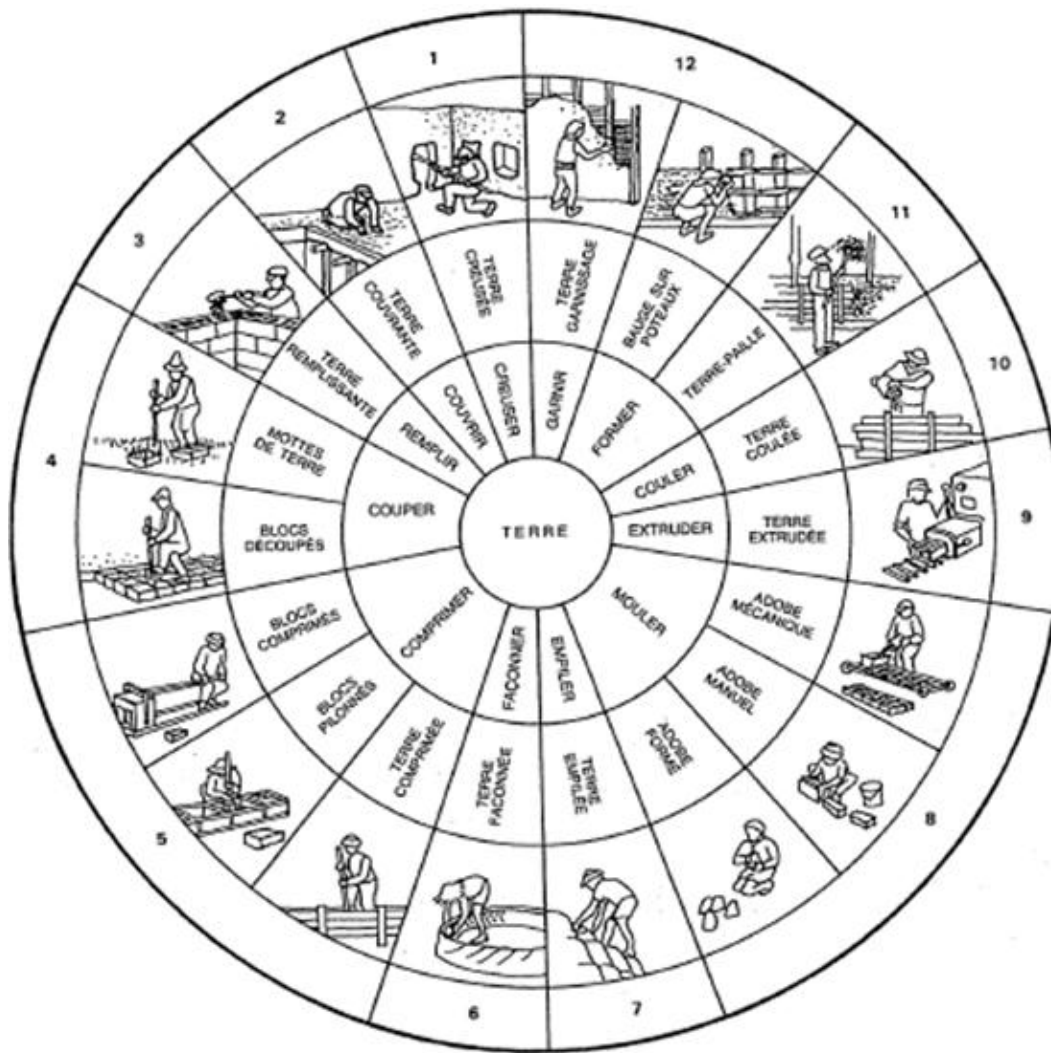


Figure II-128: Différentes techniques de construction en terre dans le monde établi par le groupe CRATERRE en 1986 (Houben, 2006)

Les types de construction en terre les plus couramment utilisées sont (Houben et al. [21]) :

II.5.1. Le pisé

Le pisé est une technique de construction donnant lieu à un système constructif monolithique utilisant une terre compactée dans un coffrage. Le pisé consiste à damer la terre, à l'aide d'un pilon ou dameuse entre deux coffrages parallèles, couche par couche et banchée par banchée. Les dimensions des coffrages sont généralement d'une longueur $L = 180$ cm, d'une largeur moyenne $l = 40$ cm et d'une hauteur $h = 80$ cm.



Mode de construction en Pisé
(Merzougga-Errachidia)



Ksar Oulad Yahya Siffa
Région de Tafilalet

Figure II-139: Construction en Pisé

II.5.2. L'adobe

L'adobe est une brique de terre crue. Elle est obtenue par moulage d'un mélange de terre, d'eau et éventuellement de la paille. Après démoulage, les briques sont séchées au soleil. Après une cure de 15 jours, les briques d'adobe sont mises en service en utilisant un mortier qui assure la liaison entre elles pour constituer un système constructif.



Adobe au séchage sous le soleil



Construction en Adobe

Figure II-14: A gauche : des adobes au séchage sous le soleil. A droite :

II.5.3. Le torchis

Le torchis est une technique de remplissage en terre crue. Il s'agit de remplir les vides d'une armature porteuse en bois (charpente en pan de bois), avec un mélange de terre et de paille enroulé autour de lattes de bois (ou éclisses). Le mot Torchis, vient de «tordre», car sa pose traditionnelle consiste à poser de la paille ou du foin torsadés dans une boue ou pâte de limon argileux sur des éclisses ou des gaulettes entre les colombages (figure II.31).

On distingue deux grands types de mélange:

- **Le torchis lourd:** beaucoup de terre et un peu de paille formant une armature. Il possède une masse volumique de 1400 kg/m^3 (1800 kg/m^3 humide). Il privilégie l'inertie et l'accumulation thermique (chaleur l'hiver ou fraîcheur l'été).
- **Le torchis allégé:** beaucoup de paille et un peu de terre. Il possède une masse volumique de $300 \text{ à } 400 \text{ kg/m}^3$. Il privilégie donc l'isolation, il est 9 fois plus isolant que le torchis traditionnel, car il renferme beaucoup d'air statique.

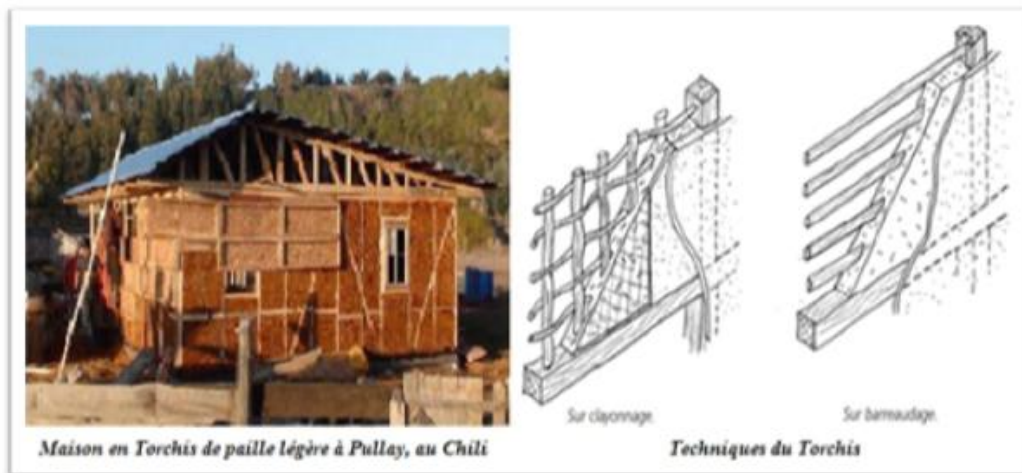


Figure II-31: Constructions en Torchis

II.5.4. La bauge (Cob)

La bauge est un système constructif monolithique en terre crue empilée. La terre à l'état plastique, généralement mélangée à des fibres végétales ou animales, particulièrement la paille. Cette technique consiste à empiler la terre sous forme de boule, et à la tasser jusqu'à obtenir une couche. L'assise est constituée de plusieurs couches (figure II.32).



Maison construite en Bauge



Technique de construire en Bauge

Figure II-15: Construction en Bauge

II.5.5. La terre paille

Pour la technique terre-paille, la terre utilisée doit avoir une bonne cohésion. Elle est dispersée dans l'eau jusqu'à l'obtention d'une barbotine homogène, que l'on verse sur la paille, jusqu'à enrober chaque brin. Au séchage, on obtient un matériau dont la texture est essentiellement celle de la paille (figure II.33).



Figure II-163: Construction en Terre Paille (France)

II.5.6. Le façonnage

Cette technique ancestrale est encore fréquemment utilisée de nos jours. La terre est façonnée de la même façon que pour la poterie à la main et sans outils (figure II.34).



Figure II-174: Constructions en façonnage au Togo

II.5.7. Le bloc de Terre Comprimée (BTC)

II.5.7.1. Définition et diversité des BTC

D'après les normes ARS 670 [53] et ARS 671 [45], les blocs de terre comprimée (BTC) sont des éléments de maçonnerie de dimensions réduites et de caractéristiques régulières et contrôlées, obtenus par compression statique ou dynamique de la terre à l'état humide suivie d'un démoulage immédiat.

La technique du bloc de terre comprimée (BTC) est une technique récente, par rapport à l'histoire de la construction en terre. Elle combine la caractéristique de compactage de la technique du pisé et la forme parallélépipédique de l'adobe. Il s'agit d'une amélioration de la technique de l'adobe. La terre est légèrement humidifiée à une teneur en eau précise et compactée dans un moule rigide.

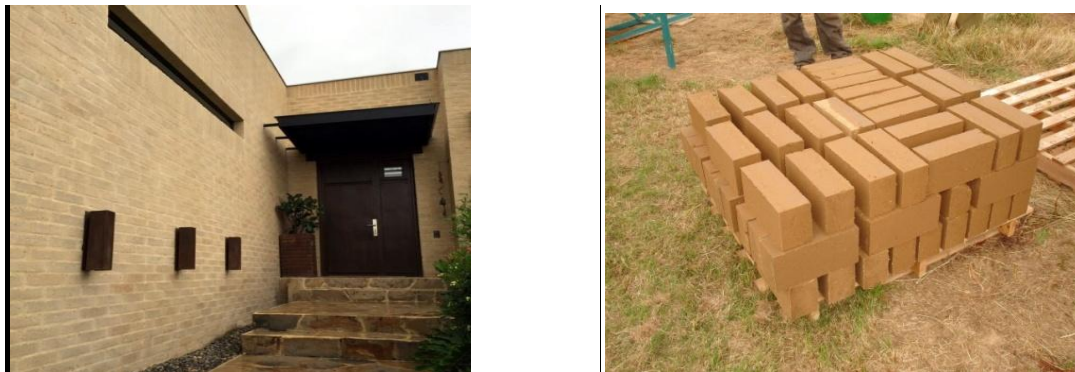


Figure II-185: A gauche : Maison en BTC ; A droite: Bloc de terre comprimée

Il existe une grande variété de presses pour la confection du BTC, allant de la presse manuelle (effort humain) aux presses industrielles avec une large gamme de formes de terre comprimée (Houben 2006) :

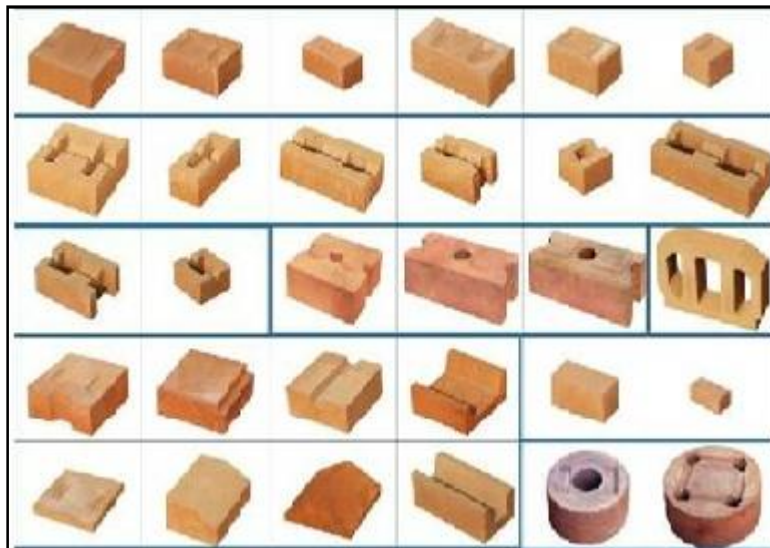


Figure II-196: Différents produits de blocs de terre comprimée

a. Blocs pleins

Ils sont principalement de forme prismatique (parallélépipèdes, cubes, hexagones multiples, etc.). Leur usage est très varié.

b. Blocs creux

On observe normalement de 15% de creux, 30% avec des procédés sophistiqués. Les évidements créés au sein des blocs améliorent l'adhérence du mortier et allègent les blocs. Certains blocs évidés permettent la réalisation de chaînages (coffrage perdu).

c. Blocs alvéolaires

Les blocs alvéolaires ont l'avantage d'être légers mais exigent des moules assez sophistiqués ainsi que des pressions de compression plus forte que la normale.

d. Blocs à emboitements

Ils peuvent éventuellement permettre de se passer de mortier mais exigent des moules assez sophistiqués et en général des pressions de compression plus ou moins élevées.

e. Blocs parasismiques

Pour ces blocs, leur forme améliore leur comportement parasismique ou permet une meilleure intégration de systèmes structuraux parasismiques : chaînage par exemple.

f. Blocs spéciaux

Les blocs spéciaux sont fabriqués exceptionnellement pour des applications spécifiques : comme les coins, les ronds, les arcs de fenêtres et de portes, partie décorative, etc.

Aujourd'hui, ce sont les techniques de l'adobe, du pisé et du bloc de terre comprimée qui sont les plus à l'honneur et même abordées à un très haut niveau de recherche scientifique et technologique. Toutefois, ces trois techniques majeures s'imposent au détriment des autres dont l'intérêt n'a pas été encore épuisé.

II.5.7.2. Avantages de la technique de construction en bloc de terre

Les avantages de la technique de construction en bloc de terre comprimée sont nombreux par rapport aux anciennes constructions en terre, on cite :

- ✓ Le BTC(s) est un matériau écologique : composée essentiellement d'argile, de sable et de gravillons et d'un peu de ciment, fabriquée sans cuisson,
- ✓ Le BTC procure des confort thermique et phonique excellents : de part son inertie thermique et acoustique,
- ✓ Le BTC offre une grande résistance à la compression qui dépasse les 60 bars (60kg/cm²),
- ✓ Le BTC présente un intérêt architectural et esthétique. En cloison et en mur porteur, le BTC permet une richesse de formes, et de motifs variés dans son utilisation,
- ✓ Le BTC est simple à mettre en œuvre. Il se monte avec un mortier de terre amendé. Les règles de construction sont simples à suivre,

- ✓ Une production manuelle à haute intensité de main d'œuvre et qui favorise l'économie locale,
- ✓ L'entretien et la réparation des constructions en BTC sont aisés et accessibles à l'aide de matériaux sur place (insitu).

II.5.7.3. Les essais sur blocs de terre comprimée

Les blocs de terre comprimée sont principalement constitués de la terre crue et doivent leur cohésion à l'état humide et à l'état sec essentiellement de la fraction argileuse composant la terre. De plus, un additif peut être ajouté à la terre pour améliorer ou développer des caractéristiques particulières des blocs.

Les blocs de terre comprimée ont généralement un format parallélépipédique rectangle et sont pleins ou perforés (Figure II.37). Voir également la figure II.39.

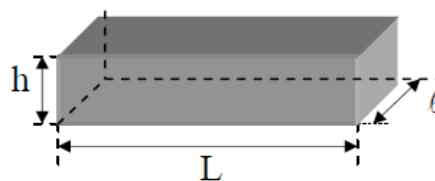


Figure II-207: Format du bloc de terre comprimée

Il existe 6 faces dans le bloc prismatique qui portant chacun un nom spécifique [53] :

- 2 faces appelées « panneresse » de surface ($L \times h$) ;
- 2 faces appelées « boutisse » ou « about » de surface ($l \times h$) ;
- 1 face appelée « face de pose » ($L \times l$), qui est la face supérieure du BTC posé ;
- 1 face appelée « face d'appui » ($L \times l$), qui est la face inférieure du BTC posé.

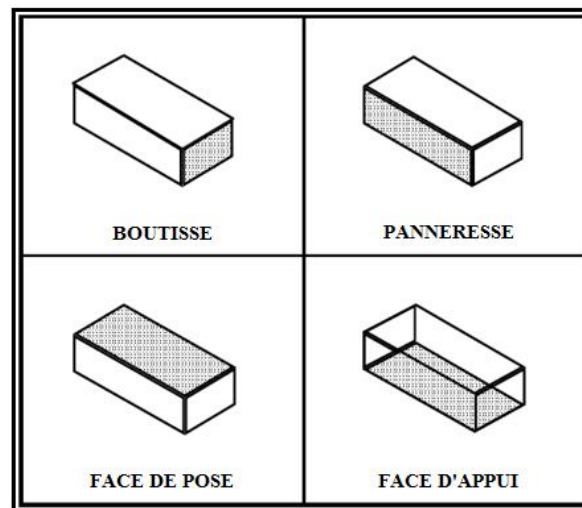


Figure II-218: Faces des BTC

Les dimensions et la qualité du bloc sont liées à :

- la qualité de la terre ;
- la nature du stabilisant ;

- la nature de la presse (manuelle ou motorisée) ;
- la qualité de l'exécution des différentes étapes de fabrication (préparation, malaxage, compression et cure).

Les différentes formes d'essais sur les blocs de terre comprimée communément utilisés, à savoir : le bloc, le demi-bloc et l'éprouvette cylindrique sont présentées dans la figure II.39

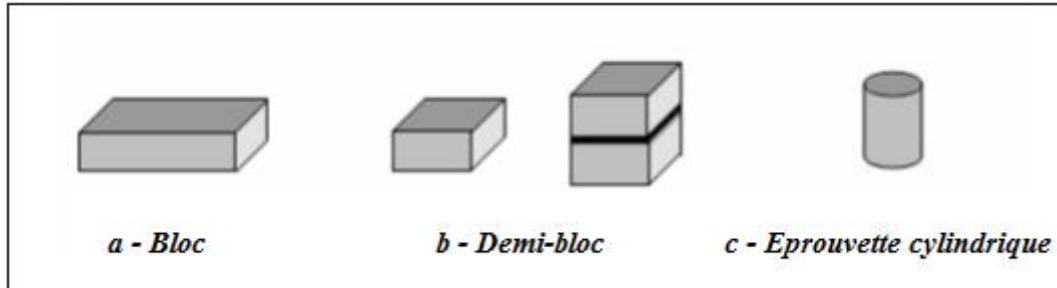


Figure II-39: Différentes formes d'essais de compression sur BTC

Les principaux essais sur les blocs de terre comprimée portent sur la détermination des résistances en compression et/ou traction, résistance à l'eau [50, 54–61].

Pour la résistance en compression, la mesure de sa valeur dépend du dispositif expérimental. Il est recommandé d'utiliser des éprouvettes normalisées. Comme le cas de la construction en béton, les courbes contraintes-déformations montrent l'augmentation de la résistance avec la diminution de l'élancement¹. Si ce coefficient est très élevé, la courbe peut présenter un déchargement immédiatement après l'écoulement [36, 51, 62,63].

Pour faire l'essai de compression uni-axial sur pisé, le coefficient d'élancement doit être autour de 2 [60], et pour les murets en maçonnerie d'adobe, ce coefficient est de l'ordre de 3 [64].

Concernant le bloc de terre comprimée (BTC), les essais d'écrasement sur bloc ou demi-bloc sont très homogènes avec un élancement variant entre (1,1 ~ 2,0) évitant tout effet de flambage [36, 39, 62]. Portant les recherches effectuées par Olivier et al. [50] ont montré que l'élancement 1,5 obtenu à l'aide d'un compactage statique présente une homogénéité avec un gradient de densité inférieur à 1%.

Des essais d'écrasement selon les trois directions du bloc, ont montré que la résistance en compression augmente chaque fois que l'élancement est petit [65]. Mais, avec une grande dispersion des résultats, l'écart atteint 54% pour un élancement de 0,22 [66].

Pour évaluer ces résistances en compression, de nombreux auteurs [67–69] ont reporté que l'essai sur éprouvette cylindrique permet, d'atteindre, notamment, une meilleure résistance, une représentativité des conditions réelles de chargement et de rupture, et par conséquent, un écart d'erreur réduit.

¹ L'élancement est défini par la mesure de la hauteur utile sur le diamètre (ou l'épaisseur ou la largeur de l'échantillon qui représente la base).

II.6. CONCLUSION

La terre est un matériau naturel difficile à définir, car elle n'a pas de composition précise normalisable à l'opposé d'autres matériaux industriels de construction, tels que l'acier et le béton.

Pour utiliser ce matériau dans des conditions sûres et économiques, il faut pouvoir, à priori, connaître les types d'argile, la texture, les conditions optimales d'emploi du matériau à utiliser, et à posteriori, vérifier que le matériau et les structures fabriquées correspondent bien aux normes de qualité et de résistance requises par le bâtiment.

La grande diversité des modes de mise en œuvre de la terre rend nécessaire l'étude des paramètres de base qui influencent les caractéristiques mécaniques et rhéologiques de la terre.

La brique en terre crue et la terre compressée, tel que le pisé, sont les techniques de construction en terre qui ont été les plus utilisées dans l'histoire de la construction jusqu'à nos jours. Actuellement, la terre crue intéresse à nouveau les constructeurs, car elle répond à la recherche de solutions respectueuses du développement durable.

Dans le présent travail, l'accent sera mis sur la construction en bloc de terre comprimée et stabilisée car il constitue une véritable alternative aux matériaux onéreux, raison pour laquelle il faut maîtriser l'effet conjugué de la minéralogie et de la granulométrie de la terre sur sa stabilisation, au ciment dans le cas étudié, ainsi que sa durabilité et sa capacité d'absorption d'eau.

III. Etude des effets conjugués de la minéralogie et de la granulométrie

III.1. INTRODUCTION

La stabilisation de la terre crue est un procédé appliqué systématiquement dans le domaine de la construction dans l'objectif d'améliorer ses performances mécaniques. La technique du bloc de terre comprimée et les briques d'adobes [6,32–38] sont utilisées dans ce sens avec des adjuvants de stabilisation, dont les plus connus sont le ciment, la chaux et les fibres.

Cependant, il est constaté que les résultats de cette stabilisation ne sont positifs qu'en fonction de la composition minéralogique [39–45] et granulométrique de la terre [46,47], en présence d'un dosage équilibré du ciment, pour favoriser les liens entre les argiles et les grains de la terre. La connaissance de la nature de la terre crue à utiliser dans la construction par l'identification scientifique de ses composantes, est indispensable à cet effet. Cette démarche cible la recherche des meilleures performances dans l'utilisation des matériaux naturels au niveau d'un habitat éco-responsable.

Notre recherche étudie dans la première étape les potentialités éventuelles de la terre de Fès (F) prise comme échantillon d'étude. Des analyses minéralogiques et chimiques sont effectuées sur cette terre pour déterminer ses éléments chimiques, ses proportions en éléments minéraux [28, 29, 48] et leur influence avec l'apport en ciment, et par conséquent, sur le comportement du matériau terre [6, 10, 11, 49,50].

La deuxième étape consiste à analyser les résultats pour la terre F, en comparaison avec les résultats expérimentaux des deux terres d'Afrique : Nadiapou au Burkina Faso référencée par B et Tizi-Ouzou en Algérie référencée par A. L'objectif est de quantifier l'effet conjugué sur l'optimum recherché en % ciment à la fois de la minéralogie et de la granulométrie, offrant la meilleure résistance dans le processus de stabilisation du matériau terre.

Le meilleur taux de la stabilisation sera considéré l'*optimum technico-économique*, noté par (OTE). L'application d'un modèle d'optimisation technico-économique [51,52] permettra de préciser le dosage en ciment à utiliser afin d'obtenir les caractéristiques mécaniques optimales des blocs de terre comprimée et des briques d'adobes stabilisées.

III.2. Caractéristiques de la terre d'essai de Fès (F)

La terre étudiée a été prélevée au centre de la ville de Fès sur une profondeur plus de 100 cm. Nous avons quantifié le comportement des blocs de terre comprimée par la détermination de la résistance en compression et le modèle d'élasticité de la terre F associés aux différents dosages en ciment : 0% (terre brute), 4%, 7% et 10% avec un effort de compactage constant de 2 MPa. Aussi, nous avons analysé l'effet des compositions minéralogique et chimique sur le comportement mécanique des blocs de terre.

III.2.1. Granulométrie

L'étude de la granulométrie de la terre F est primordiale avant de conclure sur son aptitude à la technique de construction en blocs de terre comprimée. Nous avons jugé nécessaire de porter la courbe granulométrique de la terre F dans le fuseau limite recommandé

par CRATerre (figure III.1). Ce fuseau sert de référence pour se situer dans le domaine de la construction en blocs de terre comprimée. La terre F est initialement tamisée à 20 mm.

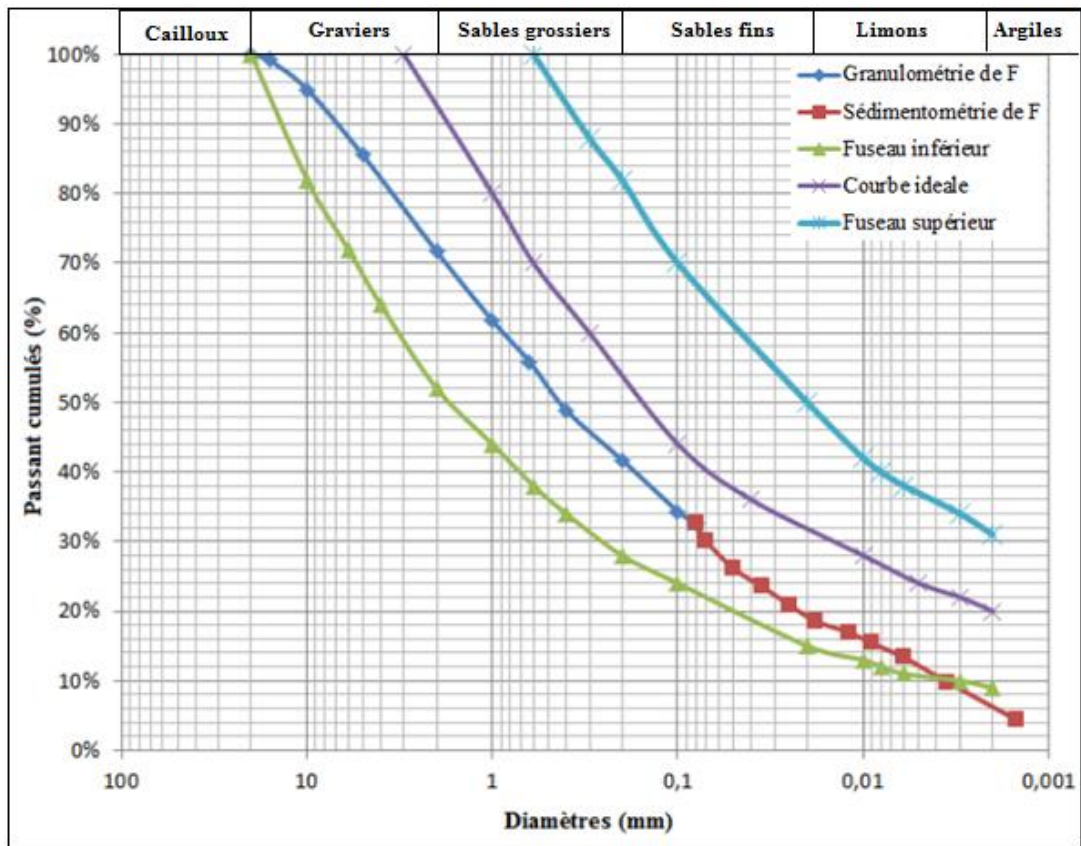


Figure III-1: Courbe granulométrique de la terre F

D'après la figure III.6, nous remarquons que la courbe granulométrique est totalement inscrite dans le fuseau préconisé par CRATerre. Elle est approximativement parallèle aux courbes limites et à la courbe idéale avec toutefois une faible fraction d'argile.

Le tableau suivant résume la fraction granulaire de la terre F :

Tableau III-1: La fraction granulaire de la terre F

	<i>Fraction granulaire (%)</i>				
	<i>Graviers</i>	<i>Sables gros</i>	<i>sables fins</i>	<i>Limons</i>	<i>Argiles</i>
<i>Terre F</i>	28	30	22	12	8

III.2.2. Limites d'Atterberg

L'analyse de la partie argileuse complète l'identification de la terre afin de définir ses états de consistance dits Limites d'Atterberg. Ces limites, à savoir : la limite de liquidité et la limite de plasticité sont mesurées sur le mortier très fin sur lequel l'eau agit en modifiant sa consistance.

Elles définissent les teneurs en eau qui séparent les différents états pour la terre : l'état liquide, l'état plastique et l'état solide,

Dans notre étude, nous avons déterminé la limite de liquidité ' W_L ', la limite de plasticité ' W_p ', l'indice de plasticité ' $I_p = W_L - W_p$ ', le coefficient d'activité ' Ca ' et la surface spécifique ' $Sa (m^2/g)$ ' de la terre F. Les valeurs obtenues sont illustrées dans le tableau III.2.

Tableau III-2: Limites de consistances de la terre F

	W_p (%)	W_L (%)	I_p (%)	Ca	$Sa (m^2/g)$
Terre F	25,32	35,58	10,26	1,28	48,93

A partir des tableaux III.2 et I.1 on conclut que la terre F est une terre moyennement cohésive avec une argile active bien que moins présente (juste 8%)

III.2.3. Analyses minéralogiques et chimiques

Pour analyser les éléments chimiques et déterminer les proportions des éléments minéralogiques dans la terre F, on a réalisé au laboratoire de l'UATRS² du CNRST de Rabat quatre différentes techniques d'analyses: la **D**iffraction des **R**ayons **X** (DRX), l'**I**nfra**r**ouge (IR), le **M**icroscope **E**lectronique à **B**alayage (MEB) et la **F**luorescence **X** (FX).

III.2.3.1. Diffraction des Rayons X (DRX)

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques situées entre les ultraviolets lointains et les rayons γ (longueur d'onde entre 100 à 1Å). Ils sont produits par bombardement sous vide d'une cible métallique par des électrons avec une haute tension accélératrice. Il y a production d'un spectre continu sur lequel se détachent les raies caractéristiques de la cible.

La DRX est une technique d'analyse non destructive utilisée pour la détermination de structure en monocristaux. Ainsi, l'étude permet l'analyse qualitative et quantitative de différentes formes cristallines disponibles dans l'échantillon analysé. La DRX est un phénomène d'interférence constructive qui se produit quand un faisceau des ondes électromagnétiques pénètre dans un empilement périodique d'atomes en cristal. Il peut donc apparaître quand on place un échantillon en poudre devant une source de rayons X.

L'emplacement des faisceaux diffractés nous renseigne sur la périodicité des atomes dans la maille, tandis que l'intensité de ces faisceaux nous permet de calculer la position ainsi que leur nature. Les propriétés chimiques ou physiques d'un matériau dépendent de la position et de la nature des atomes du cristal.

L'analyse par la DRX de la terre F (Figure III.2) montre qu'elle est formée principalement de calcite ($CaCO_3$), de quartz (SiO_2) et de dolomie ($CaMg(CO_3)_2$).

La présence de calcite et l'absence de portlandite montrent que les liants sont entièrement carbonatés. D'après Mertens et al. [70], le quartz n'est pas un liant à lui seul, il constitue une partie de la fraction de sable fin de l'agrégat.

² UATRS: Unités d'Appui Technique à la Recherche Scientifique du CNRST de Rabat.

III.2.3.2. Analyse d'Infrarouge (IR)

Les liaisons formées à partir d'atomes ou de groupements d'atomes ont des fréquences de vibration qui leur sont propres. Quand elles sont éclairées par des rayonnements électromagnétiques dont la fréquence est voisine de celle de leurs vibrations, elles entrent en résonance et puisent de l'énergie dans le faisceau. C'est cette perte d'énergie que l'on mesure [71]. Ainsi, cette analyse est une méthode complémentaire de l'analyse par DRX pour étudier les argiles et les minéraux argileux.

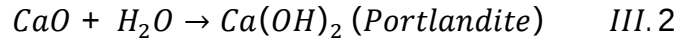
La formation de ces carbonates est liée aux conditions bio-physico-chimiques de la terre. Bien que la calcite est le produit de la carbonatation de la chaux, cette dernière, une fois gâchée à l'eau et mélangée avec du sable, possède la propriété de faire prise rapidement en agglomérant des particules inertes, tels que le quartz [42, 72–74].

Les réactions chimiques qui interviennent dans la préparation de cette dernière sont:

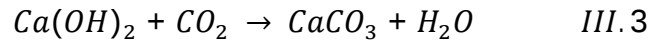
(i) Préparation de la chaux vive par incinération du calcaire entre 900 et 1000 °C:



(ii) Préparation de la chaux éteinte (portlandite) par mélange de la chaux vive à l'eau:



(iii) Carbonatation de la phase liante [74]:



Ainsi, on trouve des bandes d'acides humiques et fulviques qui sont liées à l'activité racinaire quelconque (2516.1, 2876.3, 530.5) cm^{-1} [42, 72, 73, 74].

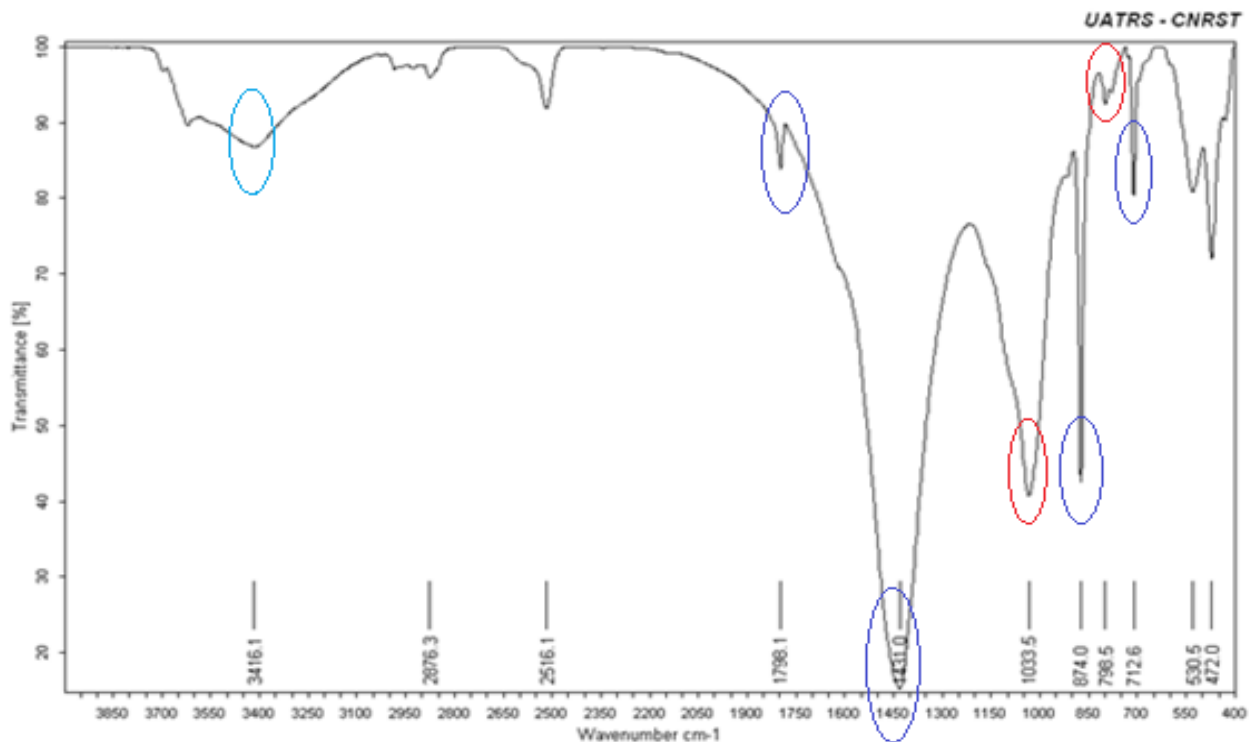


Figure III-3: Spectres d'Infrarouge de la terre F

III.2.3.3. Observations au Microscope Electronique à Balayage (MEB)

Le MEB est utilisé pour l'observation, en imagerie par électrons secondaires selon la topographie de l'échantillon. L'analyse élémentaire est obtenue par le couplage avec un système d'analyse dispersive en énergie (EDX).

Les microscopes à balayage utilisent un faisceau très fin qui balaie point par point la surface microscopique de l'échantillon [75].

Le **MEB** permet de réaliser des images de la surface des échantillons en trois dimensions avec une très haute résolution de l'ordre du nanomètre, ce qui donne des informations qualitatives sur l'homogénéité de l'échantillon.

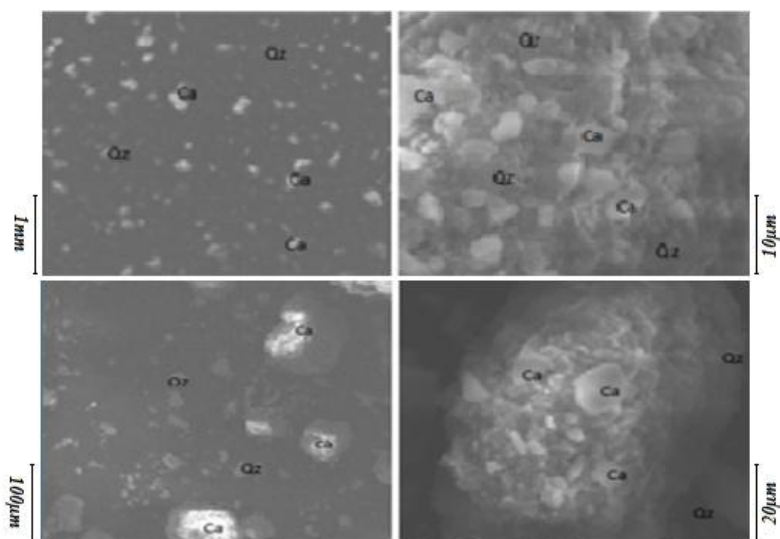


Figure III-4: Images MEB prises de la terre F
(Ca: calcite, Qz: quartz)

D'après les images de la terre *F* obtenues par le *MEB* (Figure III.4), on remarque que la calcite est dominante ainsi que le quartz.

III.2.3.4. Analyse par la fluorescence X

L'analyse par la fluorescence *X* permet de mesurer le pourcentage des éléments chimiques contenus dans l'échantillon de la terre *F*.

Le tableau III.3 résume les taux (concentrations) des différents éléments chimiques constitutifs, obtenus par fluorescence X :

Tableau III-3: Compositions chimiques de la terre F

N Composés	Conc %
P.a.f ³	32,9
CaO	31,8
SiO ₂	22,3
Fe ₂ O ₃	1,72
SO ₃	1,29
P ₂ O ₅	0,753
K ₂ O	0,536
Na ₂ O	0,323
TiO ₂	0,226

³ Pertes au feu

Afin de mieux comprendre et analyser ces taux, nous avons comparé ces derniers avec ceux du ciment d'abord comme matériau de référence et ensuite comme matériau de stabilisation du matériau terre.

L'analyse par la fluorescence X du Ciment (CPJ35):

L'analyse chimique de clinker montre qu'il est conforme à la norme NFP 15-301. La composition chimique et minéralogique du clinker est présentée aux tableaux III.4 et III.5

Tableau III-4: La composition chimique du clinker (%)

Compos ition (%)	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	Na ₂ O	SrO	PAF (perte au feu) à 975°C	Phli- guide	CaO libre
Ciment CPJ 35	12.46	57.02	3.39	1.89	1.35	1.95	0.62	0.18	0.03	0.11	-0.03	0.015	20.90	15,77	0.56

Tableau III-5: La composition minéralogique du clinker (%)

C3S	C2S	C3A	C4AF
50.04	-1,97	5,79	5,75

Silicate tricalcique : 3 CaOSiO₂ ou C3S

Silicate bicalcique : 2 CaO SiO₂ ou C2S

Aluminate tricalcique : 3 CaO Al₂O₃ ou C3A

Aluminoferrite tétracalcique : 4 CaO Al₂O₃ Fe₂O₃ ou C4AF

III.3. Essais d'écrasement des éprouvettes de la terre F comprimée et stabilisée

III.3.1. Fabrication des éprouvettes

La fabrication d'une éprouvette d'essai en terre comprimée et stabilisée est réalisée à l'intérieur d'un moule fixé sur un support extérieur, ce qui lui permet de se déplacer indépendamment des deux pistons assurant le compactage.

Les étapes de fabrication des éprouvettes sont montrées dans la figure III.5.

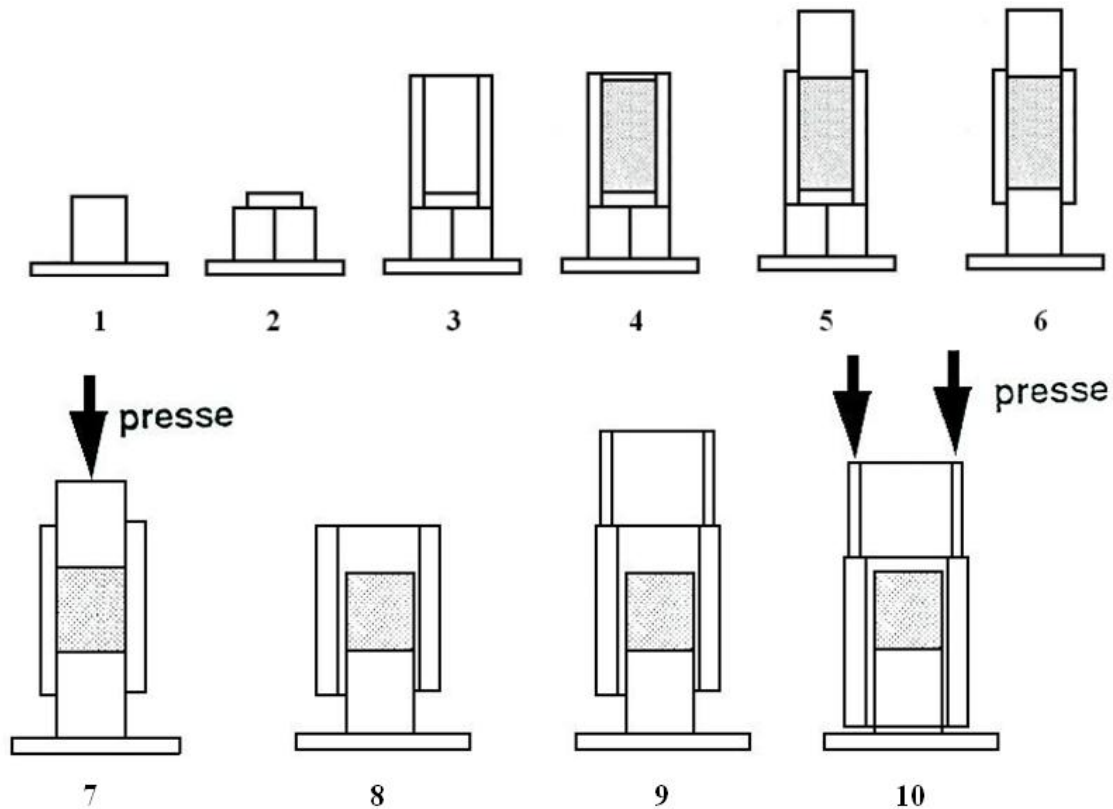


Figure III-5: Opération de compactage des éprouvettes [19]

- 1 : Mise en place du piston inférieur;
- 2 : Placer les coquilles de calage autour du piston inférieur;
- 3 : Mise en place du moule (sur les coquilles);
- 4 : Remplissage du sol;
- 5 : Mise en place du piston supérieur;
- 6 : Déblocage du piston inférieur;
- 7 : Compactage;
- 8 : Dégagement du piston supérieur;
- 9 : Mise en place du cylindre de démoulage sur le moule;
- 10 : Démoulage.

Les essais sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques de dimensions $h = 12 \text{ cm}$ et $\varnothing = 8 \text{ cm}$.

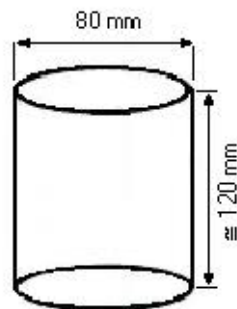


Figure III-6: Epreuve cylindrique

L'essai d'écrasement est effectué en plaçant un système anti-fretage composé du Néoprène et de Téflon (Figure III.7) entre les deux plateaux de la presse et les deux faces de l'éprouvette. Ce système permet une meilleure distribution des contraintes conduisant ainsi à une homogénéité des déformations et empêchant l'apparition des zones rigides locales instables qui engendrent des surfaces de rupture prématurées.

Le ciment utilisé dans cette étude est le CPJ 35, avec des dosages associés au bloc de 0%, 4%, 7% et 10%. Pour chaque dosage, nous avons déterminé la teneur en eau optimale selon l'essai Proctor avec laquelle les éprouvettes sont confectionnées. La teneur en eau optimale et la densité sèche de la terre F brute sont représentées dans le tableau III.6:

Tableau III-6: Densité sèche et la teneur en eau de la terre F brute

	<i>Densité sèche (g/cm^3)</i>	<i>Teneur en eau (%)</i>
<i>Terre F brute</i>	1,82	12,5

L'effort de compactage retenu dans cette étude est de 2 MPa équivalent à celui d'une presse manuelle.

Avant l'essai, toutes les éprouvettes ont subi une cure de 28 jours dont une conservation sous plastique de 14 jours ce qui entraîne une saturation du milieu en vapeur d'eau. L'hygrométrie est au-delà de 90%, ce qui favorise une meilleure prise de la pâte de ciment et une formation des liaisons solides. Une conservation à l'air libre de 14 jours permet de stabiliser la teneur en eau résiduelle tout en assurant un bon durcissement de la pâte de ciment.

La vitesse d'écrasement est fixée à 0,09 mm/s [6, 51, 62, 74].

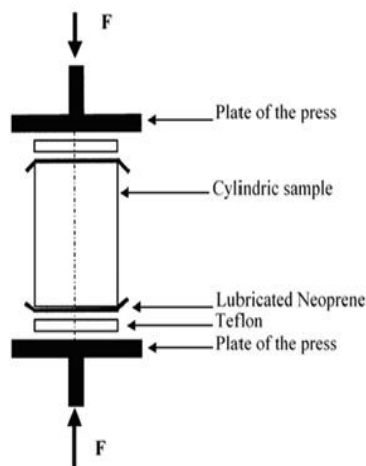


Figure III-7: Dispositif d'essai de compression

III.3.2. Comportement et rupture des éprouvettes

Les courbes contraintes-déformations correspondant aux essais de compression sur les éprouvettes de blocs de terre comprimée ont toutes la même forme (Figure III.8). Ces courbes sont similaires à celles obtenues dans plusieurs travaux [26, 34, 36, 51, 61,62, 74,76–81]. Elles présentent la forme où on distingue trois parties:

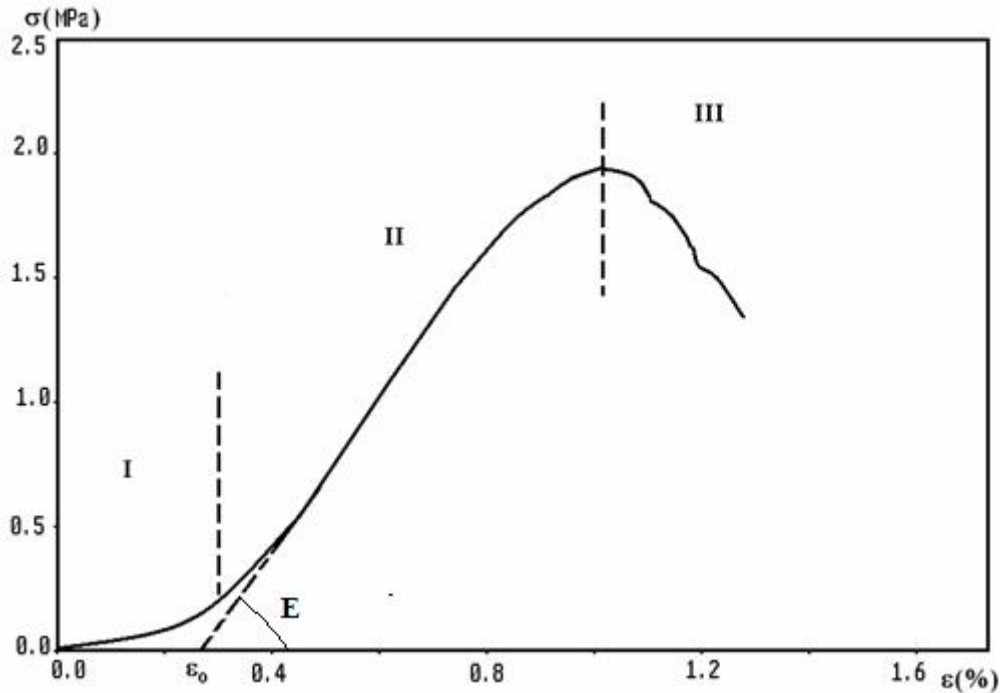


Figure III-8: Courbe de comportement des éprouvettes

- **Partie I:** dite phase d'induction, elle est plus ou moins restreinte, et comprend les déformations correspondant au réarrangement des grains dans le matériau et aux effets de surface (aspérités, etc.) qui ne nécessitent que de faibles contraintes, ainsi que les déformations du néoprène qui se déforme pour de faibles contraintes.
- **Partie II:** Elle représente le domaine élastique réversible du comportement du matériau. Cette section est restreinte avec une perte de linéarité correspondant à l'apparition de micro-fissures qui s'accroissent avec le chargement sans rupture.
- **Partie III:** Elle caractérise l'endommagement du matériau dû à l'augmentation des charges engendrant la rupture.

III.3.3. Essais comparés des éprouvettes stabilisées (0%, 4%, 7% et 10%)

La terre étudiée est associée aux dosages de 0%, 4%, 7% et 10% en ciment avec un effort de compactage de 2MPa. Les caractéristiques relevées à partir de l'expérimentation sont la résistance en compression R_c et le module d'élasticité E (pente de la partie linéaire de la courbe de comportement).

III.3.3.1. Terre brute

Pour la terre brute, les hauteurs des éprouvettes de diamètre $\varnothing = 80 \text{ mm}$ sont respectivement : $h = 11,45$; $11,93$ et $12,19 \text{ cm}$, avec une densité sèche moyenne $\rho = 1,82 \text{ g/cm}^3$. Sur les quatre essais, trois ont été valides.

Le tableau III.7 reporte les résultats de la résistance en compression R_c et du module d'élasticité E .

Tableau III-7: Résultats expérimentaux des blocs de la terre F brute

<i>Référence</i>	<i>E(MPa)</i>	<i>R_C (MPa)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	548,0	2,04
<i>Eprouvette 2</i>	643,4	2,04
<i>Eprouvette 3</i>	671,9	1,99
<i>Moyenne</i>	621,1	2,02
<i>Ecart type</i>	0,078	0,009

III.3.3.2. 4% en ciment

Les hauteurs des éprouvettes associées au dosage de 4% sont respectivement $h = 11,37$; $12,58$; $12,43$ et $12,37$ cm, avec une densité sèche moyenne de $1,76 \text{ g/cm}^3$. Les essais sont tous valides.

La résistance en compression et le module d'Young obtenus expérimentalement sont reportés dans le tableau III.8.

Tableau III-8: Résultats expérimentaux des blocs de la terre F

<i>Référence</i>	<i>E(MPa)</i>	<i>R_C (MPa)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	1054,00	3,11
<i>Eprouvette 2</i>	723,26	2,06
<i>Eprouvette 3</i>	901,01	2,49
<i>Eprouvette 4</i>	771,49	2,16
<i>Moyenne</i>	862,49	2,46
<i>Ecart type</i>	0,133	0,141

III.3.3.3. 7% en ciment

Les hauteurs des éprouvettes cylindriques testées associées au dosage de 7% en ciment sont respectivement $h = 12,3$; $12,1$; $12,23$ et $12,2$ cm, avec une densité sèche moyenne de $1,809 \text{ g/cm}^3$. Les quatre essais sont tous valides.

Nous reportons dans le tableau III.9, les deux paramètres R_c et E issus de l'expérimentation.

Tableau III-9: Résultats expérimentaux des blocs de la terre F

<i>Référence</i>	E(MPa)	Rc(MPa)
<i>Eprouvette 1</i>	1303,1	4,00
<i>Eprouvette 2</i>	1177	3,52
<i>Eprouvette 3</i>	1162	3,58
<i>Eprouvette 4</i>	1137	3,39
<i>Moyenne</i>	1194,8	3,62
<i>Ecart type</i>	0,045	0,052

III.3.3.4. 10% en ciment

Les éprouvettes de dosage de 10% en poids de ciment ont les hauteurs respectives $h = 12,13 ; 12,148 ; 12,08 ; 12,39$ et $12,60$ cm, avec une densité sèche moyenne de $1,815 \text{ g/cm}^3$. Sur les cinq essais, trois ont été valides.

Dans le tableau III.10, nous donnons les valeurs des grandeurs R_c et E obtenues expérimentalement.

Tableau III-10: Résultats expérimentaux de blocs de la terre F associés à 10%

<i>Référence</i>	E(MPa)	Rc (MPa)
<i>Eprouvette 1</i>	1517,2	5,14
<i>Eprouvette 2</i>	1479,2	4,92
<i>Eprouvette 3</i>	1373,4	3,68
<i>Moyenne</i>	1456,6	4,58
<i>Ecart type</i>	0,038	0,131

III.3.4. Interprétation des résultats

Le tableau III.11 regroupe les résultats expérimentaux moyens de la résistance à la compression R_c et du module d'élasticité E , associés aux dosages de 0%, 4%, 7% et 10% de ciment.

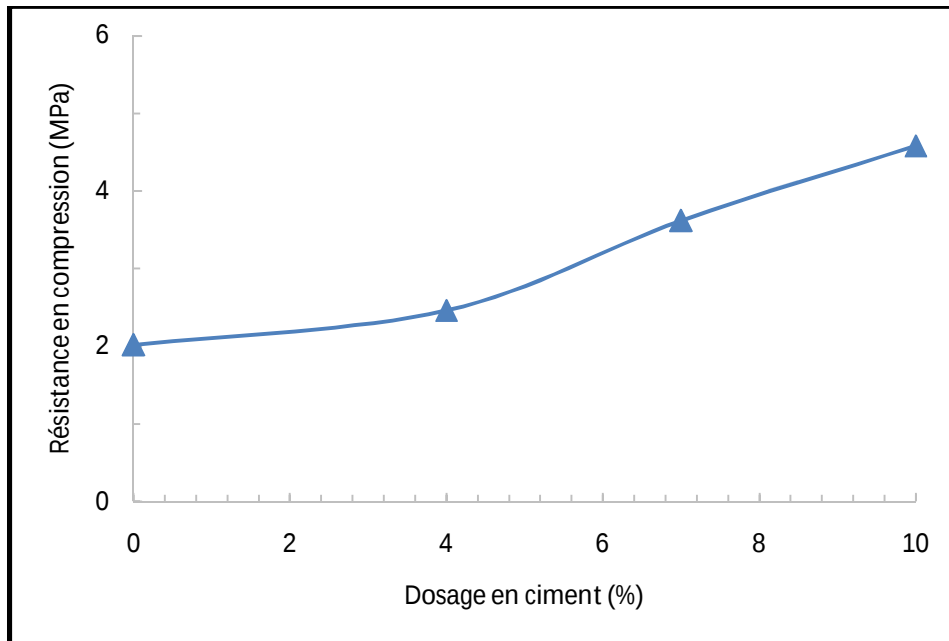
Tableau III-11: Résultats expérimentaux moyens associés aux différents dosages en ciment

Résultats expérimentaux moyens		
<i>Dosage en ciment</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>R_c (MPa)</i>
0%	621,10	2,02
4%	862,49	2,46
7%	1194,78	3,62
10%	1456,60	4,58

D'après les résultats expérimentaux, la valeur du module du d'élasticité E varie de 621,1 MPa à 1456,6 MPa et celle de la résistance à la compression de 2,02 MPa à 4,58 MPa en augmentant de 0% à 10% le poids en ciment.

Les résultats des analyses minéralogiques et chimiques ont montré que la terre F contient un taux de calcite et de quartz élevé. Or, d'après les résultats obtenus notamment par Dekayir et al. [72], les grains de quartz sont cimentés par la calcite quand elle est assez présente, alors que la matrice de ciment hydratée de la terre réagit de deux façons [6,21,26] : une réaction forte avec le squelette sableux graveleux et une réaction très faible avec l'argile. Pour la terre F, l'argile est ainsi stabilisée par la carbonation de la chaux (calcite) et l'ajout de ciment intervient pour la stabilisation des sables favorisée par la forte présence de quartz.

Le module d'élasticité E et la résistance à la compression R_c augmentent substantiellement en fonction du taux de ciment même à petits dosages (figures III.9 et III.10).

**Figure III-9: Résistance en compression de la terre F en fonction du dosage en ciment**

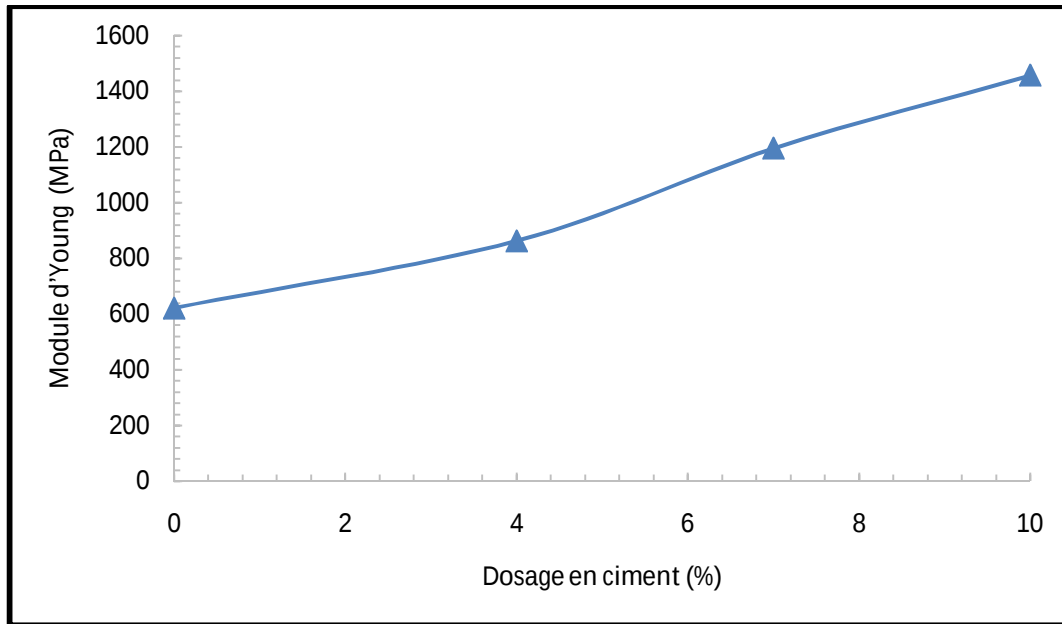


Figure III-10: Module d'Young de la terre F en fonction du dosage en ciment

III.4. Comparaison avec les terres de Nadialpou (B) et de Tizi-Ouzou (A)

III.4.1. Granulométries et limites d'Atterberg

Nous allons comparer la terre **F** avec les résultats expérimentaux des analyses granulométriques, minéralogiques et des caractéristiques mécaniques de deux terres présentées dans les travaux de Millogo et al. [42] et Bahar R et al. [34]. Ces dernières sont prélevées sur deux sites différents :

- Nadialpou (Burkina Faso), terre référencée par **B** [42].
- Tizi-Ouzou (Algérie), terre référencée par **A** [34].

Les trois terres sont extraites conformément aux recommandations édictées par le laboratoire international CRATerre. Le tableau III.12 résume leurs fractions granulaires :

Tableau III-12: Fractions granulaires des trois terres F, B et A

<i>Fractions granulaires</i>				
Terre	Graviers	Sables	Limons	Argiles
F	28	52	12	8
B [42]	2	60	26	12
A [34]	7.7	30.3	62.0 (sables fins et limons)	Très faible

Le tableau III.12 montre que la terre **F** est sableuse-graveleuse alors que les terres **B** et **A** sont sableuses limoneuses.

L'analyse de la partie argileuse détermine les états de consistance, dits limites d'Atterberg, à savoir : les limites de plasticité W_p , les limites de liquidité W_L . La différence entre ces deux limites est égale à l'indice de plasticité I_p .

Le tableau III.13 reprend l'indice de plasticité et le coefficient d'activité Ca des trois terres **F**, **B** et **A**.

Tableau III-13: Limites de consistances des terres F, B et A

Terre	I_p	Ca
F	10,3	1,28
B	19	1,58
A	15	-

A partir du tableau I.1 et de la figure I.23, nous pouvons constater que la terre **F** est active, et que la terre **B** est très active.

III.4.2. Compositions chimiques et minéralogiques

III.4.2.1. Analyse par fluorescence X

Cet essai est réalisé sur les deux terres non stabilisées (terre crue), la terre **F** et la terre **B**.

Nous avons également conduit l'analyse par fluorescence X sur l'échantillon de ciment afin de disposer d'un état de référence pour les deux terres.

Le tableau III.14 montre que la minéralogie de l'argile de la terre **F** est formée principalement de la chaux vive CaO (31,8%) et du quartz SiO_2 (22,3%).

L'argile de la terre **B** est quant à elle constituée d'un taux du quartz de 80% et près de 12% d'Oxyde d'Aluminium(Al_2O_3), mais d'une très faible quantité de la chaux vive (0,003%).

Tableau III-14: Taux des éléments chimiques et composition minéralogique du ciment CPJ35 et des deux terres F et B

Composition (%)	Terre F	Terre B	Ciment CPJ 35
SiO_2	22,3	79.36	12.46
CaO	31,8	0.03	57.02
Al_2O_3	5,96	11.85	3.39
Fe_2O_3	1,72	1.81	1.89
MgO	2,13	tr	1.35
SO_3	1,29	tr	1.95
K_2O	0,536	0.33	0.62
TiO_2	0,226	1.27	0.18

MnO	0,0503	tr	0.03
P₂O₅	0,753	-	0.11
Na₂O	0,323	tr	0.03
SrO	0,0125	-	0.015
PAF (perte au feu à 975°C)	32,9	6.27	20.90
C₃S	-	-	50.04
C₂S	-	-	1,97
C₃A	-	--	5,79
C₄AF	--	-	5,75
Phliquide	-	-	15,77
Cao libre	-	-	0.56

tr: trace

Le composé de base des ciments Portland CPJ35 est un mélange de silicates et d'aluminates de calcium résultant de la combinaison de la chaux (CaO) avec la silice (SiO₂), l'alumine (Al₂O₃) et l'oxyde de fer (Fe₂O₃).

III.4.2.2. Diffraction des Rayons X

L'analyse par la diffraction des rayons X de la terre **F** (Figure III.11) dosée à 0% et 4% de ciment montre qu'elle est formée principalement de calcite (CaCO₃), de quartz (SiO₂), de dolomie (CaMg(CO₃)₂) et de silicate d'aluminium.

A partir Bahar et al.[34], l'analyse par la diffraction des rayons X des échantillons de la terre **B** dosée aussi à 0% et à 4% de ciment (figure III. 13) montre la présence de la kaolinite, du quartz, de goethite, de feldspath et de la calcite. De plus la terre **A** est riche en Carbonate CaCO₃ (34.0%), et oxyde de fer-alumine (15.8%).

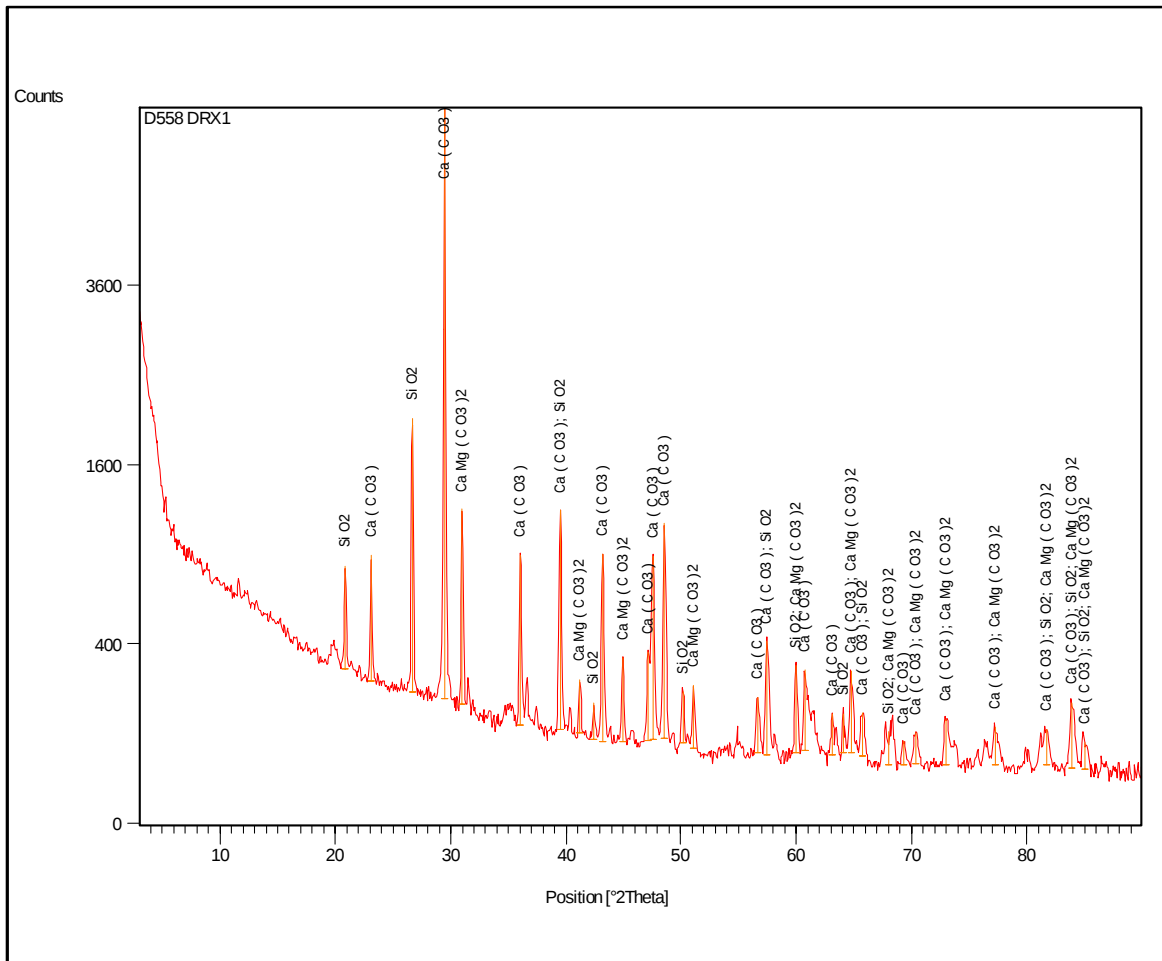


Figure III-11: Spectres de diffractions des rayons X de la terre F brute (%)

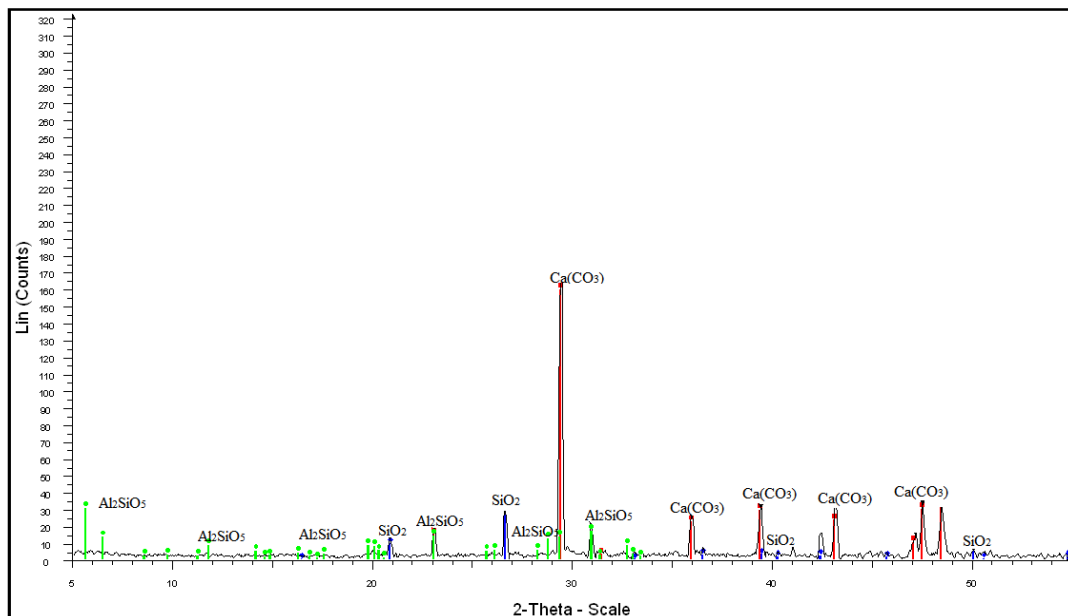


Figure III-12: Spectres de diffractions des rayons X de la terre F stabilisé à 4% de ciment de bloc
(b)

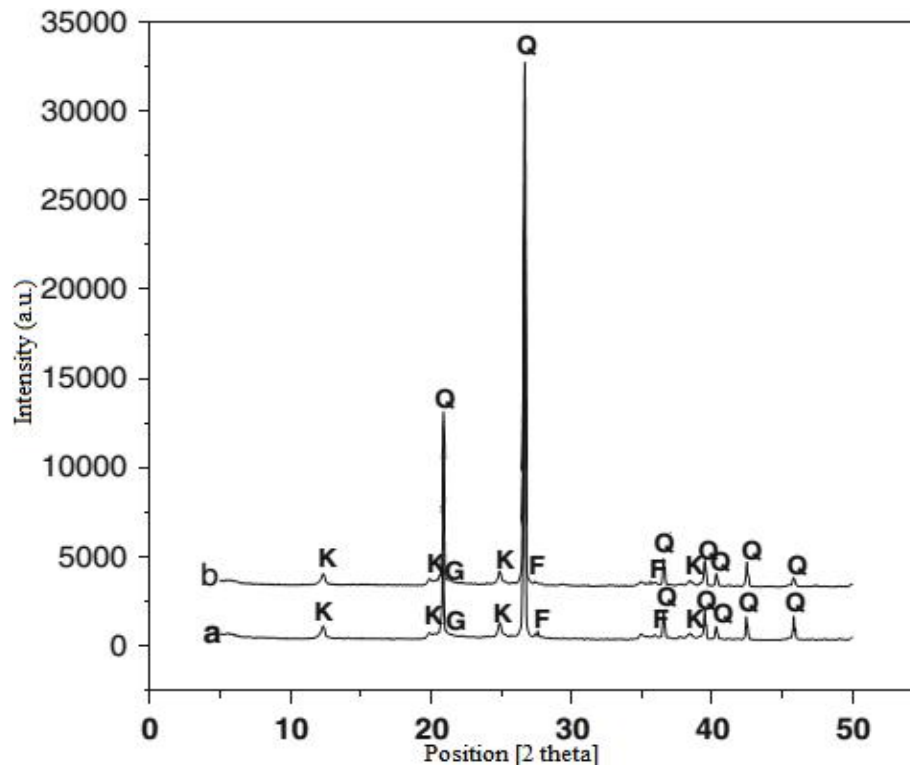


Figure III-13: Spectres de diffractions des rayons X de l'échantillon non stabilisée (a) et d'échantillon stabilisé à 4% du ciment d'adobe (b) de la terre B [43]

K :Kaolinite, Q : Quartz, G : Goethite, F: Feldspath, C: calcite.

III.4.2.3. Observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB)

D'après les images obtenues par le MEB (Figure III.14), on remarque que la calcite et le quartz sont dominants dans la terre F.

Pour la terre B [42] (Figure III.15), les images montre que le quartz est dominant.

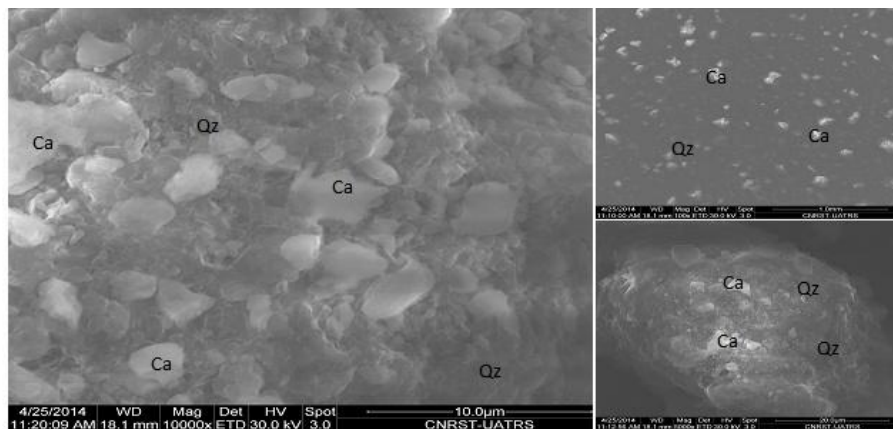


Figure III-14: Images MEB prises sur la terre F (Qz: quartz, Ca: calcite)

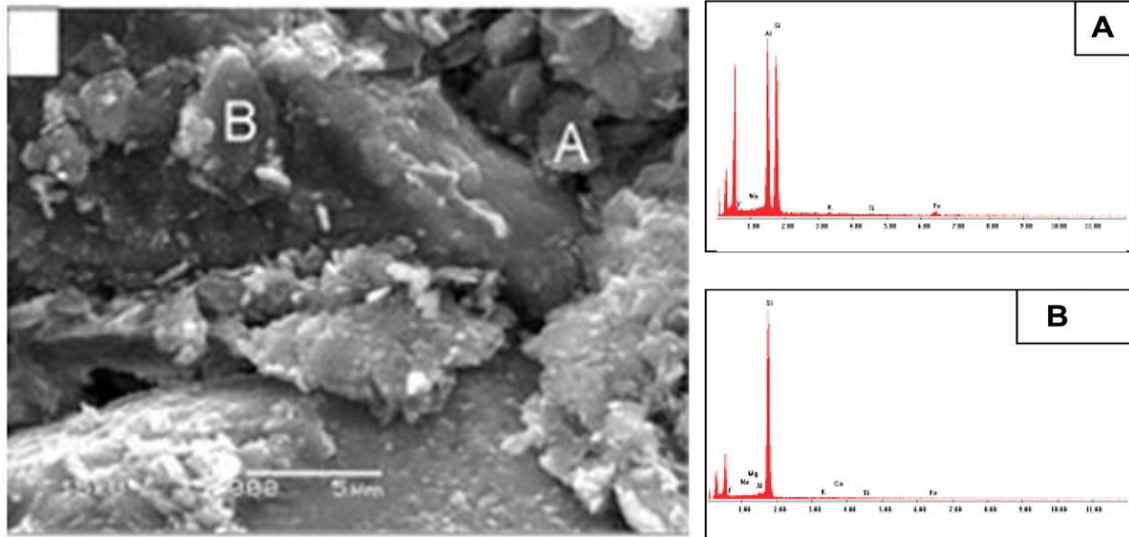


Figure III-15: Images de MEB et l'EDS de la Terre B

III.5. Effets combinés de la minéralogie et de la granulométrie

III.5.1. Effets sur les caractéristiques mécaniques

Les essais de compression des terres **F** et **A** sont réalisés sur des éprouvettes cylindriques. Ces éprouvettes sont confectionnées par un compactage statique avec un effort de compactage de 2 MPa, associés aux différents dosages en ciment. Ces éprouvettes ont subi une cure de 28 jours: soit 14 jours sous plastique et 14 jours à l'air libre.

La terre **B** à été séchée à 105°C pendant 24 h et ensuite broyée pour obtenir des particules de moins de 0,315 mm. Le ciment à été ajouté après avec des dosages de 0%, 4% et 8%.

Les pâtes obtenues ont été homogénéisées dans un mélangeur pendant 15 min, pressé manuellement dans des moules parallélépipédiques de dimensions (4×4×16) cm³ et maintenues à une moyenne de température 25°C pendant 24 h. Les adobes ont été stockés à air libre pendant 28 jours dans une chambre avec une température constante de 20 °C.

Les résultats expérimentaux de la variation de la résistance à la compression R_c des trois terres **F**, **B** et **A** associés aux différents pourcentages de ciment sont résumés dans la Figure III.16.

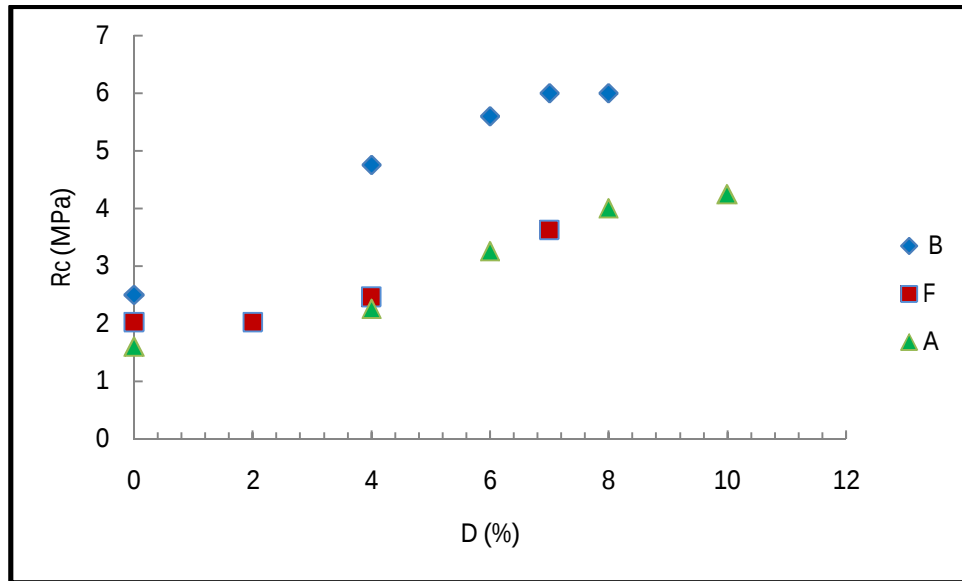
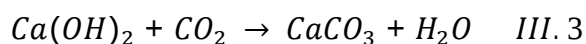
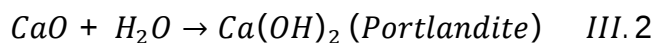


Figure III-16: Résultats expérimentaux de la résistance à la compression R_c en fonction du ciment pour les terres B, F, et A [82]

La figure III.16 montre que la résistance à la compression des trois terres augmente en fonction du taux de dosage en ciment. Toutes les études récentes [39, 34, 37, 81,83–86] ont montré que les caractéristiques mécaniques augmentent en fonction du ciment, sans pour autant donner la fonction de cette augmentation et justifier les différents taux de variation selon le dosage. D'autant que cette augmentation diffère d'un matériau à l'autre en fonction de la granulométrie et de la composition minéralogique, ce qui impacte l'investissement économique en ciment.

Les résultats minéralogiques de la terre **F** montrent que l'argile de celle-ci est formée principalement de la chaux vive CaO (31,8%) et du quartz SiO_2 (22,3%), ce qui favorise la stabilisation de la partie argileuse par la réaction de la chaux vive et l'eau. Mais cette quantité est insuffisante pour créer un effet de stabilisation sur les autres fractions granulométriques sableuse et graveleuse. En effet, les travaux de Nagaraj et al [38], et de Bell [87] montrent qu'il faut dépasser une quantité dite seuil [1% - 3% de la chaux] pour assurer la fixation des particules inertes de l'argile.

Bien que le quartz ne soit pas un liant, il est constitué d'une partie de la fraction de sable fin [39,43, 69, 72], et de ce fait il est cimenté par la carbonation de la chaux selon les réactions suivantes :



L'ajout d'un faible dosage en ciment (4%) n'est pas suffisant pour stabiliser la fraction sableuse-graveleuse (80% du poids) de la terre **F**, ce qui nous donne une faible variation de la résistance en compression pour les faibles dosages. Pour des doses plus élevées en ciment, la valeur de la résistance à la compression croît et atteint à 2.46 MPa. Ainsi, les grains de la terre **F** sont bien liés par le ciment.

Dans le cas de la minéralogie de la terre **F**, la matrice de ciment hydraté réagit de deux façons : une réaction forte avec le squelette sableux-graveleux, et une réaction très faible avec l'argile qui est déjà stabilisée par ses constituants chimiques, ce qui améliore la résistance à la compression des blocs de terre comprimée, pourvu que la fraction sableuse-graveleuse ne soit pas très dominante.

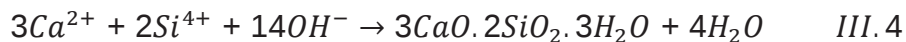
Les résultats minéralogiques montrent que de la terre **A** est riche en Carbonate CaCO_3 (34.0%), et oxyde de fer-alumine (15.8%), ce qui favorise la stabilisation de la partie argileuse par la réaction de la chaux vive et l'eau.

De plus, cette quantité de la chaux est suffisante pour créer un effet sur la fraction granulométrique sableuse et graveleuse, puisqu'elle a dépassé le seuil de 3%.

Toutefois, et compte tenu de la très faible fraction d'argile (voir tableau III.13), l'ajout d'un faible dosage en ciment est suffisant pour stabiliser la fraction sableuse graveleuse. Une bonne partie de la fraction sableuse est déjà stabilisée par la chaux de la terre **A**, ce qui nous donne une résistance à la compression appréciable.

L'argile de la terre **B** contient un taux de près de 80% (SiO_2) du quartz et près de 12% de Al_2O_3 , avec une très faible quantité de la chaux vive. Shah et al [103] ont conclu que le pourcentage de SiO_2 , accélère les réactions d'hydratation du ciment, même avec un très faible pourcentage. Ainsi, avec plus de 79% de SiO_2 et une fraction argileuse suffisante (12%), la terre **B** se stabilise rapidement avec même un faible dosage en ciment. Résultat, une plus grande résistance du matériau.

De plus, Xing et al. [88] montrent que les fortes présences de Al_2O_3 et SiO_2 réagissent avec le Ca^{2+} . Cette réaction produit les hydrates du calcium-silicate (C-S-H) et les hydrates du calcium-aluminate (C-A-H), suivant les réactions ci-dessous:



Généralement, les C-S-H et C-A-H sont considérés comme les principales sources d'augmentation de la résistance dans le sol-ciment. D'où : la terre sableuse **B** est cimentée par l'hydratation du ciment avec l'eau pour enrober le squelette sableux, favorisée par la forte présence du quartz. Ce qui nous donne une augmentation significative de la résistance à la compression de la terre **B** même à faible dosage en ciment. Ensuite, à des dosages supérieurs, la résistance à la compression sera relativement stable pour la terre **B** (Figure III.16), car tous les liens sont déjà créés.

III.5.2. Effets sur l'Optimum Technico-Economique (OTE)

D'après Bouabid [51], la détermination de l'OTE s'appuie sur deux analyses, l'une technique et l'autre économique. L'analyse technique porte sur l'appréciation du gain technique procuré aux caractéristiques techniques du bloc et du mortier à l'optimum. L'analyse économique permet de faire une estimation du coût de l'investissement rapporté au gain technique. Ainsi, l'OTE est le point de la stabilisation qui permet un meilleur gain technique au moindre coût économique [51].

La détermination de l'OTE est faite en utilisant l'évolution des propriétés mécaniques en fonction de la stabilisation. Elle est conduite selon les trois séquences suivantes :

- 1- Localiser la zone où ce point de l'optimum technico-économique peut être situé (Figure III.17) ;
- 2- Donner à l'OTE une particularité physique ;
- 3- Déterminer la particularité mathématique correspondante.

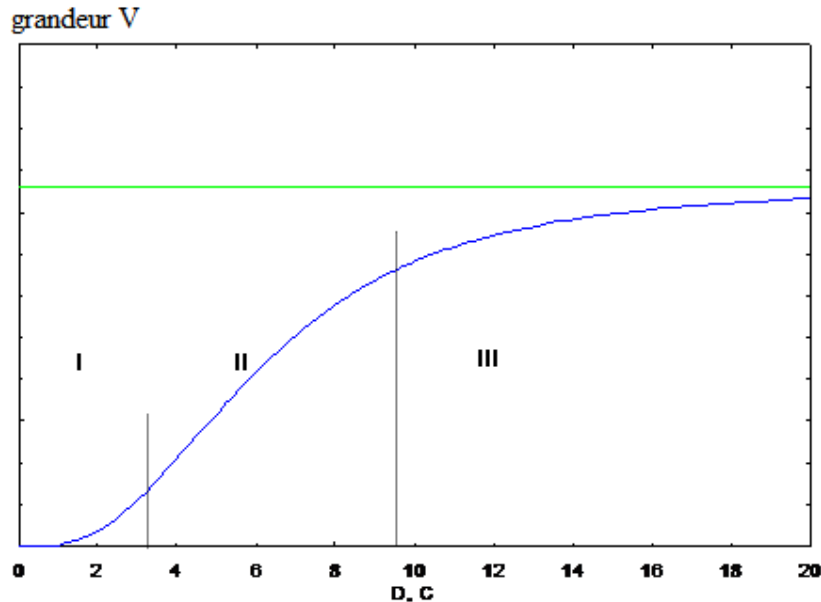


Figure III-17: Evolution de la grandeur V en fonction de D ou de C

La particularité physique de l'optimum technico-économique (OTE) sera rapportée au gain de la grandeur V. Il donne le rapport entre la variation de V en fonction de la variation du taux de la stabilisation. L'interprétation est ainsi faite à travers le gradient de V par rapport aux variables de dosage 'D' et de compactage 'C'. Ce gradient est donné par :

$$\nabla V = (\partial V / \partial D, \partial V / \partial C) \quad (\text{III-1})$$

avec :

$$V(D, C) = \frac{a_D D^n}{D^n + b_D} + \frac{a_C C^m}{C^m + b_C}$$

avec :

- a_D : limite de saturation en cimentation ;
- n : degré de variation ;
- b_D : constante introduite pour approcher la limite (asymptote) par valeur inférieure ;
- a_C : limite de saturation en compactage ;
- m : degré de variation ;
- b_C : constante introduite pour approcher la limite (asymptote) par valeur inférieure.

$$dV = \nabla V \cdot (dD, dC)^T \quad (\text{III-2})$$

La figure III.18 montre l'évolution du gradient de V.

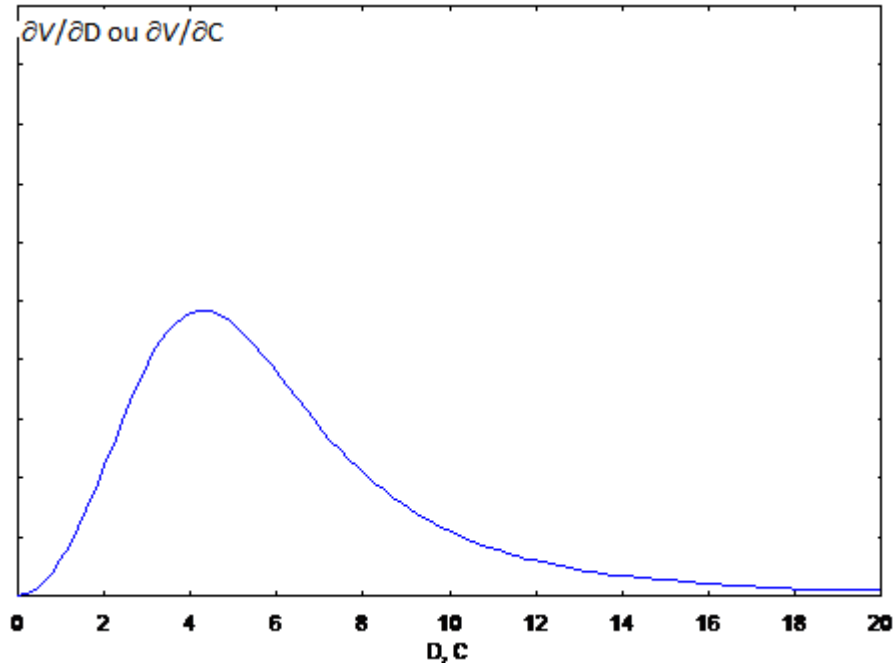


Figure III-18: Evolution du gradient de V en fonction de D ou de C

La particularité mathématique du gradient est l'extrema. C'est le point qui correspond au plus grand gain, soit le maximum du gradient de V. Ce point n'est autre que le point d'inflexion de la fonction V(D,C) (Figure III.18). Nous avons alors l'équation :

$$\nabla^2 V = 0 \quad (\text{III-3})$$

avec :

$$\nabla^2 V = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 V}{\partial D^2} & \frac{\partial^2 V}{\partial D \partial C} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial C \partial D} & \frac{\partial^2 V}{\partial C^2} \end{pmatrix} \quad (\text{III-4})$$

A partir de l'équation III-3 on détermine l'optimum calculé numériquement. Dans le cas des variables D et C séparées (couplage nul), nous aurons :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial D \partial C} = \frac{\partial^2 V}{\partial C \partial D} = 0 \quad (\text{III-5})$$

Compte tenu des équations III-4 et III-5, le point d'inflexion correspondant à l'équation III-3 satisfait au couplet :

$$\frac{\partial^2 V}{\partial D^2} = 0, \quad \frac{\partial^2 V}{\partial C^2} = 0 \quad (\text{III-6})$$

D'après ce calcul, on obtient le dosage et le compactage correspondant à l'optimum technico-économique [51] :

$$D_{OTE} = \sqrt[n]{\frac{b_D(n-1)}{(n+1)}} \quad , \quad C_{OTE} = \sqrt[m]{\frac{b_C(m-1)}{(m+1)}} \quad (\text{III-7}).$$

A partir des résultats des essais expérimentaux, nous avons déterminé les valeurs des paramètres a_D et b_D de l'équation (2) pour la terre **F**, la terre **B** et la terre **A**.

Ces paramètres sont donnés dans le tableau III.15:

Tableau III-15: Paramètres des équations d'évolution de R_c

Terre	a_D	b_D
F	4.05	524.82
B	3.82	47.21
A	3.59	254.12

Pour l'application du modèle, nous avons utilisé les dosages suivants (0%, 4%, 7%).

Le modèle numérique de l'évolution de la résistance à la compression (R_c Num) nécessite trois valeurs pour obtenir tous les paramètres, dont la valeur 0% (terre brute).

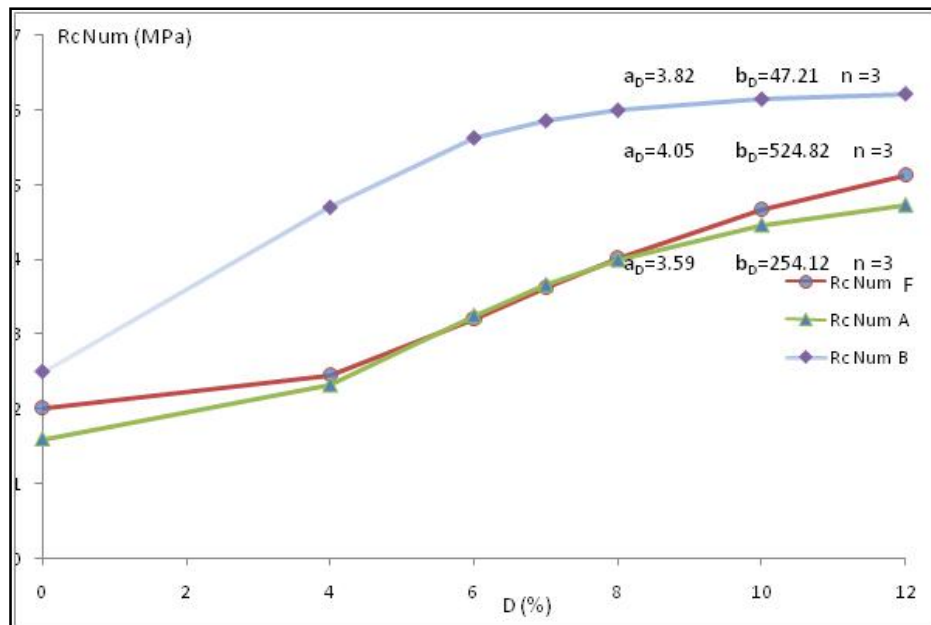


Figure III-19: Modèle Numérique de l'évolution de la résistance à la compression R_c en fonction de ciment

Les valeurs du dosage optimal, obtenues pour la variable de la résistance à la compression R_c sont présentées dans le tableau III.16.

Tableau III-16: Valeurs d'optimum de ciment des trois terres F, B et A

Terres	D_{OTE} (%)
B	2.9
A	5.0
F	6.4

D'après ce tableau, on remarque que l'optimum technico-économique du ciment est égale à 2,9% pour la terre **B**, à 6,4% pour la terre **F** et à 5,0% pour la terre **A**.

Pour toutes les analyses et constats décrits dans III-16.1 nous pouvons nous attendre à avoir un OTE plus élevé pour **F** et moins élevé pour **B**.

L'optimum de la terre **F** graveleuse sableuse et une présence de calcite est le double de celui de la terre sableuse-limoneuse **B** avec une présence de quartz et fraction argileuse équilibrée et dominée par Al_2O_3 . Cette dernière présente une plus grande résistance que la terre **F**.

Ces résultats confirment les résultats expérimentaux obtenus par Kariyawasam et al [46] qui ont conclu que la terre contenant un pourcentage élevé de graviers a besoin de plus de ciment que la terre sableuse. D'où l'augmentation de l'optimum technico-économique du ciment de la terre **F** par rapport à **B** qui revient à la fois à la texture granulaire du squelette sableux-graveleux et à la nature minéralogique de l'argile.

III.6. CONCLUSION

A la lumière des résultats des analyses chimique-minéralogiques et des essais expérimentaux présentés dans ce chapitre, nous pouvons conclure que :

- La résistance à la compression augmente en fonction du taux de ciment. Cette augmentation est due à la fois à la texture granulaire et aux compositions minéralogiques de chaque type de terre. L'ajout du ciment amplifie les liens entre le squelette sableux-graveleux après l'interaction avec la matrice de l'argile, une fois qu'elle est déjà stabilisée ou neutralisée par ces constituants minéralogiques et chimiques.
- La résistance à la compression des blocs de terre comprimée et d'adobes augment fortement en fonction du ciment quand l'argile est dominée par la calcite et que la structure granulaire n'est pas dominée par les sables et les graviers. Cet accroissement en fonction du faible dosage en ciment résulte de la cimentation de l'argile par la calcite et de l'interaction de la chaux avec les constituants chimiques tels que le quartz, avant l'interaction avec le squelette limoneux, sableux et puis graveleux.

IV. Durabilité du mortier

IV.1. INTRODUCTION

D'après la norme ARS 672 [89], le mortier de terre est constitué principalement de terre crue et d'eau et doit sa cohésion à l'état humide ou à l'état sec essentiellement à la fraction argileuse composant la terre. Un additif et/ou un dégraissant peuvent être ajoutés néanmoins à la terre pour améliorer ou développer des caractéristiques particulières du mortier. Ces derniers sont mis en œuvre, en maçonnerie en blocs de terre comprimée, pour assurer la cohésion entre les blocs, comme ils peuvent être utilisés comme éléments de redressement et de finition dans la maçonnerie destinée à être recouverte.

Plusieurs analyses chimiques, minéralogiques et des essais expérimentaux seront réalisées sur les éprouvettes des mortiers de terre. Ces analyses permettront de connaître la nature et les pourcentages des éléments chimiques dans chaque terre et des éprouvettes du mortier aux différents dosages en ciment. Des essais de compression seront conduits sur des éprouvettes cylindriques de mortier de terre [92]. D'autres essais, portant essentiellement sur la réponse vis à vis de l'eau, seront aussi effectués sur les mortiers de terre. On cite l'essai de durabilité, de gonflement, etc.

Dans ce chapitre, en plus des analyses chimiques-minéralogiques du mortier de terre stabilisé au ciment, nous allons déterminer ses caractéristiques mécaniques pour deux cas sec et humide [33, 34]. Ces caractéristiques sont obtenues par des essais de compression simple. Avant l'essai mécanique [40, 42, 44], on commence par l'essai de la remontée capillaire [34, 91] sur une partie des éprouvettes cylindriques pour les deux terres extraites de deux sites différents : Fès référenciée par (F) et Rabat référenciée par (R).

IV.2. Les mortiers

Généralement dans les constructions en blocs de terre comprimée, le mortier est un élément déterminant dans la structure maçonnée. Il représente la matrice assurant la cohésion entre les renforts (bloc, brique, ...etc.) et permet la répartition des charges entre ces derniers pour une meilleure résistance. Il est aussi utilisé comme revêtement pour protéger la construction contre l'érosion, les agents extérieurs qui menacent sa durabilité, tels que, la pluie, la pollution, la remontée capillaire par les fondations, les animaux etc.

IV.2.1. Mortier de jointement

Des études menées par Shaan [90] ont montré qu'une maçonnerie est plus résistante sans mortier qu'avec un mauvais mortier. Par ailleurs, dans une structure en blocs de terre comprimée, la différence de rigidité et de déformabilité entre le bloc et le mortier est à l'origine des contraintes transversales (cisaillement) qui se développent dans le mortier de jointement.

Ces contraintes qui s'ajoutent à celles initialement présentes à cause du retrait du mortier, mis en œuvre généralement avec une grande quantité d'eau, ont pour risque de dépasser la limite de déformabilité du mortier, induisant ainsi une rupture prématurée de la structure. Le comportement de la maçonnerie en blocs de terre comprimée est alors fortement influencé par celui du mortier. Par conséquent, une bonne connaissance du comportement

rhéologique du mortier dans les deux cas sec et humide, est d'autant plus importante que celui du bloc.

De plus, cette connaissance ne devrait pas se limiter à la seule détermination de la résistance en compression (phase de rupture), mais plutôt avec une interprétation sur les compositions minéralogiques et chimiques du mortier, ainsi que sur l'effet de ces éléments chimiques et minéralogiques sur le comportement rhéologique du mortier. L'interprétation rhéologique nécessite aussi la connaissance de la résistance à la compression, du module d'Young (ou d'élasticité) et de la déformation à la rupture (limite).

IV.2.2. Mortier de revêtement

Au cours des 40 dernières années, les mortiers sont devenus de plus en plus complexes. Ils associent liants hydrauliques, divers adjuvants et différents polymères. Pour des mortiers mis en œuvre sous forme de couches d'épaisseur de l'ordre du centimètre, leur durabilité est intimement liée aux propriétés des supports qu'ils recouvrent. Notre étude vise à caractériser la durabilité des mortiers en interaction avec le support sur lequel ils sont appliqués.

Vis-à-vis de la durabilité, on retient comme indicateurs l'adhérence au support et l'état de contraintes dans cette couche. Ces derniers dépendent de nombreux paramètres, en particulier la nature du support et les paramètres de composition du mortier. L'objectif est de réaliser une étude phénoménologique de l'influence de ces paramètres sur les deux indicateurs de durabilité ainsi que sur d'autres phénomènes tels que le retour à l'état normal d'une couche de mortier appliquée sur un support absorbant ou non.

IV.3. Analyses expérimentales de la durabilité des mortiers de terre de Fès

IV.3.1. Analyses minéralogiques et chimiques

Dans les paragraphes suivants, il s'agit d'analyser les éléments chimiques et de déterminer les proportions des éléments minéralogiques dans la terre **F** et les quatre éprouvettes de mortier de la même terre par différentes techniques d'analyses : la diffraction des rayons X, l'Infrarouge, le Microscope Electronique à Balayage et la Fluorescence X.

IV.3.1.1. Diffraction des Rayon X (DRX)

L'analyse par la diffraction des rayons X de la terre cure **F** (Figure. IV.1) montre qu'elle est formée principalement de calcite (CaCO_3), de quartz (SiO_2) et de dolomie ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$).

L'ajout du ciment à l'éprouvette du mortier entraîne l'augmentation du pourcentage de la calcite et la présence d'Aluminium de Silicate (silico-alumineux) avec une très faible quantité, sauf dans l'éprouvette de 7% (Figures. IV.2.3.4).

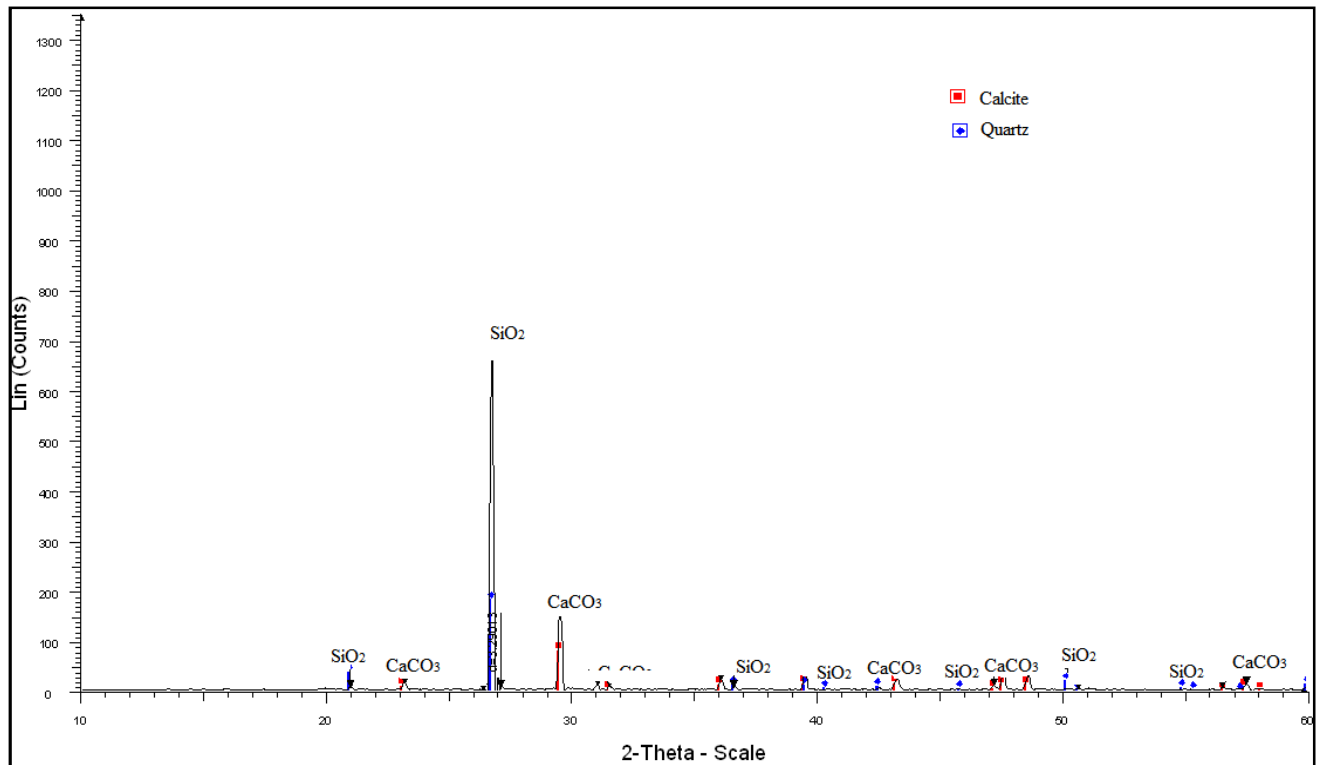


Figure IV-3: Spectres de diffractions des rayons X de la terre F à 7% du ciment

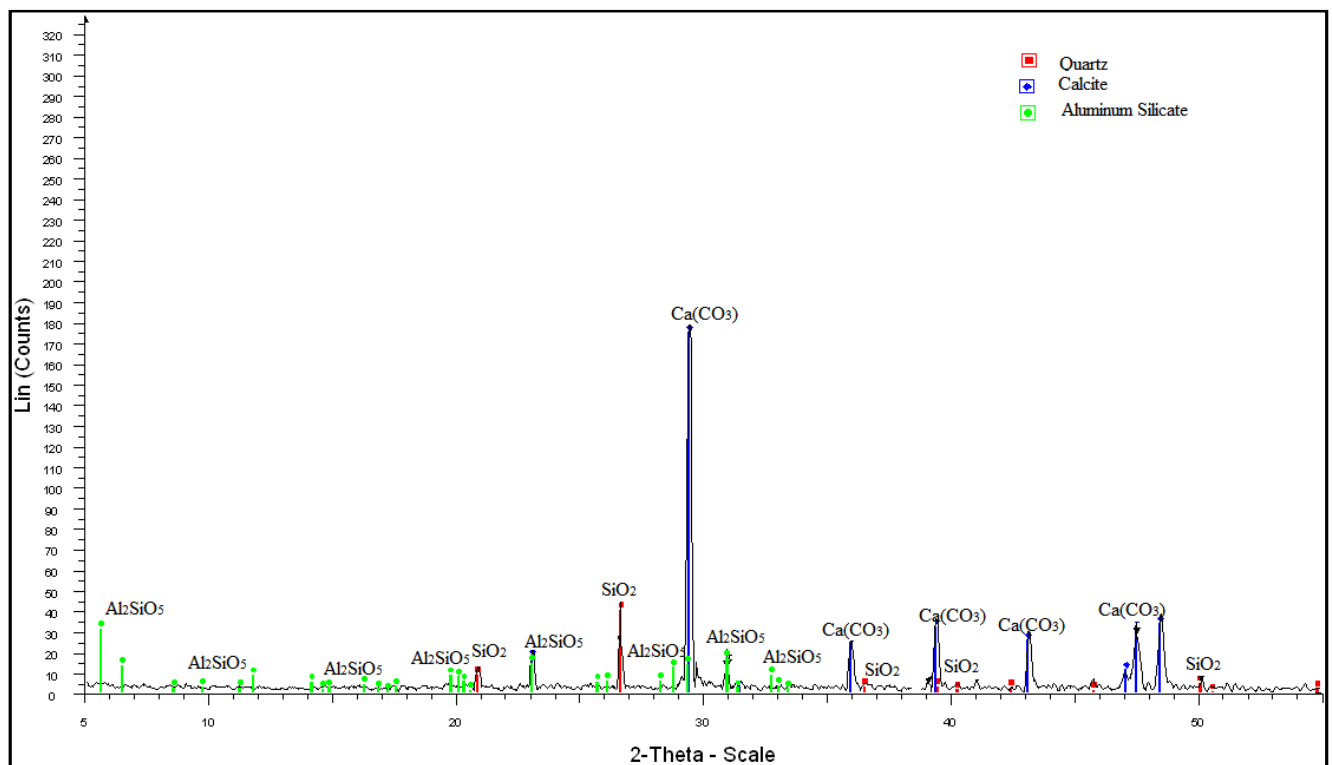


Figure IV-4: Spectres de diffractions des rayons X de la terre F à 10% du ciment

IV.3.1.2. Analyse d'Infrarouge

Les spectres d'Infrarouge de la terre crue **F** et ses éprouvettes des mortiers de différents dosages du ciment sont représentées dans les figures IV.5.6.7.8. Ces spectres sont fortement dominés par des bandes de vibration de la calcite (CaCO_3) (1798.1, 1431, 874, 712.6) cm^{-1} , de quartz aux (1033.5, 798) cm^{-1} et de l'eau à (3416.1 cm^{-1}).

La formation de ces carbonates est liée aux conditions bio-physico-chimique de la terre. Bien que la calcite est le produit de la carbonatation de la chaux, cette dernière une fois gâchée avec de l'eau et mélangée avec du sable, elle possède la propriété de faire prise rapidement en agglomérant des particules inertes, telles que le quartz [41, 42, 72,73].

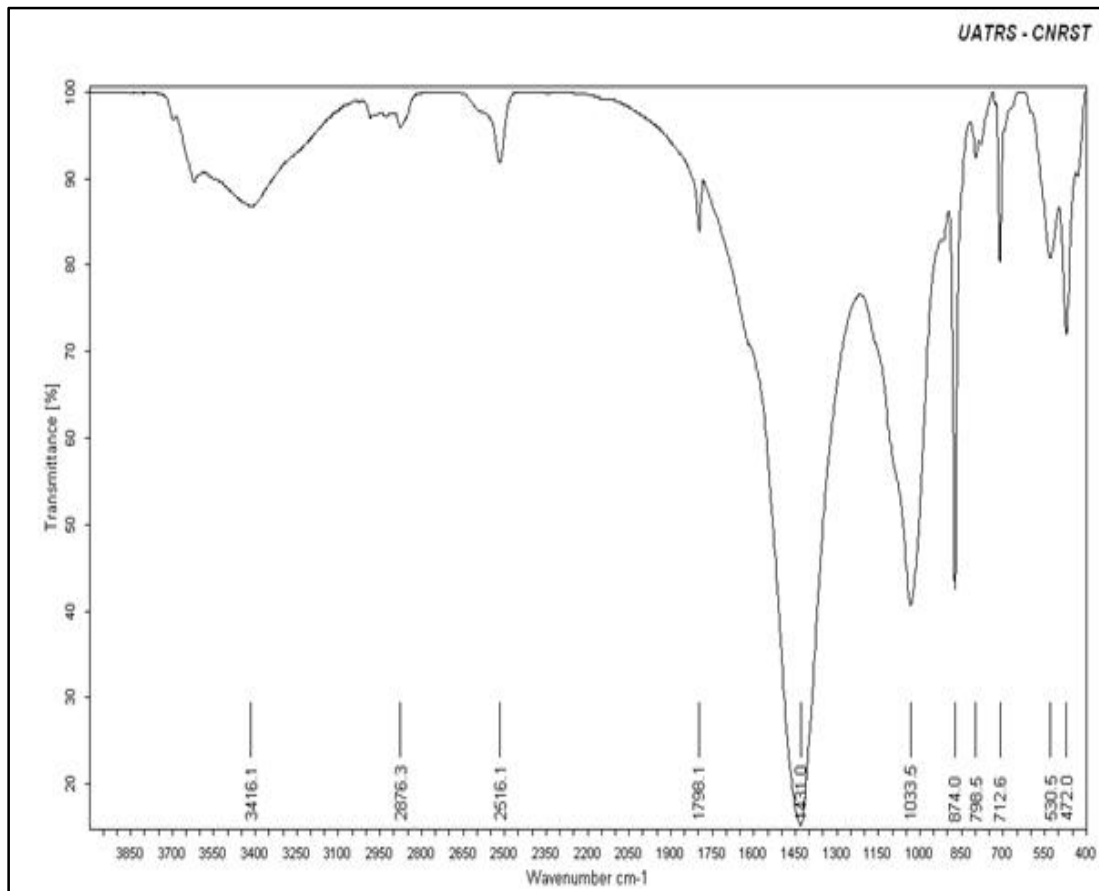


Figure IV-5: Spectres d'Infrarouge de la terre de F brute

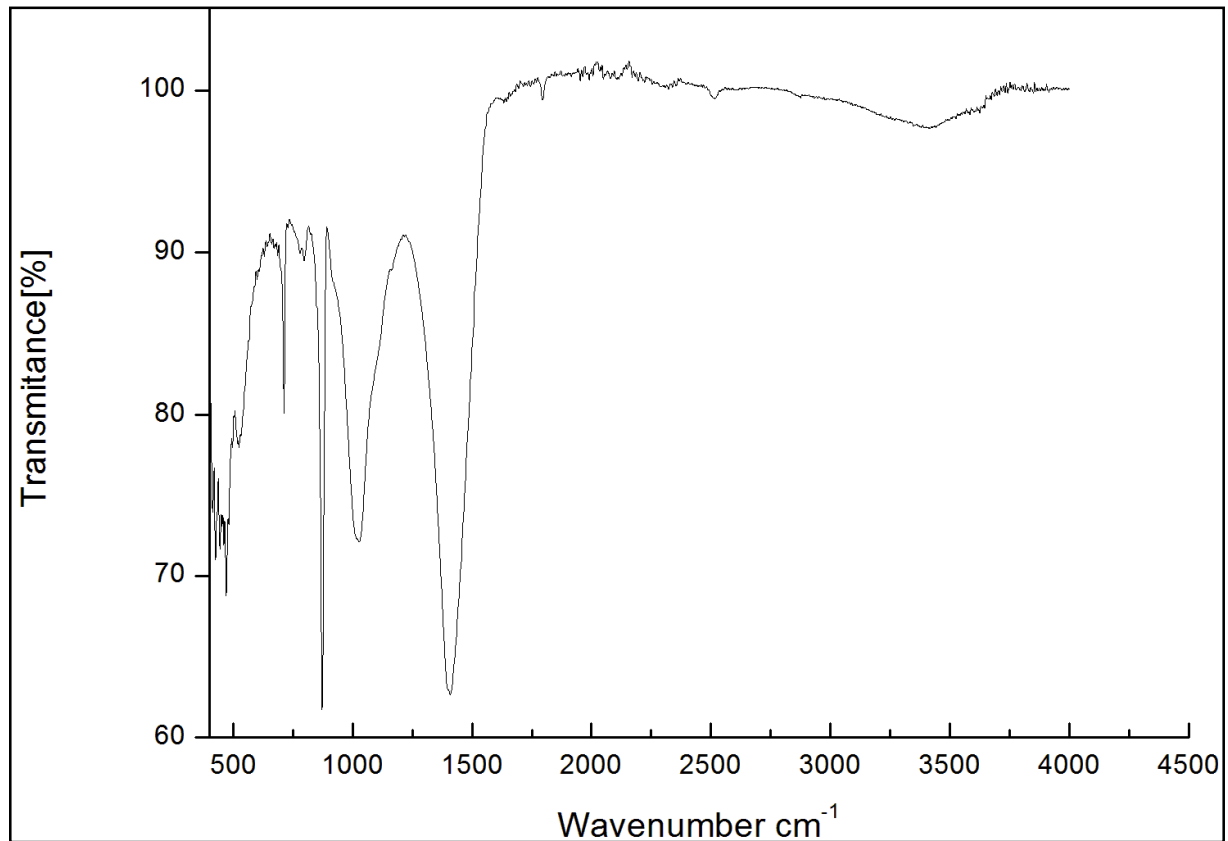


Figure IV-6: Spectres d'Infrarouge de la terre de F à 4% du ciment

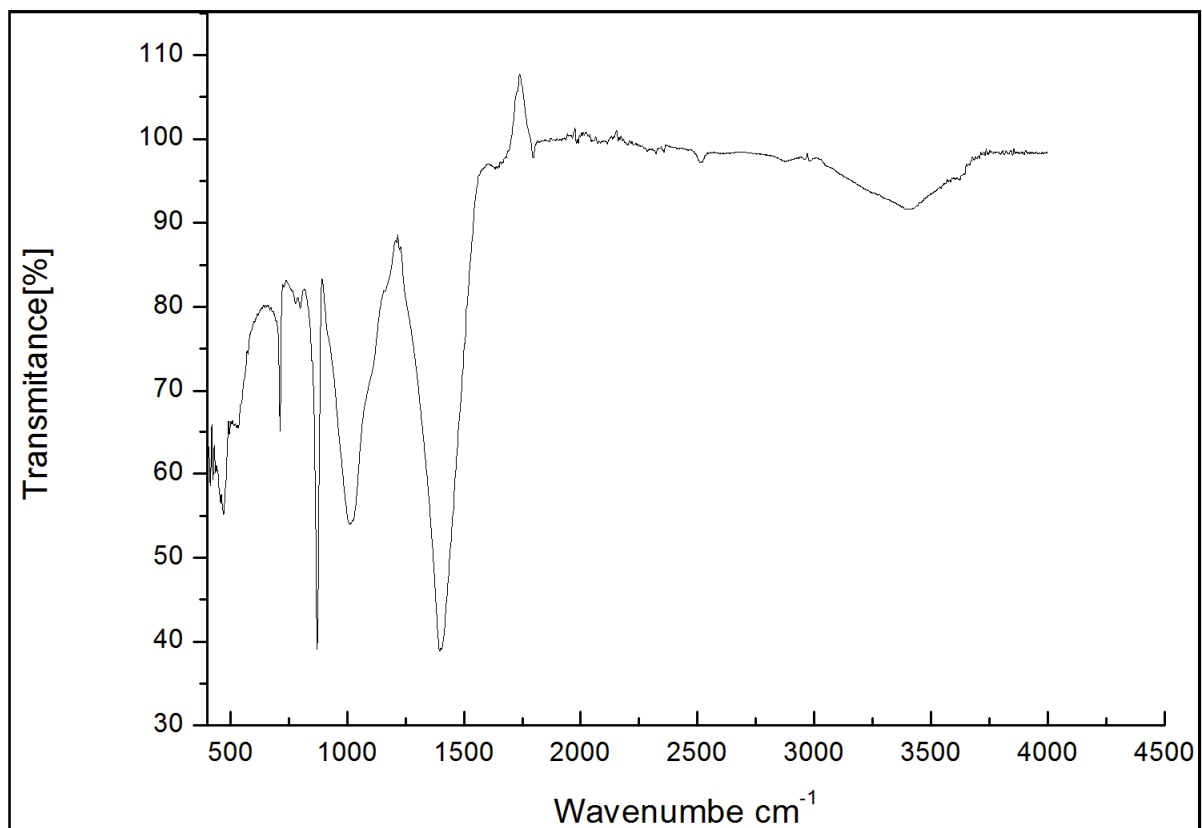


Figure IV-7: Spectres d'Infrarouge de la terre de F à 7% du ciment

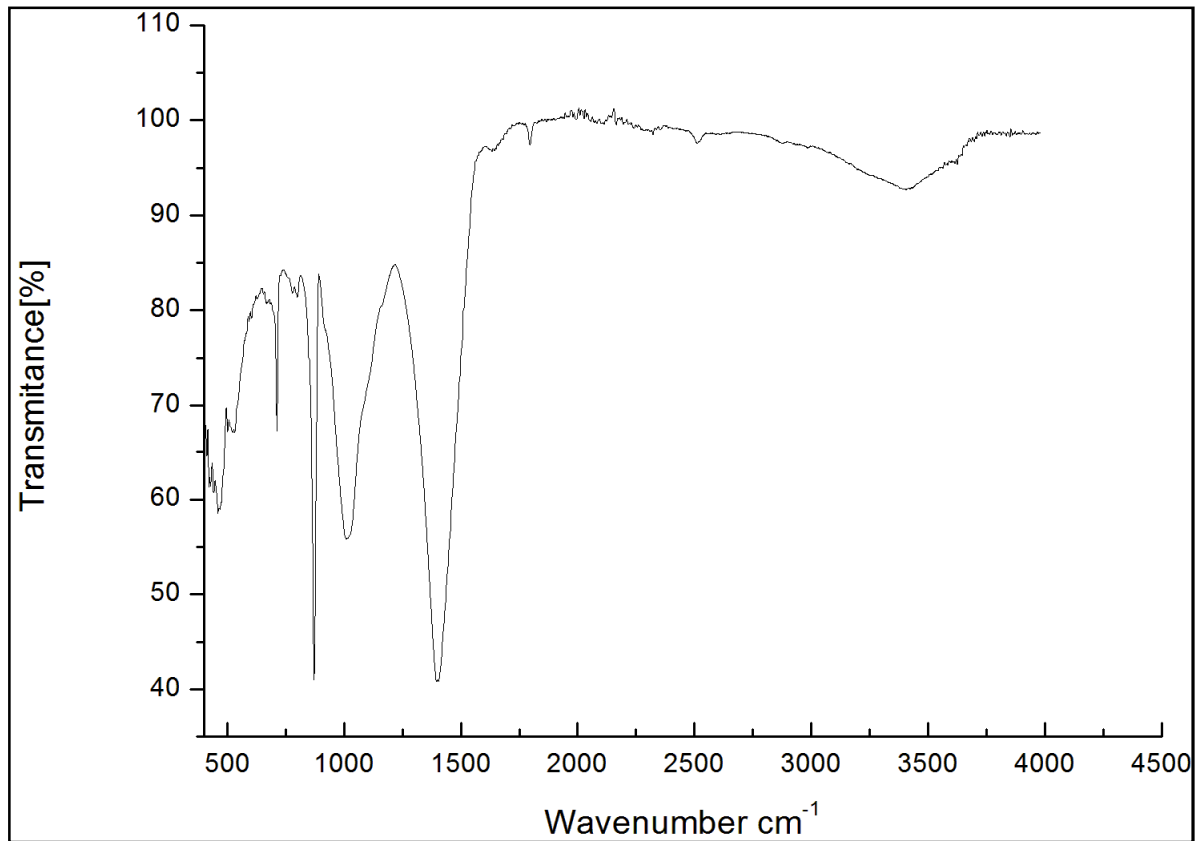


Figure IV-8: Spectres d'Infrarouge de la terre de F à 10% du ciment

IV.3.1.3. Observation au microscope électronique à Balayage (MEB)

D'après les images de la terre F obtenues par le MEB (Figure. IV.9), nous remarquons que la calcite est plus dominante que le quartz.

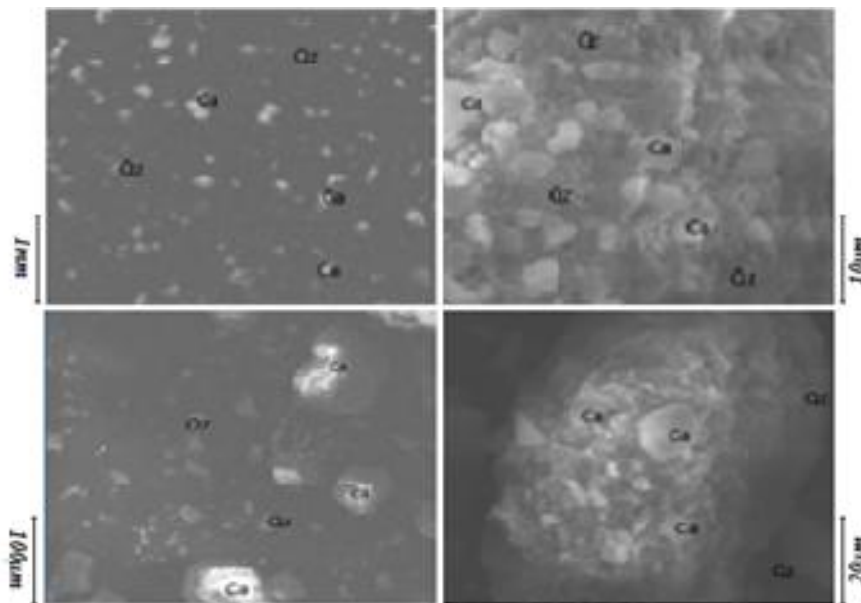


Figure IV-9: Images MEB prises sur la terre F (Qz: quartz, Ca: calcite)

IV.3.1.4. Analyse par la fluorescence X

L'analyse par la fluorescence X permet de mesurer le pourcentage des éléments chimiques que contient l'échantillon de la terre F et de ciment CPJ 35 utilisée dans la réalisation des éprouvettes de mortier.

Le tableau suivant résume le taux des éléments chimiques :

Tableau IV-1: Compositions chimiques de la terre de Fès et de ciment en (%)

Composition (%)	Terre F	Ciment CPJ 35
SiO ₂	22,3	12,46
CaO	31,8	57,02
Al ₂ O ₃	5,96	3,39
Fe ₂ O ₃	1,72	1,89
MgO	2,13	1,35
SO ₃	1,29	1,95
K ₂ O	0,536	0,62
TiO ₂	0,226	0,18
MnO	0,0503	0,03
P ₂ O ₅	0,753	0,11
Na ₂ O	0,323	-0,03
SrO	0,0125	0,015
PAF (perte au feu à 975°C)	32,9	20,90

Le tableau IV.1 montre un enrichissement du CaO (31.8%) lié à la présence de la matrice du carbonate, et une teneur en SiO₂ (22,3%) élevée due à la concentration du quartz. Les pertes au feu sont à lier avec la présence de l'eau.

IV.3.2. Essais d'absorption par capillarité de la terre F

Il se peut que le mortier utilisé dans une structure soit soumis à des phénomènes d'absorption-désorption. Dans la plupart des cas, il s'agit d'un « environnement capillaire » où se déroulent des remontées capillaires alternées.

IV.3.2.1. Principe de l'essai

Selon les normes : Blocs de Terre Comprimée (CRATerre-EAG) et AFNOR standard XP P 13-901, lorsqu'on immerge une éprouvette de mortier dans de l'eau, sa masse augmente. On dit que l'éprouvette a absorbé de l'eau. Cette augmentation de masse est due à la pénétration de l'eau dans l'éprouvette à travers les pores. L'absorption d'eau représentée par le coefficient C_b (voir formule dans la partie IV.3.5) caractérise la porosité ouverte d'un matériau.

Il existe deux types de porosités :

- la porosité fermée dans le cas où les pores ne communiquent pas avec l'extérieur,
- la porosité ouverte dans le cas où les pores communiquent avec l'extérieur,

la somme des deux porosités constitue la porosité totale.

Pour des éprouvettes de mortier, la porosité ouverte est la plus préoccupante car elle est à l'origine de nombreux inconvénients, dont principalement la perméabilité et les baisses des résistances mécaniques de la structure.

L'essai pour la détermination du coefficient C_b d'absorption d'eau a été réalisé sur des éprouvettes cylindriques à une température ambiante de 20°C.

Les masses des éprouvettes ont été déterminées après leur séchage dans une étuve réglée à 110°C jusqu'à une masse constante. Les éprouvettes ont été ensuite immergées suivant leur plus grande face à enduire de sorte que celle-ci soit à 5 mm au-dessous du niveau de l'eau. [CRATerre-EAG]

L'immersion a été réalisée en posant les éprouvettes sur des cales installées dans le fond d'un bac (Figure. IV.10). Elles ont été retirées de l'eau au bout de 10 mn, essuyées avec un linge humide (selon toujours la même norme). Elles ont été ensuite pesées afin de déterminer la masse d'eau absorbée.

Il est entendu que le coefficient d'absorption tel que donné ici, indique la vitesse d'absorption d'une éprouvette de mortier après 10 minutes.

IV.3.2.1.1. Appareillage

L'appareillage est constitué de :

- Un bac contenant de l'eau potable;
- 4 cales réglables en hauteur ;
- Une étuve dessiccation ventilée à température réglable à 40°C;
- Une balance de portée de 10kg avec une précision de 1 gramme. Pour les masses > 10kg une précision de +/-5g peut être admise ;
- Un flacon de 250 ml pour mise à niveau d'eau constant ;
- Un réglet de précision gradué en mm;
- Un chronomètre ;
- Un linge non absorbant ou une peau de chamois.

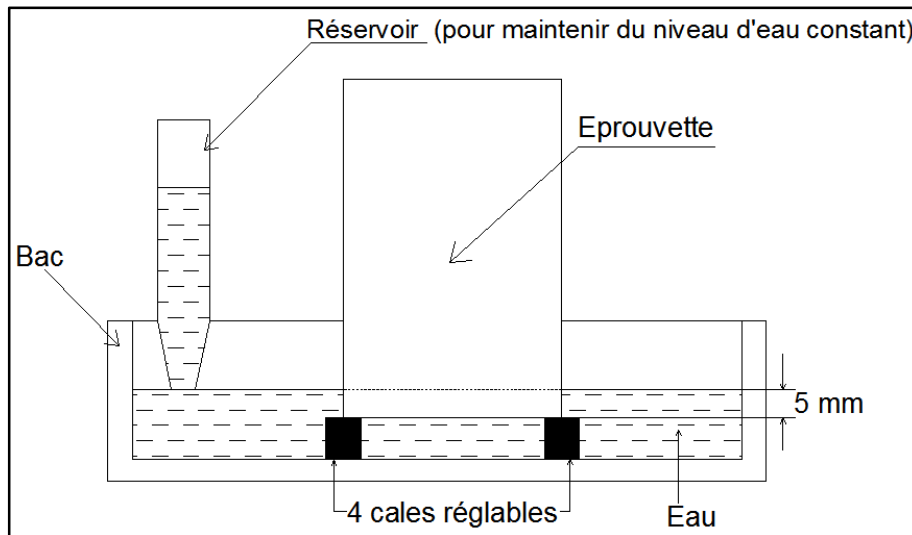


Figure IV-10: Schéma de l'essai d'absorption capillaire

IV.3.2.1.2. Préparation des échantillons

Les étapes de préparation des échantillons sont :

1. On pèse chacune des éprouvettes, soit : m_{d1} , m_{d2} , m_{dn} , ..., masse de l'éprouvette sec (en grammes), et on les numérotant : Figure. IV.11.
2. On mesure les dimensions de la surface à immerger en cm à l'aide d'un pied à coulisse : Figure. IV.12.



Figure IV-11: La balance

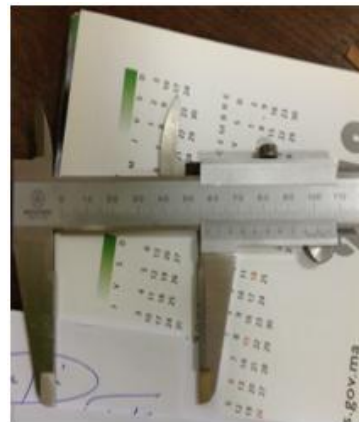


Figure IV-12: Le pied à coulisse

IV.3.2.1.3. Réalisation de l'essai

On immerge une face lisse du parement de façon qu'elle soit à 5 mm au-dessous du niveau de l'eau. On réalise cette immersion en posant les éprouvettes sur des cales installées au fond des bacs de façon que l'eau circule librement sur l'ensemble de la face immergée (Figure. IV.13).

On positionne le réservoir rempli d'eau afin de maintenir un niveau d'eau constant.

Après 10 min, on retire l'éprouvette de l'eau. On pèse l'éprouvette, soit : m_{h1} , m_{h2} , ..., m_{hn} , masse de l'éprouvette humide au cours de l'essai (en grammes) : Figure. IV.14.

**Figure IV-13: Protocole expérimental****Figure IV-14: Pesage des échantillons humides**

Le coefficient d'absorption d'eau est déduit de l'essai suivant la formule suivante [20]:

$$C_b = 100 \cdot (m_h - m_d) / s\sqrt{t} = 100 \cdot (m_h - m_d) / s\sqrt{10}$$

Dans laquelle:

- $m_h - m_d$ est la masse d'eau, en gramme, absorbée par l'éprouvette durant l'essai;
- S est la surface de la face immergée, en centimètre carrés;
- t est la durée d'immersion d'éprouvette, en minutes.

IV.3.2.2. Résultats d'essai

On présente ci-dessous les résultats de l'essai de l'absorption de l'eau que nous avons effectué sur des éprouvettes cylindriques associées aux différents dosages en ciment 0%, 4%, 7% et 10% [94, 95].

Tableau IV-2: Résultats de l'essai d'absorption de la terre brute

Référence	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3
Surface ($S = \pi r^2$)	26,71	26,71	26,71
Masse d'éprouvette sec ($=m_d$) en g	408,73	409,24	434,55
Masse d'éprouvette humide après 10 minutes ($=m_h$) en g	446,84	447,16	473,91
Masse d'eau absorbée ($=m_h - m_d$) en g	38,11	37,92	39,36
Coefficient d'absorption d'eau par capillarité $C_b = \frac{100 \cdot (m_h - m_d)}{S\sqrt{10}}$	45,11	44,89	46,59
Moyenne $C_b = \frac{(C_{b1} + C_{b2} + C_{b3})}{3}$	45,53		

Tableau IV-3: Résultats de l'essai d'absorption de la terre à 4% de ciment

Référence	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Eprouvette 4
Surface ($S = \pi r^2$)	26,71	26,71	26,71	26,71
Masse d'éprouvette sec (=md) en g	409,50	413,07	403,71	403,62
Masse d'éprouvette humide après 10 minutes (=mh) en g	442,42	443,19	435,18	435,73
Masse d'eau absorbée (=mh-md) en g	32,92	30,12	31,47	32,11
Coefficient d'absorption d'eau par capillarité $C_b = \frac{100 * (m_h - m_d)}{S\sqrt{10}}$	38,97	35,65	36,85	38,01
Moyenne $C_b = \frac{(C_{b1}+C_{b2}+C_{b3}+C_{b4})}{3}$	37,37			

Tableau IV-4: Résultats de l'essai d'absorption de la terre à 7% de ciment

Référence	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3	Eprouvette 4
Surface ($S = \pi r^2$)	26,71	26,71	26,71	26,71
Masse d'éprouvette sec (=md) en g	409,04	412,48	399,56	412,30
Masse d'éprouvette humide après 10 minutes (=mh) en g	437,27	443,41	430,21	444,95
Masse d'eau absorbée (=mh-md) en g	28,23	30,93	30,65	32,65
Coefficient d'absorption d'eau par capillarité $C_b = \frac{100 * (m_h - m_d)}{S\sqrt{10}}$	33,42	36,61	36,28	38,65
Moyenne $C_b = \frac{(C_{b1}+C_{b2}+C_{b3}+C_{b4})}{4}$	36,25			

Tableau IV-5: Résultats de l'essai d'absorption de la terre à 10% de ciment

Référence	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3
Surface ($S = \pi r^2$)	26,71	26,71	26,71
Masse d'éprouvette sec (=md) en g	403,53	415,08	420,85
Masse d'éprouvette humide après 10 minutes (=mh) en g	434,92	444,87	450,87
Masse d'eau absorbée (=mh-md) en g	31,39	29,79	30,02
Coefficient d'absorption d'eau par capillarité $C_b = \frac{100 * (m_h - m_d)}{S\sqrt{10}}$	37,16	35,26	35,54
Moyenne $C_b = \frac{(C_{b1}+C_{b2}+C_{b3})}{3}$	35,98		

On peut résumer les résultantes dans le tableau suivante :

Tableau IV-6: Le coefficient d'absorption de l'eau

Dosage	C_b
0%	45,53
4%	37,37
7%	36,25
10%	35,98

On représente ci-dessous la variation du coefficient d'absorption de l'eau de la terre **F** en fonction du dosage en ciment (Figure. IV.15).

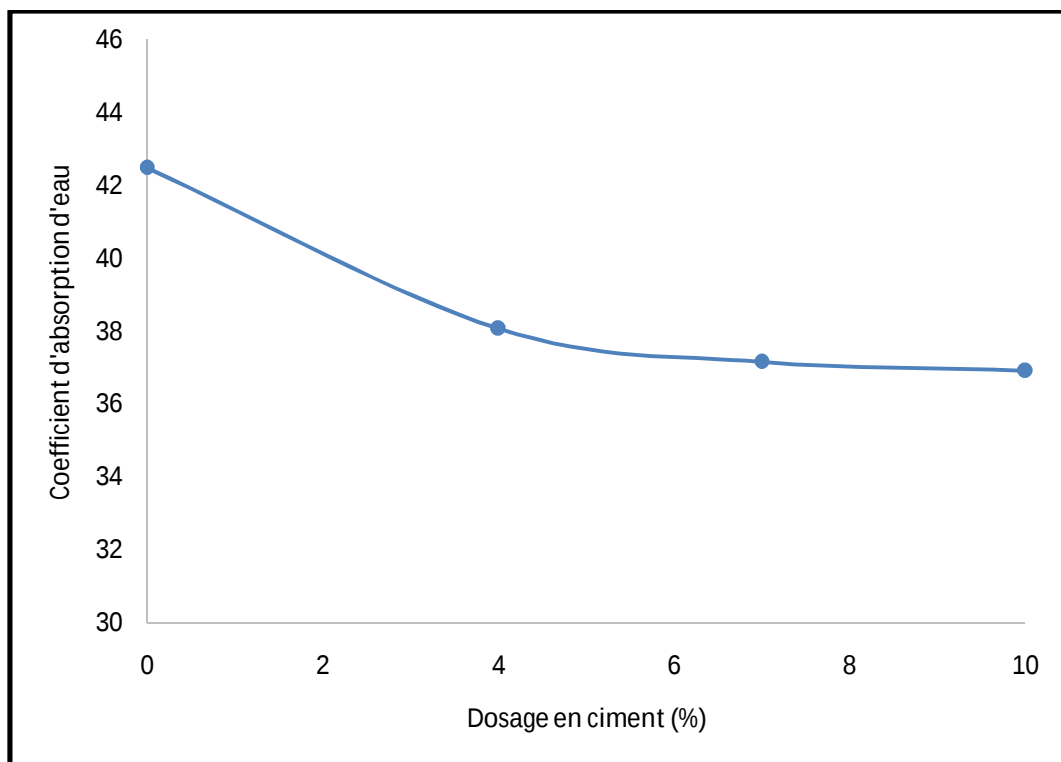


Figure IV-15: Coefficient d'absorption d'eau C_b en fonction du dosage en ciment

On remarque d'après cette figure que les éprouvettes non stabilisées par le ciment absorbent beaucoup d'eau par rapport aux autres qui sont stabilisées. Cette différence d'absorption de l'eau est remarquée lors de la réalisation de l'essai. Pour les éprouvettes non stabilisées, l'eau fait détériorer une partie de celles-ci comme illustré dans la figure. IV.16.

Pour rappel, les éprouvettes de mortier ne sont pas compactées comme celles du bloc mais juste "damées" par un effort manuel. D'où la forte présence de pores (porosité ouverte) à l'intérieur du mortier qui favorise l'échange avec l'extérieur.



Figure IV-16: Epreuve cylindrique après le test d'absorption d'eau par capillarité

Par ailleurs, les éprouvettes stabilisées au ciment, même à des dosages faibles de 4%, 7% et 10%, gardent leurs formes après l'immersion dans l'eau (Figure. IV.17).



Figure IV-17: Epreuve cylindrique stabilisée après le test d'absorption d'eau par capillarité et après l'essai de compression

D'après les éprouvettes testées, plus le dosage en ciment augmente, plus l'absorption de l'eau par les éprouvettes stabilisées diminue. D'après cet essai, pour éviter la remontée capillaire, si on rajoute du ciment au mortier, 4% de dosage par rapport à la masse sèche de la terre, est suffisante pour empêcher l'absorption de l'eau, l'ajout de 3% ou de 6% au-delà de 4% ne porte aucun gain significatif.

IV.3.3. Résultats expérimentaux des essais mécaniques

Des essais sur des éprouvettes cylindriques, similaires à ceux du bloc de terre comprimée, ont été réalisés pour le mortier pour déterminer la courbe contrainte – déformation. Les éprouvettes ont été conçues au Laboratoire de Mécanique, des Matériaux et de Thermique à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Rabat. Les éprouvettes cylindriques de terre stabilisée et non stabilisée au ciment ont subi au préalable une cure de 28 jours selon le protocole suivant avant l'essai de compression simple :

Echantillon	Cure et durée
Non stabilisé	28 jours à l'air libre
Stabilisé	14 jours sous plastique + 14 jours à l'air libre



Figure IV-18: Les éprouvettes de mortier de deux terres F et R

Les essais mécaniques ont été réalisés au Laboratoire des essais mécaniques du Service de Technologie du Bois et des Produits Forestiers au sein de la Direction des Eaux et Forêts et de la Lutte contre la Désertification de Rabat. Les éprouvettes obtenues ont un diamètre $D = 6$ cm (5,832 cm) et un élanement (diamètre/ hauteur) de l'ordre de 0.6, cet élanement permet d'éviter tout effet de flambage de l'éprouvette (figure. IV.19).

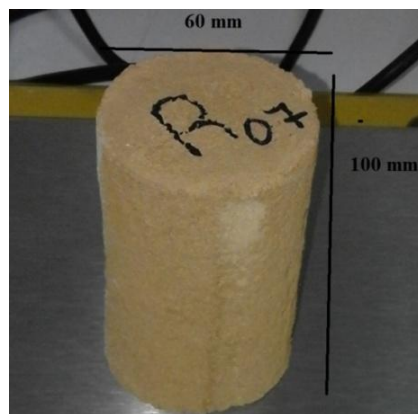


Figure IV-19: Eprouvette de mortier

Afin de réaliser l'essai de compression, toutes les éprouvettes ont subi un surfacage. Celui-ci permet d'assurer une bonne planéité de leurs surfaces de base et de les rendre normales à l'axe central de l'éprouvette, pour éviter qu'une partie de l'éprouvette soit sollicitée plus qu'une autre, ce qui engendre éventuellement une rupture partielle, induisant une chute de résistance.

La vitesse d'écrasement est fixée à 10 mm/min.

Les deux terres étudiées dans ce chapitre sont la terre de Fès (**F**) et la terre de Rabat (**R**) associées aux dosages 0% , 4%, 7% et 10% en ciment. Les courbes contraintes-déformations

issues de l'expérimentation sont similaires à celles du bloc. Elles présentent toutes des formes similaires à celles du bloc de terre comprimée, mais avec une zone d'induction (partie I) plus apparente pour le mortier (Figure. IV.20). Cela est attribué au fait que le mortier est plus argileux (terre écrétée au tamis d'ouvertures 3,15 mm). Aussi, le mortier n'est pas compacté, ce qui peut expliquer l'importance de la zone d'induction correspondant à un réarrangement des grains au sein du matériau et de sa grande déformabilité.

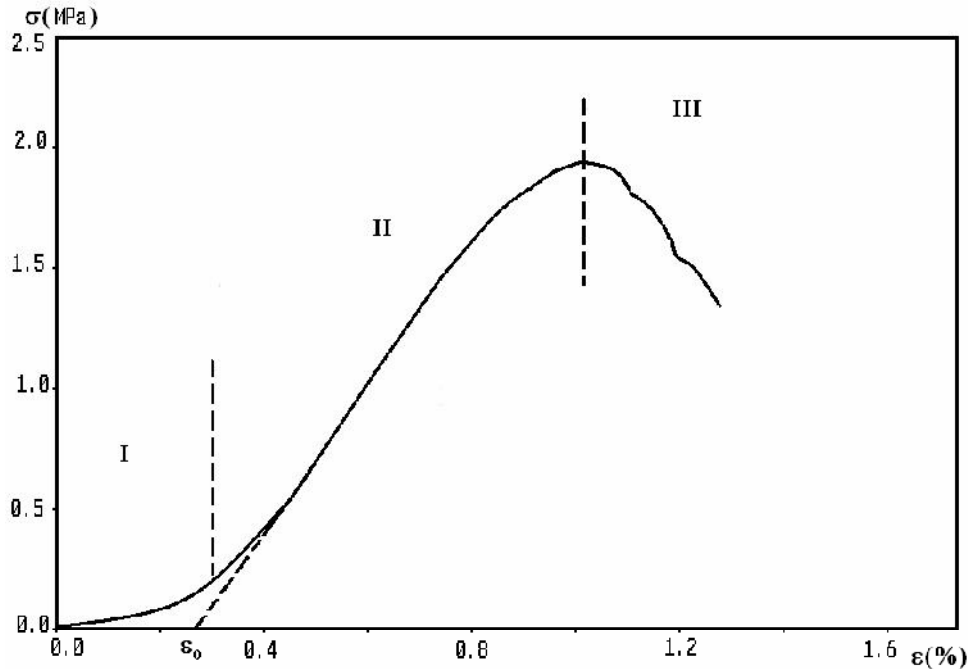


Figure IV-20: Courbe de comportement du mortier de terre

IV.3.3.1. Terre brute à l'état sec (0% de ciment)

Les éprouvettes, de diamètre 58,32 mm, associées à 0% de ciment à l'état sec, ont pour hauteurs respectives : $h = 97,86$ et $95,10$ mm.

La résistance en compression R_c , le module d'Young E et la déformation limite ϵ_{lim} obtenues expérimentalement, sont reportés dans le tableau IV. 7.

Tableau IV-7: Résultats expérimentaux du mortier F associés au dosage de 0% de ciment

Référence	R_c (MPa)	E (MPa)	ϵ_{lim} (%)
Eprouvette 1	0,099	7,850	0,061
Eprouvette 2	0,082	6,473	0,076
Eprouvette 3	*	*	*
Moyenne	0,091	7,161	0,0686
Ecart type	0,012	0,974	0,0102

*essai non validé à cause de la nature frileuse du mortier

IV.3.3.2. Terre brute à l'état humide (0% de ciment)

Les éprouvettes de diamètre 58,32 mm, associées à 0% du ciment à l'état humide, ont pour hauteurs respectives : $h = 99,80$; $98,40$ et $102,38$ mm.

Dans le tableau suivant, nous donnons la résistance en compression R_c , le module d'Young E et la déformation limite ϵ_{lim} .

Sur les trois essais, seuls deux ont été validés. Il convient de rappeler avec insistance que la nature friable du mortier sans ciment (brut) rend l'expérimentation très difficile.

Tableau IV-8: Résultats expérimentaux du mortier F associés au dosage de 0% à l'état humide

<i>Référence</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	0,049	3,057	0,181
<i>Eprouvette 2</i>	0,273 (-)	1,835	0,146
<i>Eprouvette 3</i>	*	*	*
<i>Moyenne</i>	0,049	2,446	0,1633
<i>Ecart type</i>	0,000	0,864	0,0246

IV.3.3.3. 4% de ciment à l'état sec

Pour le dosage de 4%, les éprouvettes soumises à l'essai ont pour hauteurs respectives : $h = 104,10$; $100,10$ et $103,60$ mm.

La résistance en compression, le module d'Young et la déformation limite obtenus sont donnés au tableau IV.9. Sur les trois essais, seuls deux ont été validés.

Tableau IV-9: Résultats expérimentaux du mortier F associés au dosage de 4%

<i>Référence</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	0,099	8 ,775	0,0611
<i>Eprouvette 2</i>	0,101	7,209	1,0802(*)
<i>Eprouvette 3</i>	*	*	*
<i>Moyenne</i>	0,100	7,992	0,0255
<i>Ecart type</i>	0,001	1,1073	1,1074

IV.3.3.4. 4% de ciment à l'état humide

Pour le dosage de 4% à l'état humide, les éprouvettes soumises à l'essai ont pour hauteurs respectives : $h=102,70$; $99,70$; $103,30$ et $103,90$ mm.

Les caractéristiques mécaniques obtenues sont répertoriées au tableau ci-dessous.

Tableau IV-10: Résultats expérimentaux du mortier F humide associés au dosage de 4%

<i>Références</i>	<i>Rc (MPa)</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>$\mathcal{E}_{lim}$ (%)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	0,060	4,258	0,1637
<i>Eprouvette 2</i>	0,056	3,486	0,1467
<i>Eprouvette 3</i>	0,056	3,854	0,0546
<i>Moyenne</i>	0,057	3,866	0,1217
<i>Ecart type</i>	0,002	0,386	0,0245

IV.3.3.5. 7% de ciment à l'état sec

Les éprouvettes à l'état sec associées au dosage de 7% de ciment ont respectivement pour hauteurs : h=101,88 ; 102,10 et 103,84mm. Sur trois essais, seuls deux ont été validés.

Nous reportons dans le tableau IV.11 les trois paramètres issus de l'expérimentation.

Tableau IV-11: Résultats expérimentaux du mortier F Sec associés au dosage de 7%

<i>Référence</i>	<i>Rc (MPa)</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>$\mathcal{E}_{lim}$ (%)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	0,225	13,411	0,0220
<i>Eprouvette 2</i>	0,356	22,398	0,0254
<i>Eprouvette 3</i>	*	*	*
<i>Moyenne</i>	0,290	17,904	0,0237
<i>Ecart type</i>	0,093	6,355	0,0024

IV.3.3.6. 7% de ciment à l'état humide

Les éprouvettes à l'état humide associées au dosage de 7% de ciment ont respectivement pour hauteurs : h = 98,32; 105,70; 102,50 et 100,70 mm.

Dans le tableau IV.12, nous donnons les valeurs des grandeurs obtenues expérimentalement.

Tableau IV-12: Résultats expérimentaux du mortier F humide associés au dosage de 7%

<i>Référence</i>	<i>Rc (MPa)</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>$\mathcal{E}_{lim}$ (%)</i>
<i>Eprouvette1</i>	0,174	9,028	0,0706(*)
<i>Eprouvette 2</i>	0,084	3,078	0,0911
<i>Eprouvette 3</i>	0,125	6,611	0,0219
<i>Eprouvette 4</i>	0,189	12,888	0,0342
<i>Moyenne</i>	0,143	7,901	0,0491
<i>Ecart type</i>	0,048	4,126	0,0369

IV.3.3.7. 10% de ciment à l'état sec

Les éprouvettes testées associées au dosage de 10% de ciment à l'état sec ont respectivement pour hauteurs : $h = 100,40; 98,90$ et $102,80$ mm.

Les caractéristiques mécaniques obtenues sont répertoriées au tableau ci-dessous.

Tableau IV-13: Résultats expérimentaux du mortier F sec associés au dosage de 10%

<i>Référence</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	0,328	22 ,917	0,0551(*)
<i>Eprouvette 2</i>	0,271	17,291	0,0871(*)
<i>Eprouvette 3</i>	0,337	27,149	0,0192
<i>Moyenne</i>	0,312	22,452	0,0192
<i>Ecart type</i>	0,035	4,945	0,0000

IV.3.3.8. 10% de ciment à l'état humide

Les éprouvettes testées associées au dosage de 10% à l'état humide ont respectivement pour hauteur : $h = 103,54, 102,86$ et $105,48$ mm.

La résistance en compression, le module d'Young et la déformation limite obtenues expérimentalement sont reportés au tableau IV.14.

Tableau IV-14: Résultats expérimentaux du mortier F humide associés au dosage de 10%

<i>Référence</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	0,0973	7,928	0,0240
<i>Eprouvette 2</i>	0,301	15,378	0,0462
<i>Eprouvette 3</i>	0,077	3,165	0,0618
<i>Moyenne</i>	0,158	8,824	0,0440
<i>Ecart type</i>	0,124	6,156	0,0190

Une comparaison des valeurs moyennes des différents dosages en ciment associés à la terre de Fès (F) est donnée au tableau suivant.

Tableau IV-15: Résultats expérimentaux des propriétés mécaniques du mortier F Sec en fonction du dosage

<i>Dosage</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
<i>0%</i>	7,161	0.091	0.0686
<i>4%</i>	7,992	0.100	0.0611
<i>7%</i>	17.904	0.290	0.0237
<i>10%</i>	22.452	0.312	0.0192

D'après ce tableau, on note une augmentation de la résistance en compression et du module d'élasticité en fonction du dosage en ciment. En termes de pourcentage, l'évolution de la résistance en compression est irrégulière : quand on passe de 0 à 4% de dosage en ciment elle est de l'ordre de 10%, quand on passe de 4 à 7% elle de l'ordre de 190% et quand on passe de 7 à 10%, elle est de l'ordre de 8%. La même évolution est remarquée pour le module d'Young.

On constate aussi que la déformation limite décroît lorsque le dosage en ciment croît. En termes de pourcentage, la déformation diminue de 11% lorsqu'on passe de 0 à 4% du dosage, et de 61% lors du passage de 4 à 7%, et décroît de 19% lors du passage de 7 à 10% du ciment.

Une comparaison des valeurs moyennes de différents dosages associés à la terre **F** humide est donnée dans le tableau suivant :

Tableau IV-16: Résultats expérimentaux des propriétés mécaniques du mortier F humide en fonction du dosage

<i>Dosage</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
0%	2,446	0,049	0,1633
4%	3,866	0,057	0,1217
7%	7,901	0,143	0,0491
10%	8,824	0,158	0,0440

On note une augmentation de la résistance en compression R_c et du module d'élasticité E en fonction du dosage en ciment. En termes de pourcentage, l'évolution de la résistance en compression est irrégulière : quand on passe de 0 à 4% de dosage en ciment elle est de l'ordre de 16%, quand on passe de 4 à 7% elle de l'ordre de 151% et quand on passe de 7 à 10% elle est de l'ordre de 10%. On remarque presque la même évolution pour le module d'Young. On constate aussi que la déformation limite décroît lorsque le dosage en ciment croît. En termes de pourcentage, la déformation diminue de 25% lorsqu'on passe de 0 à 4% du dosage, et de 60% lors du passage de 4 à 7%, et décroît de 10% lors du passage de 7 à 10% du ciment.

Les figures. IV.21, IV.22 et IV.23, présentent respectivement l'évolution de la résistance, du module d'élasticité et de la déformation limite du mortier d'éprouvettes de mortier de la terre **F** dans les deux cas sec et humide, en fonction du dosage du ciment.

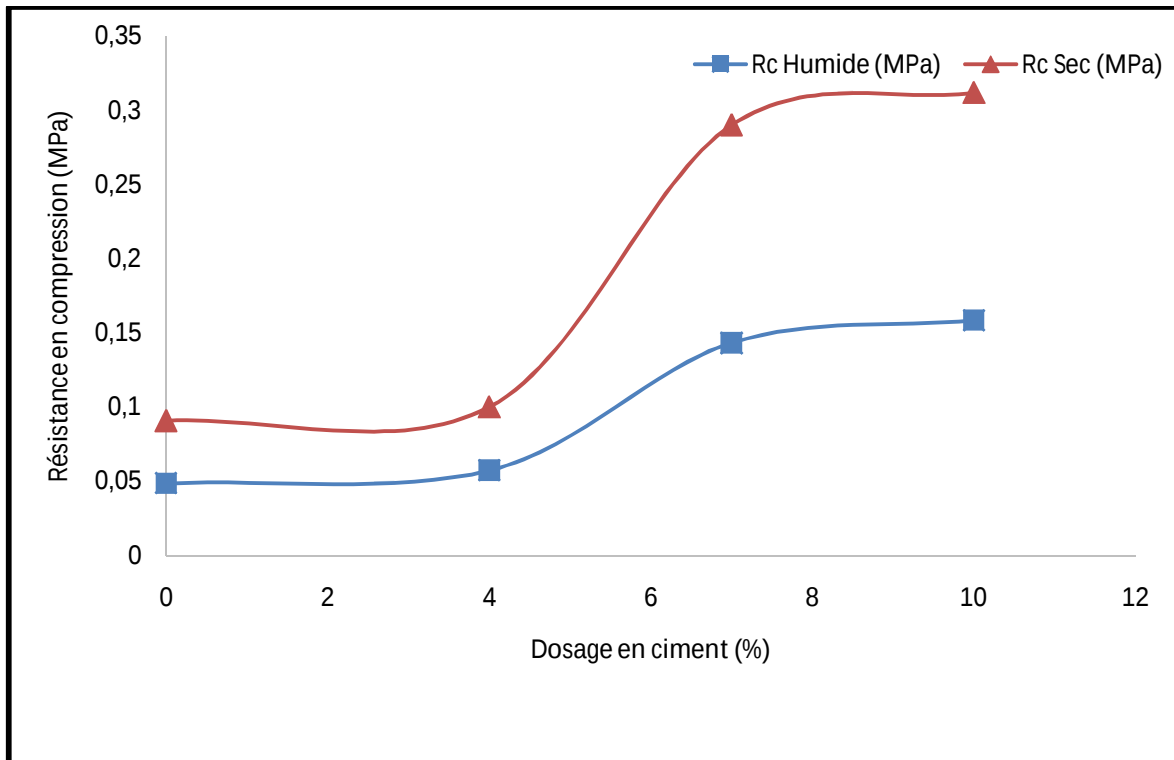


Figure IV-21: Résistance en compression du mortier F humide et sec en fonction du dosage

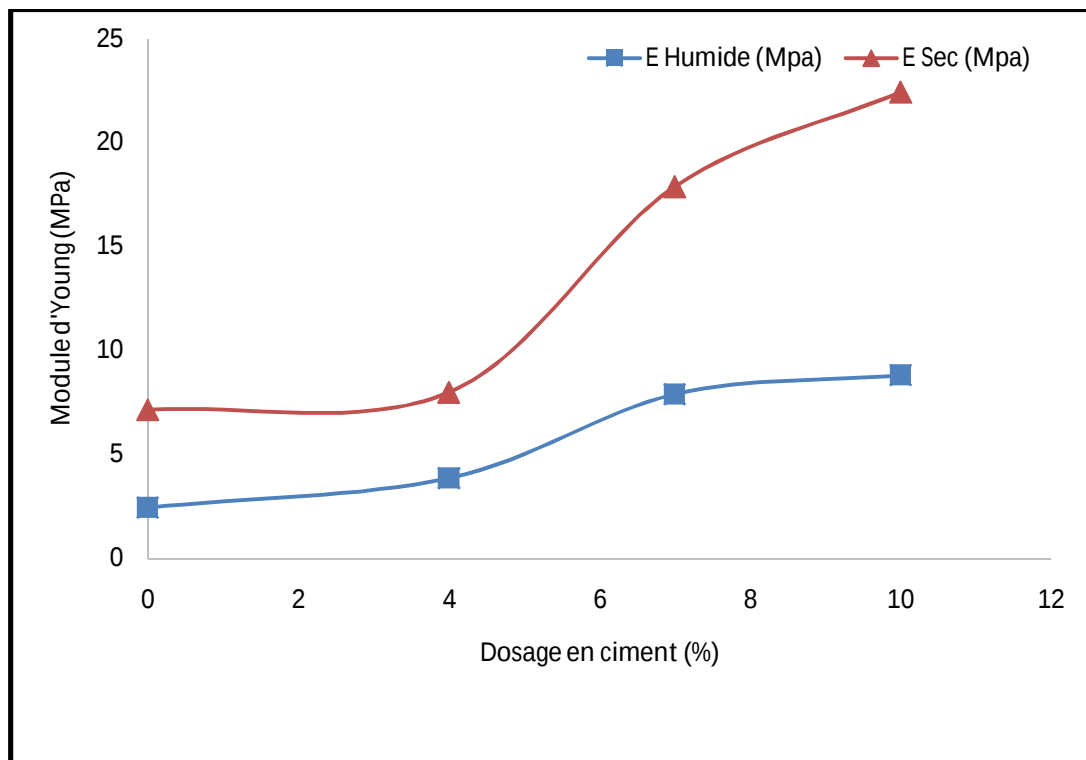


Figure IV-22: Module d'Young du mortier F humide et sec en fonction du dosage

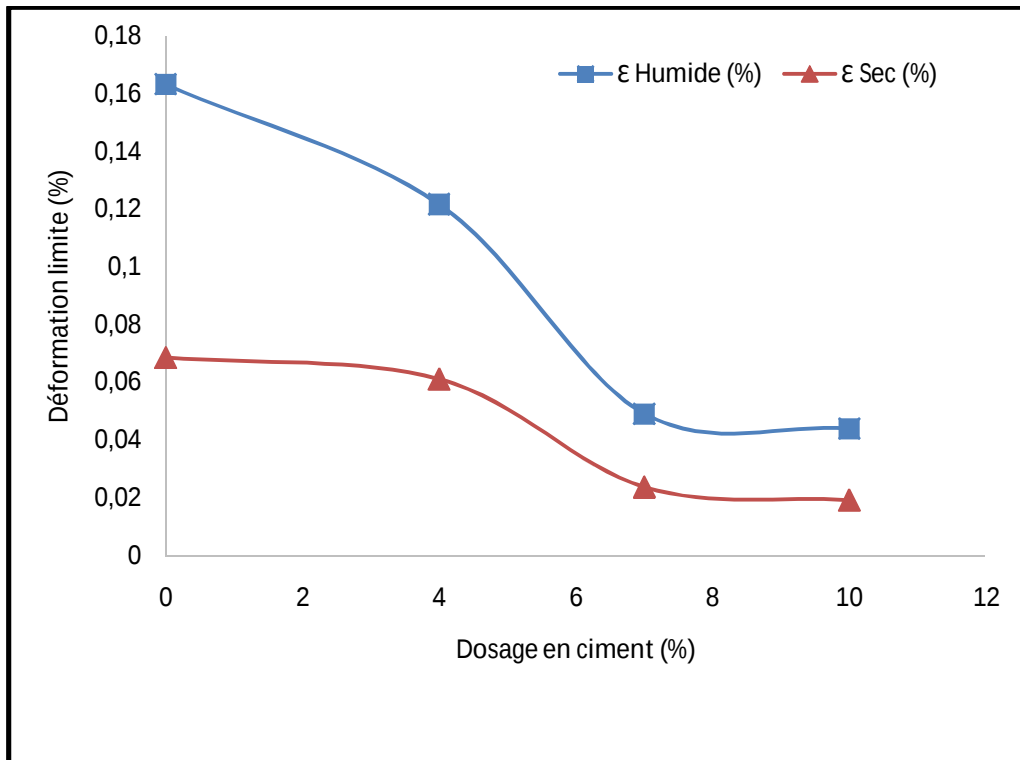


Figure IV-23: Déformation limite du mortier F humide et sec en fonction du dosage

D'après ces figures, on note un accroissement de la résistance et du module d'élasticité en fonction du dosage en ciment, alors que la déformation varie dans le sens inverse. Toutefois, il est à noter que l'apport supplémentaire de 6% du ciment (de 4 à 10%) a fait augmenter la résistance de 60%, alors que la déformation baisse de 13%.

Le tableau IV.24 fait état d'un accroissement de la résistance en compression et du module d'Young en fonction du dosage en ciment, alors que la déformation varie dans le sens inverse. L'apport en ciment contribue à la rigidification du mortier et réduit par conséquent sa déformabilité. Toutefois, il est à noter que l'apport supplémentaire de 6% du ciment (de 4 à 10%) a fait triplé la résistance et le module d'Young en compression (augmentation de l'ordre de 200%) alors que la déformation n'a baissé que de 14%.

IV.4. Analyses expérimentales de la durabilité du mortier de terre de Rabat

La deuxième terre utilisée dans cette étude du mortier provient du centre ville de Rabat, elle a été extraite en respectant les conditions recommandées par le laboratoire CRATerre. Elle est référenciée par R.

IV.4.1. Granulométrie

La terre étudiée a été prélevée au centre de la ville de Rabat, sur une profondeur environ 100 cm. Avant d'analyser les composantes granulaires de la terre étudiée, nous avons jugé intéressant de porter la courbe granulométrique de la terre de Rabat dans les fuseaux limites recommandés par CRATerre (Figure IV.24).

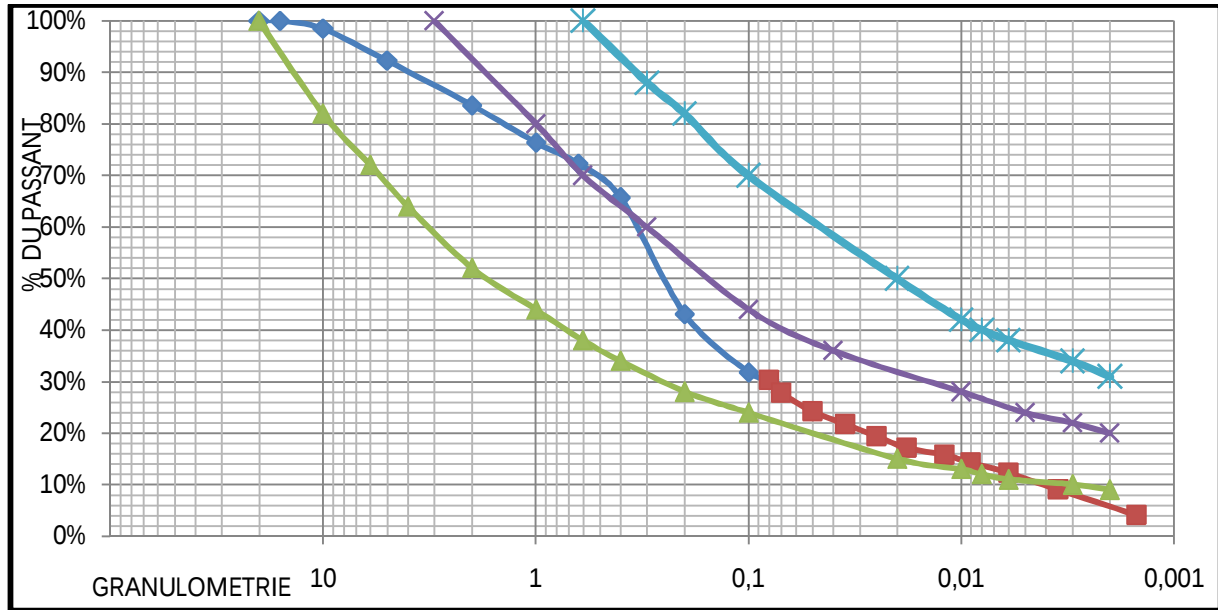


Figure IV-24: Courbe granulométrique de la terre R

D'après la courbe ci-dessus, nous remarquons que la courbe granulométrique est totalement inscrite dans les fuseaux limites préconisés par CRATerre.

Le tableau suivant résume la fraction granulaire de cette terre (R) en comparaison avec celle de (F).

Tableau IV-17: La fraction granulaire de la terre de Rabat

Fraction granulaire (%)				
	Sables gros	sables fins	Limons	Argiles
Terre F	41,67	30,55	16,67	11,11
Terre R	48,46	15,34	17,71	20,49

L'identification de la terre se complète par l'analyse de la partie argileuse pour définir ses états de consistance dite limites d'Atterberg: limite de liquidité (W_L), limite de plasticité (W_P) et l'indice de plasticité $I_P = W_L - W_P$. Ces limites sont données au tableau IV.2 en comparaison avec celles de la terre F. Ce tableau reprend aussi le coefficient d'activité Ca et la surface spécifique Sa .

Tableau IV-18: Limites de consistance de la terre R

	W_P (%)	W_L (%)	I_P (%)	Ca	Sa (m ² /g)
Terre R	15,04	21,10	6,06	0,39	77
Terre F	25,32	35,58	10,26	1,28	48,93

Plus le matériau est argileux avec un faible pourcentage de calcite, plus il a besoin d'être stabilisé davantage par l'apport en ciment, et ce afin d'améliorer ses caractéristiques [43].

IV.4.2. Analyses minéralogiques et chimiques

Dans les paragraphes suivants. Il s'agit d'analyser les éléments chimiques et de déterminer les proportions des éléments minéralogiques dans la terre **R** (éprouvettes de mortier) par différentes techniques d'analyses à savoir : la diffraction des rayons X, l'Infrarouge, le Microscope Electronique à Balayage et la Fluorescence X.

IV.4.2.1. Diffraction des Rayon X (DRX)

L'analyse par la diffraction des rayons X de la terre **R** (Figure. IV.25) montre qu'elle est formée principalement de calcite (CaCO_3), de quartz (SiO_2). De plus, la même remarque est faite si en ajoute le ciment à l'éprouvette du mortier: augmentation du pourcentage de la calcite et la présence d'Aluminium de Silicate avec une très faible quantité (Figure. IV.26.27.28).

La présence de calcite et l'absence de portlandite montrent que les liants sont entièrement carbonatés. D'après Mertens et al. [70], le quartz n'est pas un liant et il constitue une partie de la fraction de sable fin de l'agrégat.

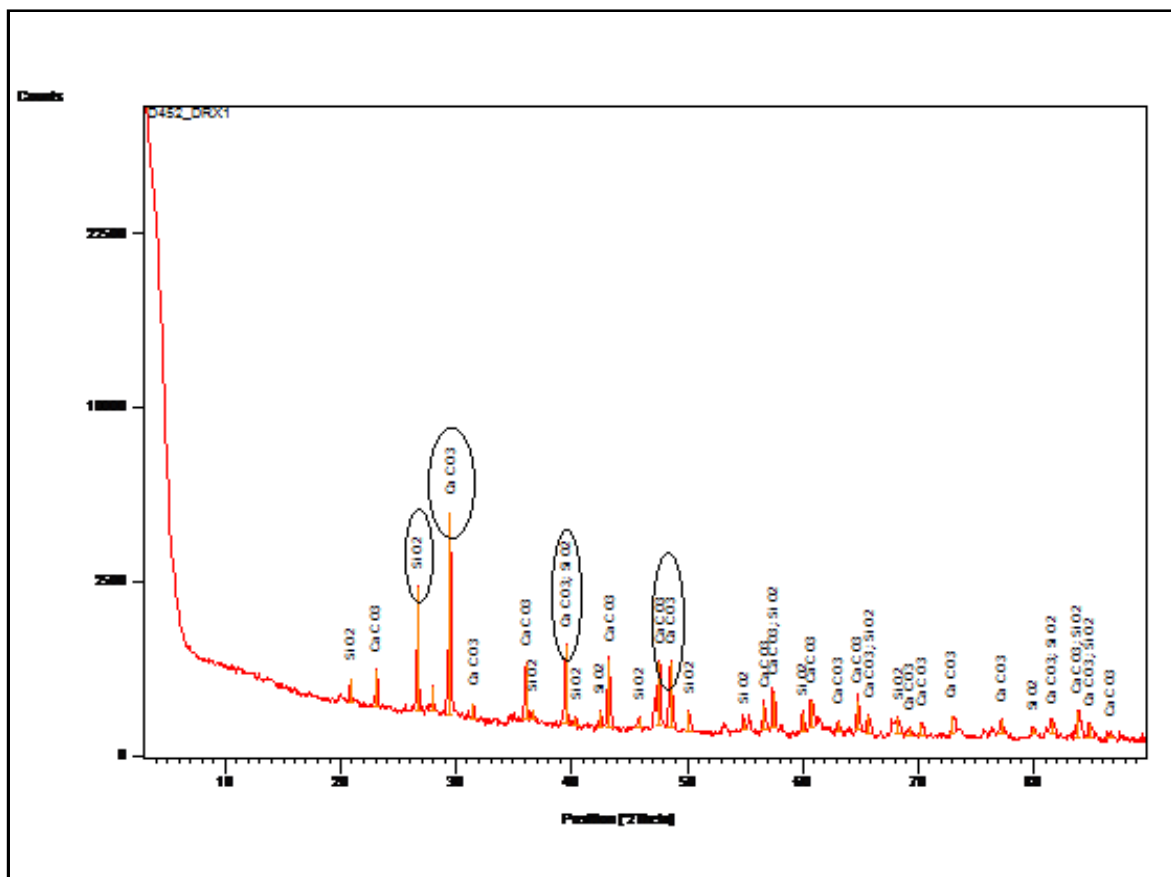


Figure IV-25: Spectres de diffractions des rayons X de la terre R brute

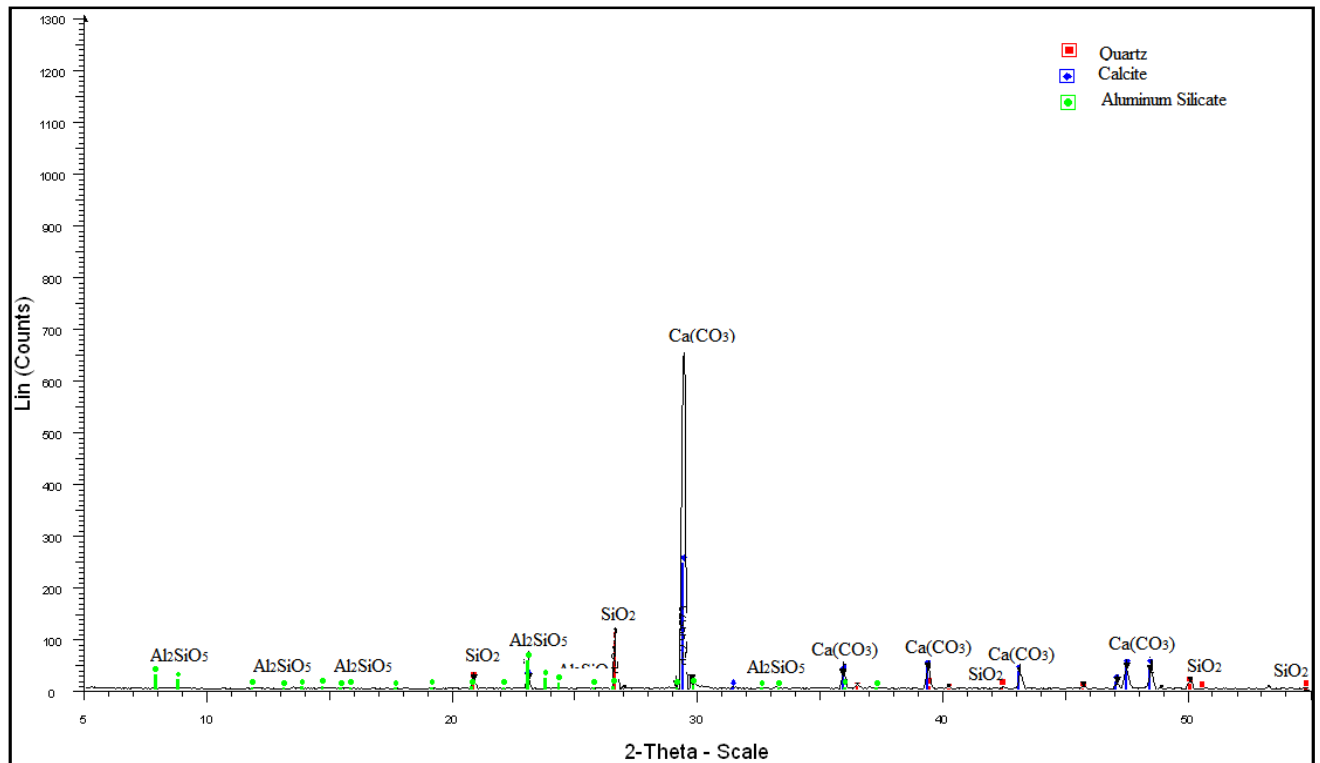


Figure IV-26: Spectres de diffractions des rayons X de la terre R à 4% du ciment

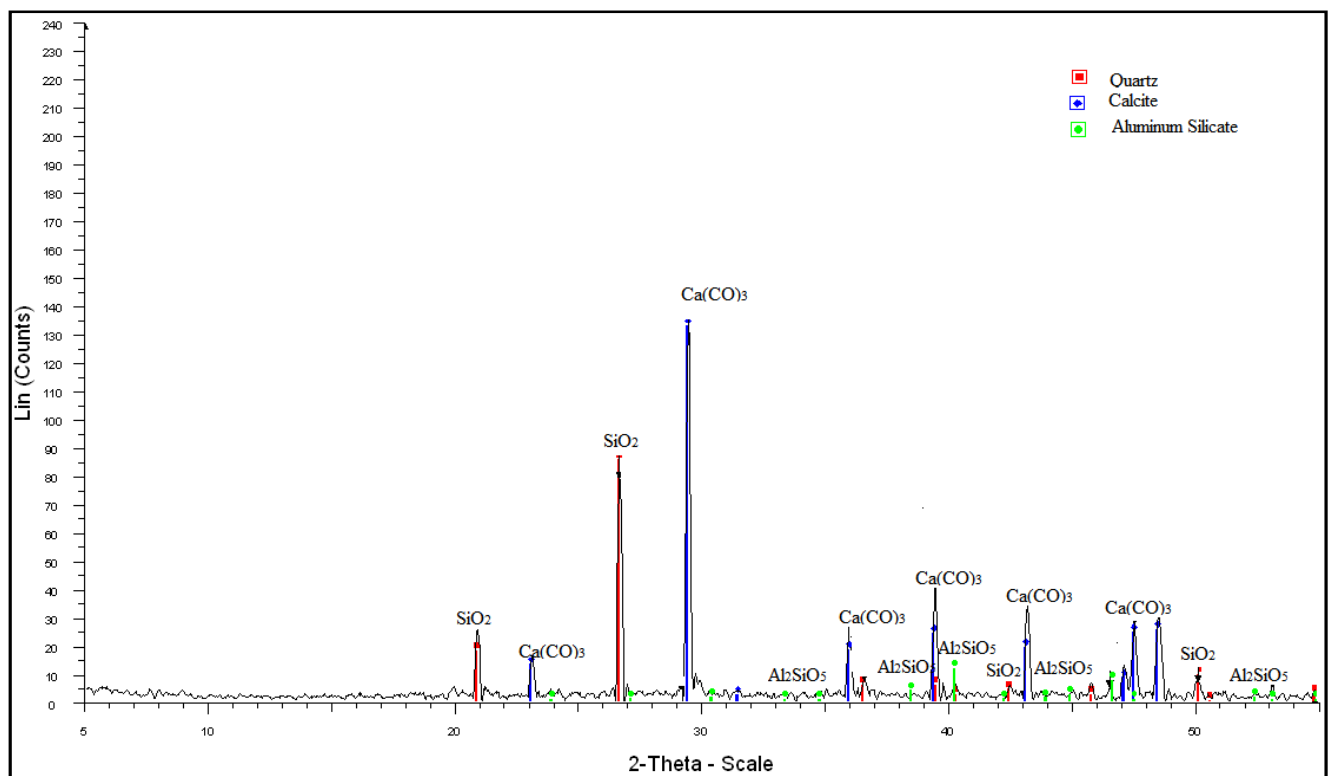


Figure IV-27: Spectres de diffractions des rayons X de la terre R à 7% du ciment

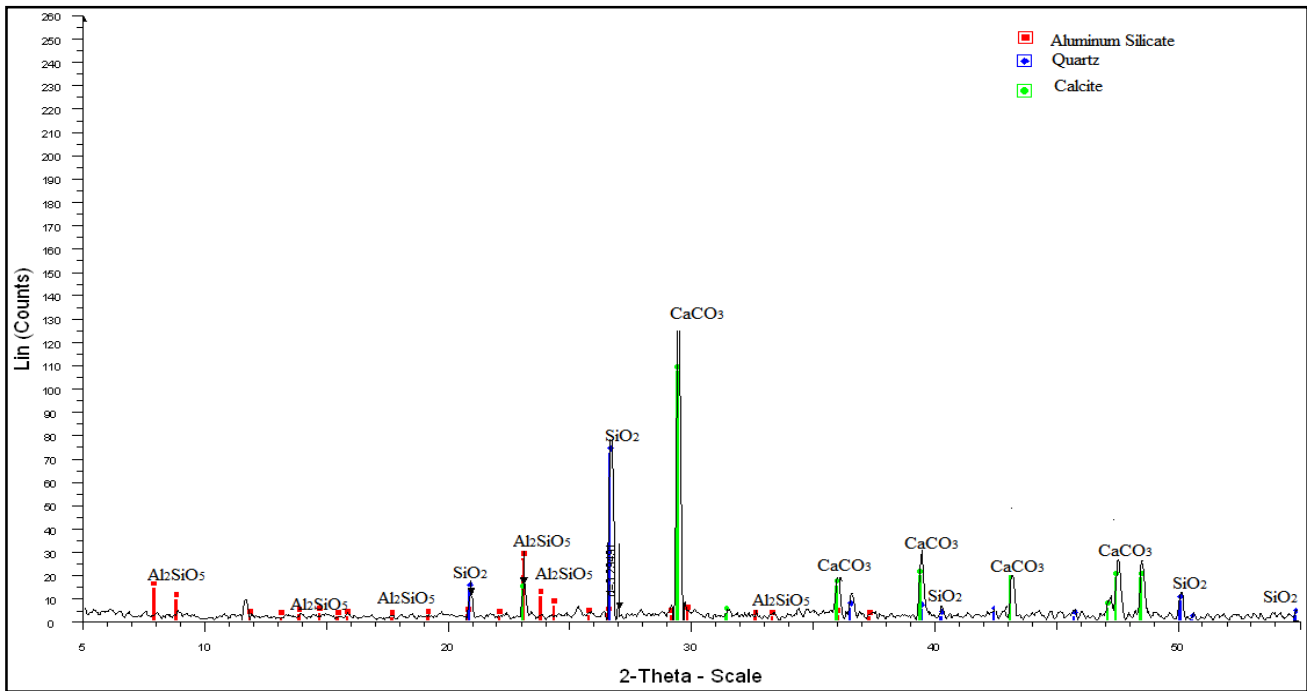
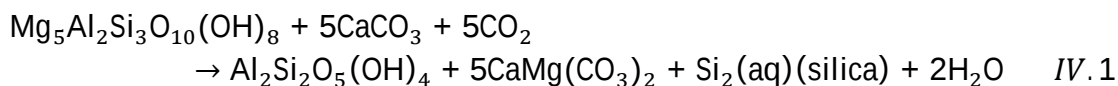


Figure IV-28: Spectres de diffractions des rayons X de la terre R à 10% du ciment

IV.4.2.2. Analyse d’Infrarouge (IR)

L’analyse par l’Infrarouge de la terre **R** permet de confirmer la présence de calcite et de quartz comme principaux minéraux. La calcite est identifiée par les pics à (1798.70, 1429.90, 874.85, 2874.99, 712.46) cm^{-1} (Figures IV.29.30.31.32). Le quartz est identifié par les pics à (1033.75, 797.79, 779.31) cm^{-1} (Figures IV.29.30.31.32). Les analyses montrent la présence de la kaolinite avec les pics à (472.03, 696.12, 913.31, 3622.25, 3696.17) cm^{-1} (Figures IV.35.36.37.38) et de l’eau à 3434.26 cm^{-1} [16, 39, 41, 42, 72, 73, 94].

La formation de la kaolinite est obtenue à partir de la présence de Al et de Si suivant la réaction (1) [97]:



Avec :

$\text{Mg}_5\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$: (Mg – chlorite)

CaCO_3 : Calcite

$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$: Kaoilinte

$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$: Dolomite

$\text{Si}_2(\text{aq})$: Silica

Ainsi, on trouve des bandes d’acides humiques et fulviques qui sont liées à l’activité racinaire quelconque (2513.64, 537.13, 2923.94) cm^{-1} [42, 72, 73, 41, 94, 96–98].

Les bandes situées vers 3430 cm^{-1} et 1636 cm^{-1} sont caractéristiques de l'eau souvent d'hydratation. Le spectre de l'échantillon **R** présente des bandes dans les régions $3000\text{--}2800\text{ cm}^{-1}$ et $1500\text{--}1400\text{ cm}^{-1}$ qui caractérisent la matière organique.

Les bandes apparaissant autour de $(2922, 1538, 1797, 3442)\text{ cm}^{-1}$ pour les quatre échantillons caractérisant les substances humiques. Ainsi, on trouve des bandes d'acides humiques et fulviques qui sont liés à l'activité racinaire quelconque aux $(2516.1, 2876.3, 530.5)\text{ cm}^{-1}$ [41, 42, 72, 73].

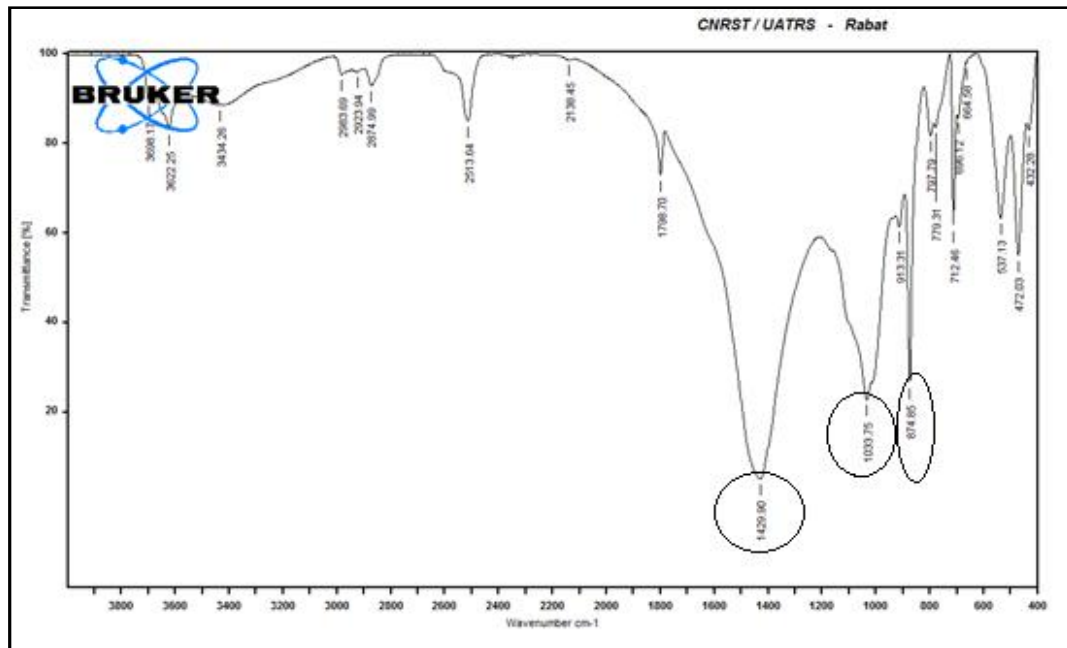


Figure IV-29: Spectres d'Infrarouge de la terre R brute

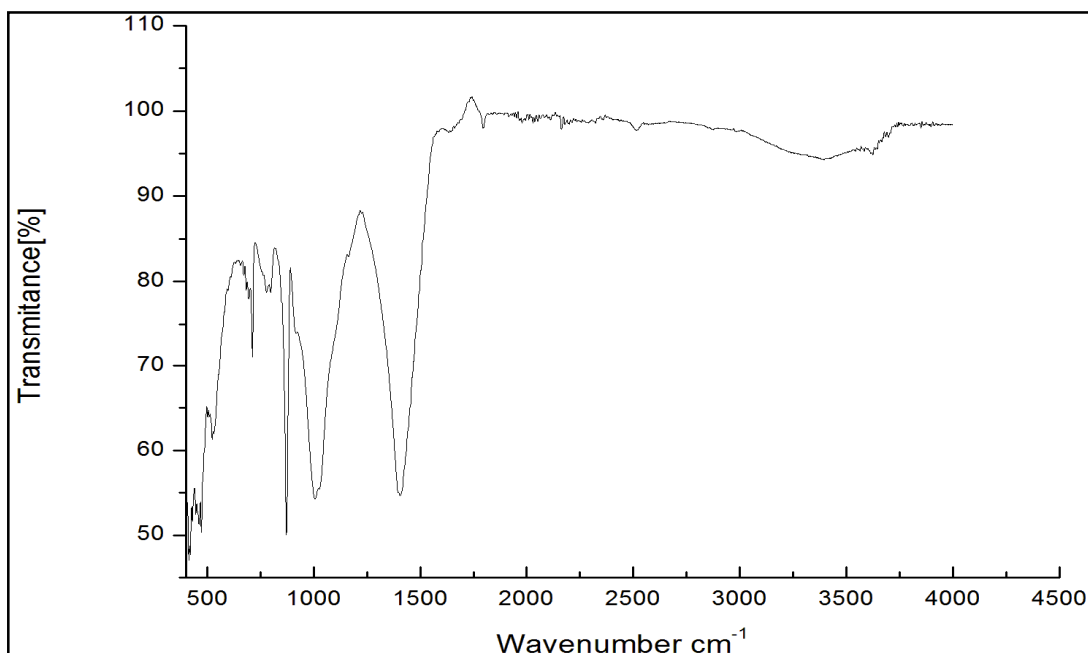


Figure IV-30: Spectres d'Infrarouge de la terre de R à 4% du ciment

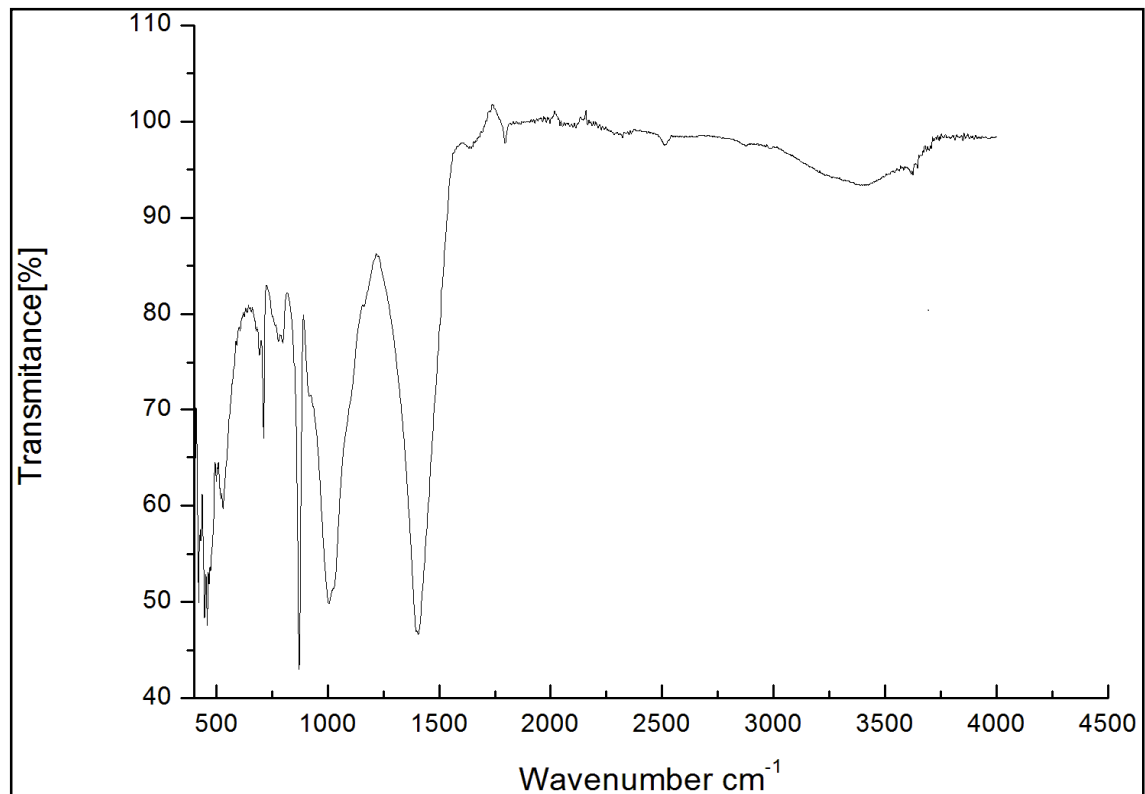


Figure IV-31: Spectres d'Infrarouge de la terre de R à 7% du ciment

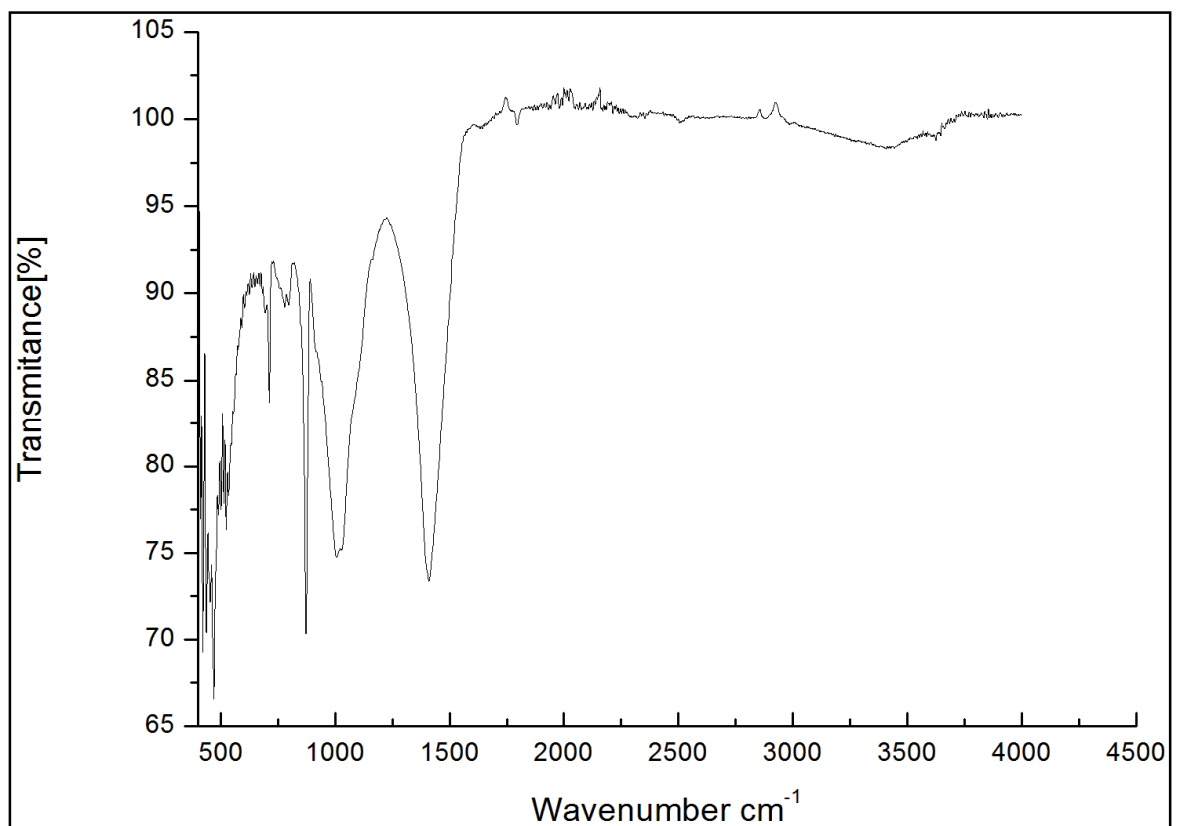


Figure IV-32: Spectres d'Infrarouge de la terre de R à 10% du ciment

IV.4.2.3. Observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB)

L'observation au M.E.B de l'échantillon de terre **R** (Figure IV.33) montre que la calcite et le quartz sont dominants.

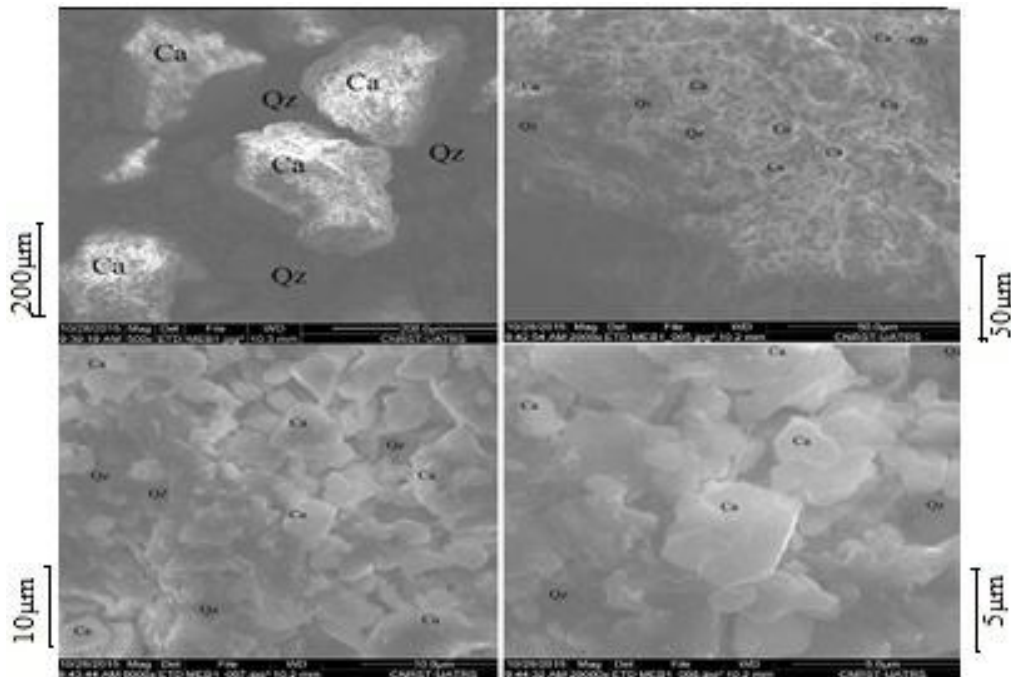


Figure IV-33: Images MEB prises sur la terre R (Qz: quartz, Ca: calcite)

IV.4.2.4. Analyse par la fluorescence X

L'analyse par la fluorescence X permet de mesurer le pourcentage des éléments chimiques contenus dans l'échantillon de la terre **R**. Le tableau IV.19 résume le taux des éléments chimiques:

Tableau IV-19: Composition chimique de la terre de Rabat (R)

Nom du Composé	Concentration %
CaO	35,2
P.a.f	! 28,6
SiO ₂	21,6
Al ₂ O ₃	7,77
Fe ₂ O ₃	3,43
MgO	0,86
Na ₂ O	0,574
K ₂ O	0,522
P ₂ O ₅	0,447

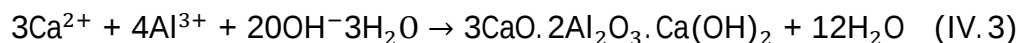
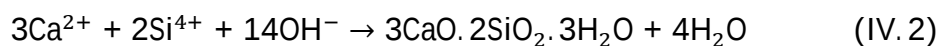
TiO ₂	0,354
SO ₃	0,204
ZrO ₂	0,132
MnO ₂	0,104
Cl	0,0692
SrO	0,0595
BaO	0,0368
I	0,0216
Nb ₂ O ₅	0,0213
Y ₂ O ₃	0,0152
Rb	0,011
Ac	0,0101
Somme	100

Le tableau IV.19 montre que le pourcentage de CaO est de 35,2%. Il est dû à la présence de la matrice du carbonate et d'une teneur en SiO₂ de 21,6%, qui est due à la concentration de quartz. De plus, les pertes en feu (P.a.f) sont liées à la présence de l'eau.

Le pourcentage de l'oxyde de potassium (0,522%) dans l'échantillon indique qu'il est probablement pauvre en illite [98]

La présence de la matière organique en grande quantité dans l'échantillon explique sa couleur plus foncée [72] et la forte teneur en oxyde de fer dans l'échantillon est responsable de la couleur jaune-brun [96].

La réaction de la silice (SiO₂) et de l'alumine (Al₂O₃) avec l'eau et la chaux éteinte [Ca(OH)₂] issue de la chaux vive ou du ciment au cours d'une réaction pouzzolanique, forme du silicate du calcium hydraté (CSH) et de l'aluminate du calcium hydraté (CAH) [88, 99]. Suivant les équations IV.2 et IV.3, ces deux composés, surtout en quantités importantes, améliorent la résistance mécanique [88, 100].



IV.4.3. Essai d'absorption par capillarité de la terre R

On présente ci-dessous les résultats de l'essai de l'absorption de l'eau qu'on a effectué sur des éprouvettes cylindriques du mortier associées aux différents dosages en ciment 0%, 4%, 7% et 10%.

Tableau IV-20: Résultats de l'essai d'absorption de la terre brute

Référence	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3
Surface ($S = \pi r^2$) cm^2	26,71	26,71	26,71
Masse d'éprouvette sec= (md) en g	433,92	439,23	444,93
Masse d'éprouvette humide après 10 minutes= (mh) en g	475,81	472,27	477,67
Masse d'eau absorbée= (mh-md) en g	41,89	33,04	32,72
Coefficient d'absorption d'eau par capillarité $C_b = 100 \cdot (mh-md) / S \sqrt{10}$	49,59	39,16	38,76
Moyenne $C_b = (C_{b1} + C_{b2} + C_{b3})/3$	42,50		

Tableau IV-21: Résultats de l'essai d'absorption de la terre à 4% de ciment

Référence	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3
Surface ($S = \pi r^2$) cm^2	26,71	26,71	26,71
Masse d'éprouvette sec= (md) en g	441,42	439,81	437,64
Masse d'éprouvette humide après 10 minutes= (mh) en g	465,00	476,36	474,04
Masse d'eau absorbée= (mh-md) en g	23,58	36,55	36,4
Coefficient d'absorption d'eau par capillarité $C_b = 100 \cdot (mh-md) / S \sqrt{10}$	27,92	43,27	43,09
Moyenne $C_b = (C_{b1} + C_{b2} + C_{b3})/3$	38,09		

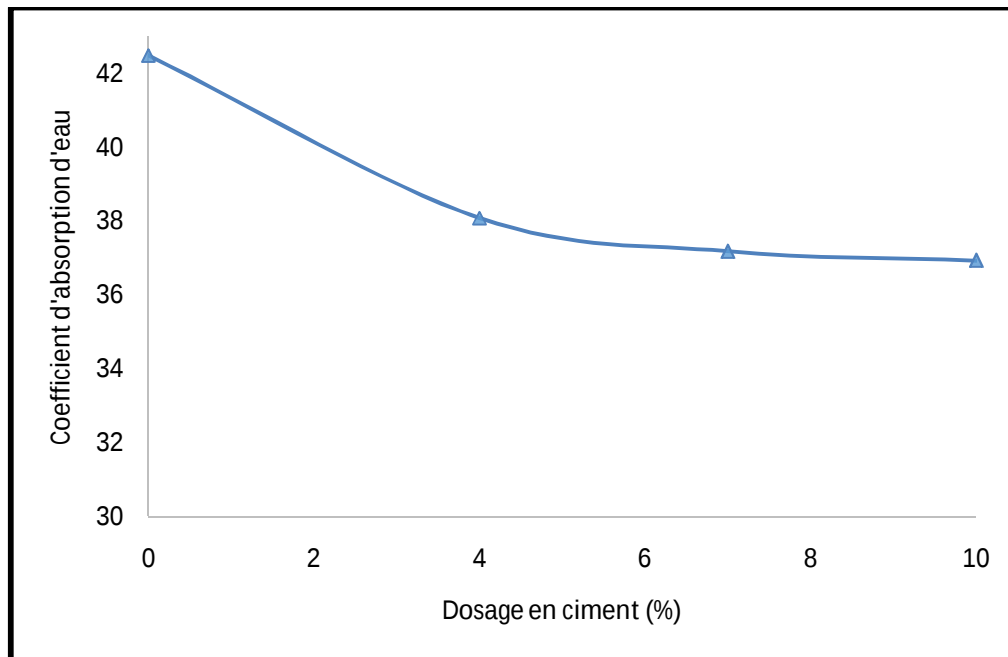
Tableau IV-22: résultats de l'essai d'absorption de la terre à 7% de ciment

Référence	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3
Surface ($S = \pi r^2$) cm^2	26,71	26,71	26,71
Masse d'éprouvette sec= (md) en g	435,71	439,03	440,40
Masse d'éprouvette humide après 10 minutes= (mh) en g	468,33	470,87	470,15
Masse d'eau absorbée= (mh-md) en g	32,62	31,84	29,75
Coefficient d'absorption d'eau par capillarité $C_b = 100 \cdot (mh-md) / S \sqrt{10}$	38,62	37,70	35,22
Moyenne $C_b = (C_{b1} + C_{b2} + C_{b3})/3$	37,18		

Tableau IV-23: résultats de l'essai d'absorption de la terre à 10% de ciment

Référence	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3
Surface ($S = \pi r^2$) cm^2	26,71	26,71	26,71
Masse d'éprouvette sec= (md) en g	442,02	427,14	436,35
Masse d'éprouvette humide après 10 minutes = (mh) en g	471,36	462,27	465,46
Masse d'eau absorbée= (mh-md) en g	29,34	35,13	29,11
Coefficient d'absorption d'eau par capillarité $C_b = 100 \cdot (mh-md) / S \sqrt{t}$	34,74	41,59	34,46
Moyenne $C_b = (C_{b1} + C_{b2} + C_{b3}) / 3$	36,93		

On représente ci-dessous la variation du coefficient d'absorption de l'eau C_b de la terre **R** en fonction du dosage en ciment.

**Figure IV-34: Coefficient d'absorption d'eau en fonction du dosage en ciment**

On remarque d'après cette figure que les éprouvettes non stabilisées par le ciment, absorbent beaucoup d'eau par rapport aux autres qui sont stabilisées. Cette différence d'absorption de l'eau est remarquée lors de la réalisation de l'essai, pour les éprouvettes non stabilisées, L'eau fait perdre une partie de celles-ci comme dans l'essai effectué sur les éprouvettes non stabilisées de la terre **R**.

En comparasion avec la terre F, on remarque qu'à l'état brut, la terre F absorbe plus d'eau que la terre R car l'argile de F est plus active que R même si cette dernière contient plus d'argile. Toutefois, l'ajout de ciment contribue à compenser l'effet actif de la terre. En effet, la terre F stabilisée est moins sensible à l'eau qu'elle n'est la terre R stabilisée, dû au fait que l'ajout de ciment stabilise très rapidement la terre F qui contient moins d'argile que la terre R.

IV.4.4. Résultats expérimentaux des essais mécaniques

IV.4.4.1. Terre brute à l'état sec (0% de ciment)

Les éprouvettes testées associées au dosage de 0% de ciment à l'état sec, ont respectivement pour hauteurs : $h=96,42$; $94,32$ et $91,16$ mm.

Les caractéristiques mécaniques obtenues sont répertoriées au tableau ci-dessous. Sur trois essais, seuls deux ont été validés.

Tableau IV-24: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 0%

<i>Référence</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	0,092	7,006	0,041
<i>Eprouvette 2</i>	0,092	8,148	0,063
<i>Eprouvette 3</i>	*	*	*
<i>Moyenne</i>	0,092	7,577	0,052
<i>Ecart type</i>	0,000	0,807	0,015

* essai non validé

IV.4.4.2. Terre brute à l'état humide (0% de ciment)

Les éprouvettes testées associées au dosage de 0% de ciment ont respectivement pour hauteurs : $h = 96,78$; $95,28$ et $94,40$ mm.

Sur le tableau IV.25, on donne les résultats expérimentaux pour la résistance en compression R_c , le module d'Young E et la déformation limite ϵ_{lim} .

Tableau IV-25: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 0% à l'état humide

<i>Référence</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	0,178	3,371	0,053
<i>Eprouvette 2</i>	0,019	3,019	0,073
<i>Eprouvette 3</i>	0,075	3,329	0,136
<i>Moyenne</i>	0,090	3,240	0,087
<i>Ecart type</i>	0,081	0,192	0,043

IV.4.4.3. 4% de ciment à l'état sec

Les éprouvettes testées associées au dosage de 4% de ciment à l'état sec ont respectivement pour hauteurs : $h = 98,30$; $100,36$ et $99,46$ mm.

Nous reportons au tableau IV.26, les trois paramètres issus de l'expérimentation. Sur les trois essais, seuls deux ont été validés.

Tableau IV-26: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 4%

<i>Référence</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	0,133	9,907	0,027
<i>Eprouvette 2</i>	*	*	*
<i>Eprouvette 3</i>	0,099	7,854	0,031
<i>Moyenne</i>	0,116	8,880	0,029
<i>Ecart type</i>	0,024	1,452	0,003

IV.4.4.4. 4% de ciment à l'état humide

Les éprouvettes testées associées au dosage de 4% de ciment à l'état humide ont respectivement pour hauteurs : h = 99,68 ; 99, 01 et 101,38 mm.

Les caractéristiques mécaniques obtenues sont répertoriées au tableau ci-dessous.

Tableau IV-27: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 4%

<i>Référence</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	0,034	*	0,041
<i>Eprouvette 2</i>	0,114	5,888	0,023
<i>Eprouvette 3</i>	0,124	5,700	0,066
<i>Moyenne</i>	0,091	5,794	0,043
<i>Ecart type</i>	0,049	0,133	0,021

IV.4.4.5. 7% de ciment à l'état sec

Les éprouvettes testées associées au dosage de 7% de ciment à l'état sec ont respectivement pour hauteurs : h = 101,78; 99,30 et 100,00 mm.

Au tableau IV.28, nous donnons les valeurs des grandeurs obtenues expérimentalement.

Tableau IV-28: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 7%

<i>Référence</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	0,171	10,842	0,024
<i>Eprouvette 2</i>	0,179	12,282	0,018
<i>Eprouvette 3</i>	0,174	13,959	0,031
<i>Moyenne</i>	0,175	12,361	0,024
<i>Ecart type</i>	0,004	1,560	0,006

IV.4.4.6. 7% de ciment à l'état humide

Les éprouvettes testées associées au dosage de 7% de ciment à l'état humide ont respectivement pour hauteurs : h = 99,32; 100,54 et 101,38 mm.

La résistance en compression, le module d'Young et la déformation limite, obtenues expérimentalement sont reportés au tableau IV.29.

Tableau IV-29: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 7%

<i>Référence</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	0,159	9,336	0,050
<i>Eprouvette 2</i>	0,191	9,943	0,030
<i>Eprouvette 3</i>	0,146	9,409	0,042
<i>Moyenne</i>	0,165	9,563	0,041
<i>Ecart type</i>	0,023	0,331	0,010

IV.4.4.7. 10% de ciment à l'état sec

Les éprouvettes testées associées au dosage de 10% de ciment à l'état sec ont respectivement pour hauteurs : h = 100,28 ; 100,18 et 100,30 mm.

Au tableau IV.30, nous donnons les valeurs des grandeurs obtenues expérimentalement.

Tableau IV-30: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 10%

<i>Référence</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	0,331	17,974	0,016
<i>Eprouvette 2</i>	0,165	18,112	0,026
<i>Eprouvette 3</i>	0,445	21,222	0,012
<i>Moyenne</i>	0,314	19,103	0,018
<i>Ecart type</i>	0,141	1,837	0,007

IV.4.4.8. 10% de ciment à l'état humide

Les éprouvettes testées associées au dosage de 10% de ciment à l'état humide ont respectivement pour hauteurs : $h = 101,78; 99,08$ et $100,86$ mm.

La résistance en compression, le module d'Young et la déformation limite obtenus sont donnés au tableau IV.31.

Tableau IV-31: Résultats expérimentaux du mortier R associés au dosage de 10%

<i>Références</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
<i>Eprouvette 1</i>	0,200	14,432	0,058
<i>Eprouvette 2</i>	0,176	18,312	0,042
<i>Eprouvette 3</i>	0,209	16,319	0,018
<i>Moyenne</i>	0,195	16,354	0,039
<i>Ecart type</i>	0,017	1,940	0,020

Une comparaison des valeurs moyennes des différents dosages en ciment associés à la terre de **R** à l'état **sec** est donnée dans tableau suivant.

Tableau IV-32: Résultats expérimentaux du mortier R Sec associés aux différents dosages

<i>Dosage</i>	<i>E (MP)</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
<i>0%</i>	7,577	0,092	0,052
<i>4%</i>	8,880	0,116	0,021
<i>7%</i>	12,361	0,175	0,024
<i>10%</i>	19,103	0,314	0,018

D'après ce tableau, on note une augmentation de la résistance en compression et du module d'Young en fonction du dosage en ciment. On constate aussi que la déformation limite décroît lorsque le dosage en ciment croît.

Une comparaison des valeurs moyennes de différents dosages associés à la terre **R** humide est donnée au tableau suivant :

Tableau IV-33: Résultats expérimentaux du mortier R humide associés aux différents dosages

<i>Dosage</i>	<i>E (MPa)</i>	<i>R_c (MPa)</i>	<i>ε_{lim} (%)</i>
<i>0%</i>	3,240	0,09	0,087
<i>4%</i>	5,794	0,091	0,043
<i>7%</i>	9,563	0,165	0,041
<i>10%</i>	16,354	0,195	0,039

D'après cette comparaison, on note une augmentation de la résistance en compression et du module d'Young en fonction du dosage en ciment. On constate aussi que la déformation limite décroît lorsque le dosage en ciment croît.

Les figures IV.35, IV.36 et IV.37, nous présentons l'évolution de la résistance, le module d'Young et de la déformation limite du mortier d'éprouvettes de mortier de la terre **R** dans les deux cas sec et humide en fonction aux dosages en ciment.

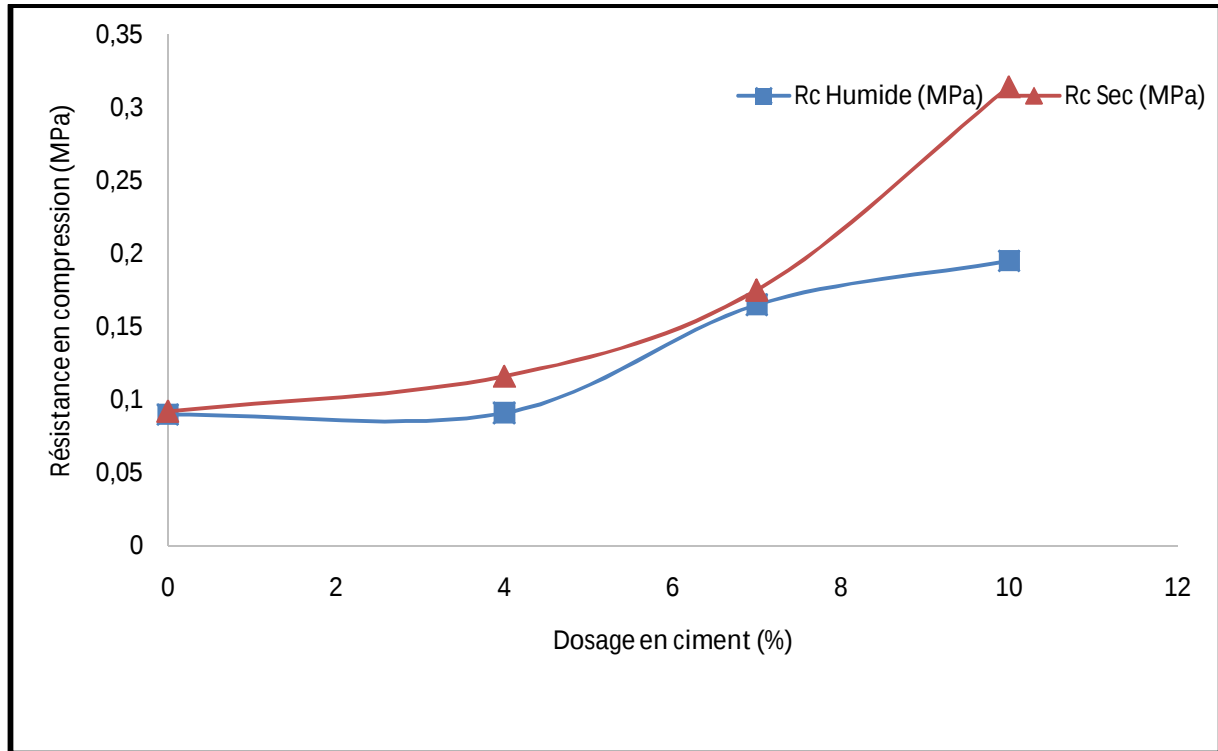


Figure IV-35: Résistance en compression du mortier R humide et sec en fonction du dosage

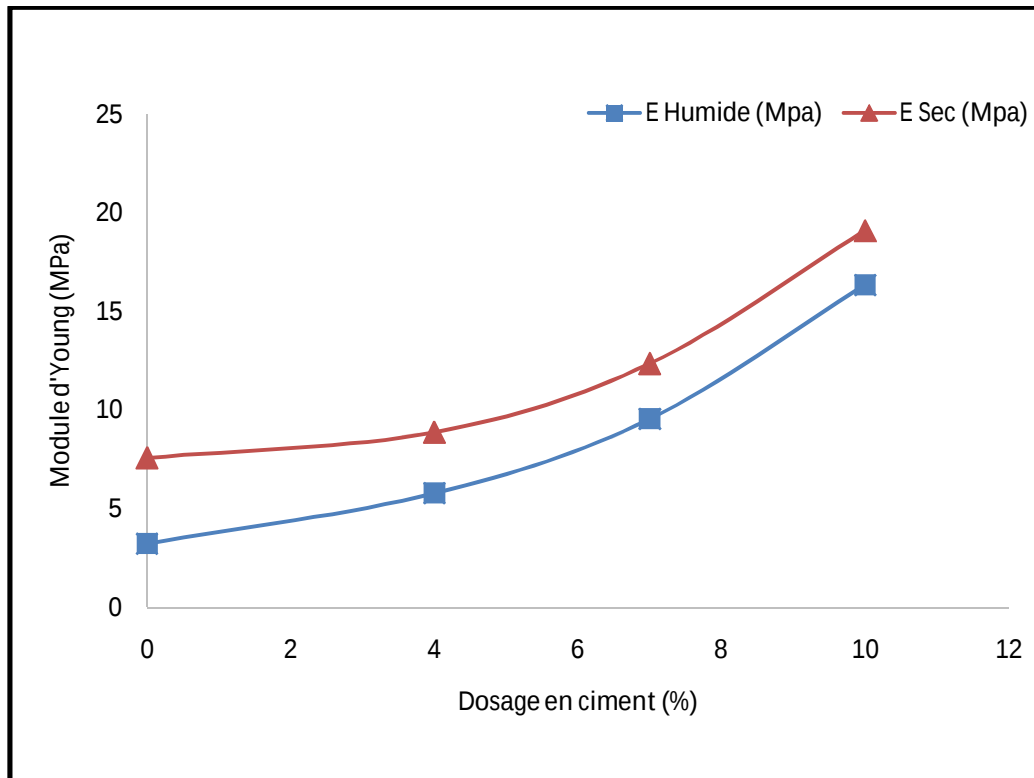


Figure IV-36: Module d'Young du mortier R humide et sec en fonction du dosage

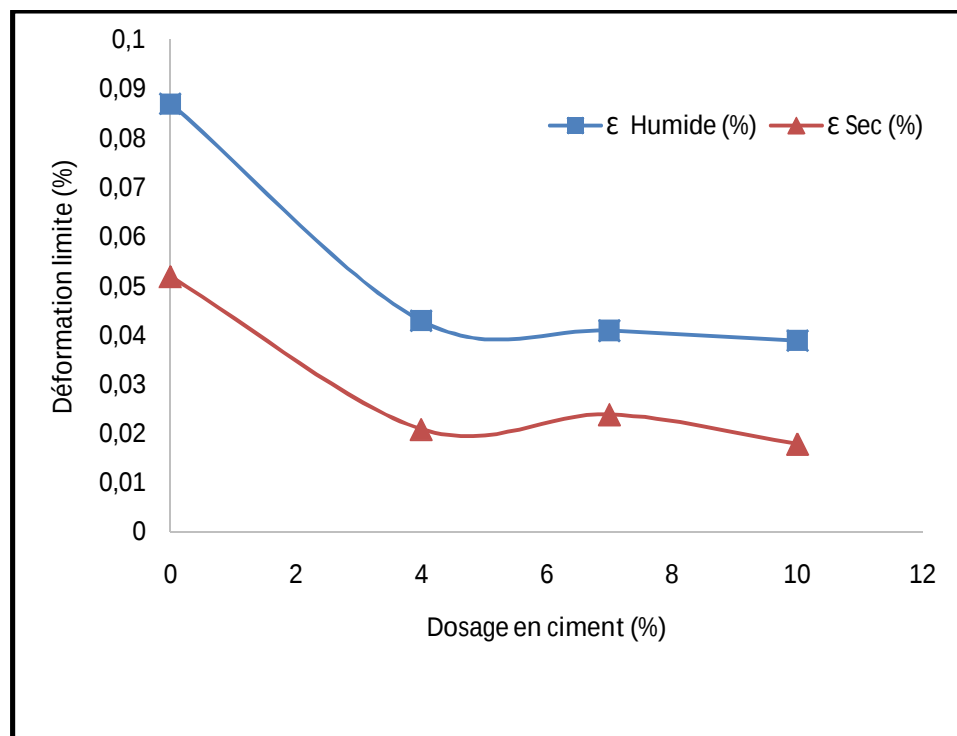


Figure IV-37: Déformation limite du mortier R humide et sec en fonction du dosage

IV.5. Interprétations et comparaison des résultats expérimentaux de mortier de deux terres F et R

IV.5.1. Résultats expérimentaux de la durabilité du mortier

On représente ci-dessous la variation du coefficient d'absorption de l'eau de la terre de **F** et **R** en fonction du dosage en ciment

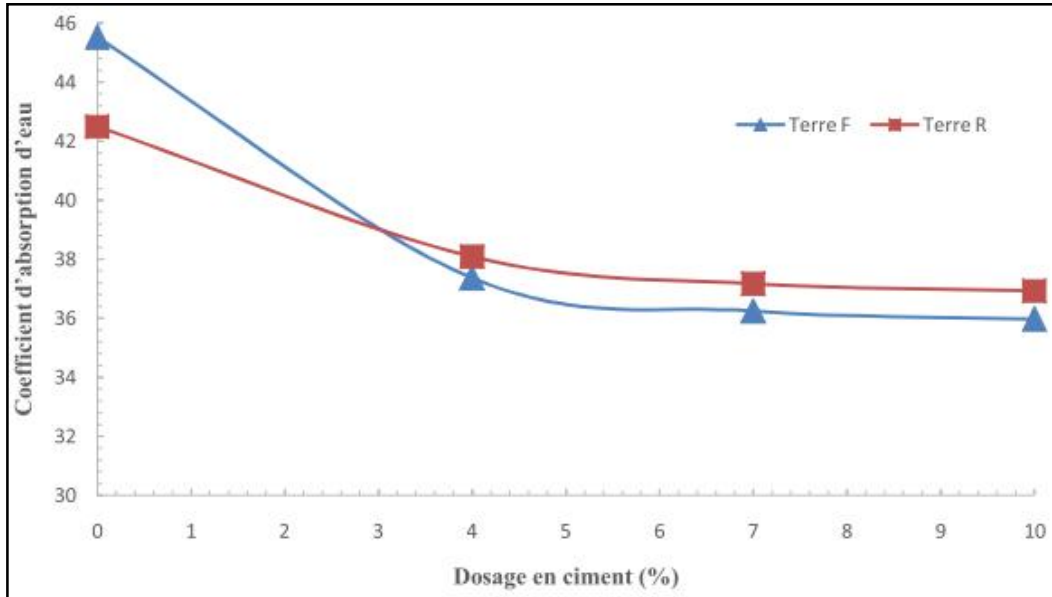


Figure IV-38: Coefficient d'absorption d'eau en fonction du dosage en ciment pour F et R

D'après la figure. IV.38, les éprouvettes non stabilisées par le ciment absorbent une quantité très grande de l'eau par rapport aux autres qui sont stabilisées pour les deux terres **F** et **R**. Pour les éprouvettes non stabilisées, l'eau fait perdre une partie de celles-ci, dans les deux cas : Figure. V.39.

La figure VI.38 montre que le coefficient d'absorption d'eau des terres **F** et **R** diminuent en fonction de l'augmentation des taux de dosage du ciment de 0% à 10%.

En effet, pour 0% la valeur d'absorption d'eau de la terre **F** est égale $45,53 \text{ (g/(m}^2 \cdot \text{S}^{0,5}))$ et la terre **R** est égale $42,50 \text{ (g/(m}^2 \cdot \text{S}^{0,5}))$.

Or, les résultats d'analyses des fractions granulaires des deux terres illustrent que, la terre **F** contient 11,11% d'argile et la terre **R** est égale 20,49%.

Dans la littérature [60,61], quand le taux d'argile est important dans la composition granulaire de la terre, cette dernière absorbe une grande quantité d'eau. Par contre, dans notre étude, nous avons trouvés l'inverse de ses résultats pour 0% du ciment des éprouvettes du mortier de la terre **F**.

L'analyse par la fluorescence qui donne le pourcentage des éléments chimiques dans les constituants de l'argile montre que :

- L'argile de la terre **F** contient 31,8% de chaux vive, 22,3% de quartz et 2,13% de l'oxyde de Magnésium ;

- La terre **R** contient 35,2% de chaux vive (CaO), 22,6% de quartz (SiO₂) et 0,86% de l'oxyde de Magnésium (MgO).

L'oxyde de Calcium et l'oxyde de Magnésium réagissent avec l'eau par les réactions chimiques suivantes :



Or, la valeur de l'oxyde de Magnésium dans l'argile de la terre **F** est égale 2,5 fois de la valeur de la terre **R**. Par conséquent, à 0% de ciment, le coefficient d'absorption d'eau de la terre **F** est plus grand que la terre **R**.

Pour un dosage de 4% à 10% de ciment, les valeurs de coefficient d'absorption d'eau diminuent de 38,09 (g/(m².S^{0.5})) à 36,93 (g/(m².S^{0.5})) de la terre **R** et la terre **F** de 37,37 à 35,98 (g/(m².S^{0.5})) progressivement.

D'après les résultats obtenus par [19, 94,101] on peut noter que l'ajout de ciment dans la terre améliore la structure des micropores du sol par la formation de gel de ciment à la surface des agglomérats d'argiles qui impacte la pénétration d'eau dans l'éprouvettes du mortier. En effet, le taux du coefficient d'absorption d'eau diminue avec le ciment.



Figure IV-39: A gauche éprouvette non stabilisée, A droite éprouvette stabilisée

IV.5.2. Interprétations des résultats expérimentaux des essais mécaniques

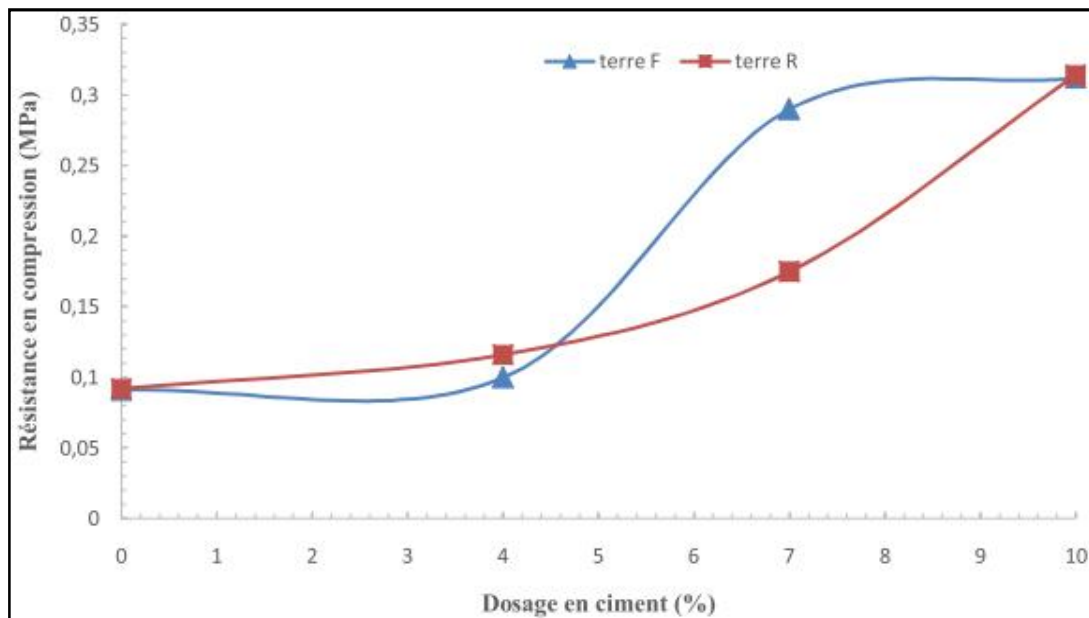
Les tableaux IV.34 et IV.35 suivants regroupent les résultats expérimentaux moyens de la résistance en compression R_c , le module d'Young E et la déformation limite ϵ_{lim} , associés aux dosages de 0%, 4%, 7% et 10% en poids de ciment à l'état sec et à l'état humide des éprouvettes cylindrique de mortier de terre **F** et **R**.

Tableau IV-34: Résultats expérimentaux des propriétés mécaniques en fonction du dosage au ciment à l'état sec

	Terre F		Terre R	
Dosage	R_c (MPa)	ϵ_{lim} (%)	R_c (MPa)	ϵ_{lim} (%)
0%	0,091	0,0686	0,092	0,052
4%	0,100	0,0611	0,116	0,044
7%	0,290	0,0237	0,175	0,024
10%	0,312	0,0192	0,314	0,018

Tableau IV-35: Résultats expérimentaux des propriétés mécaniques en fonction du dosage au ciment à l'état humide

	Terre F		Terre R	
Dosage	R_c (MPa)	ϵ_{lim} (%)	R_c (MPa)	ϵ_{lim} (%)
0%	0,049	0.1633	0,09	0,087
4%	0,057	0,1217	0,091	0,043
7%	0,143	0,0491	0,165	0,041
10%	0,158	0,0440	0,195	0,039

**Figure IV-40: Résistance en compression du mortier F et R à l'état sec en fonction du dosage du ciment**

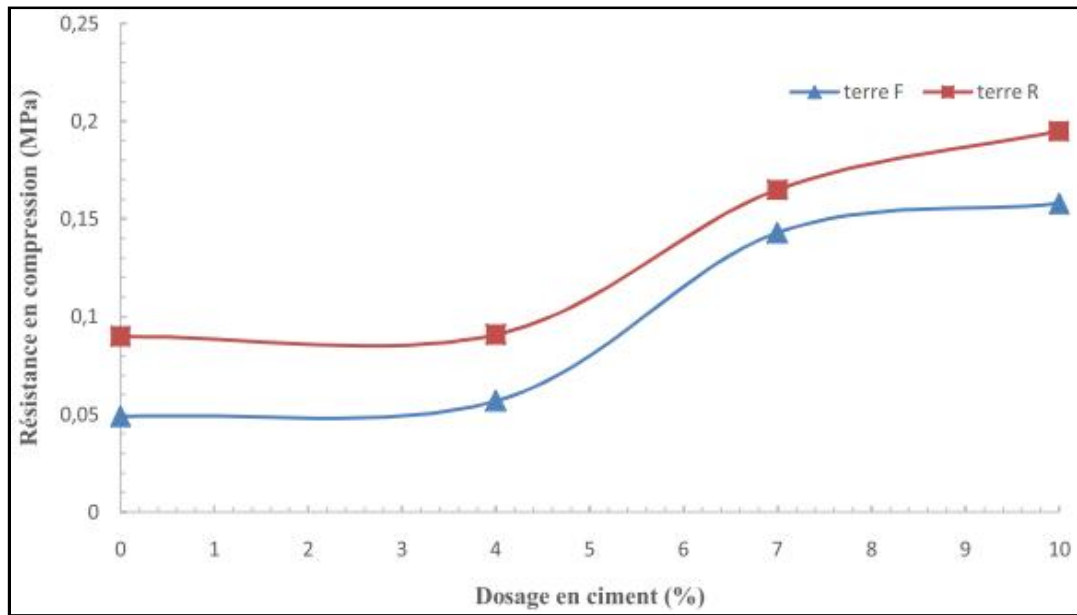


Figure IV-41: Résistance en compression du mortier F et R à l'état humide en fonction du dosage du ciment

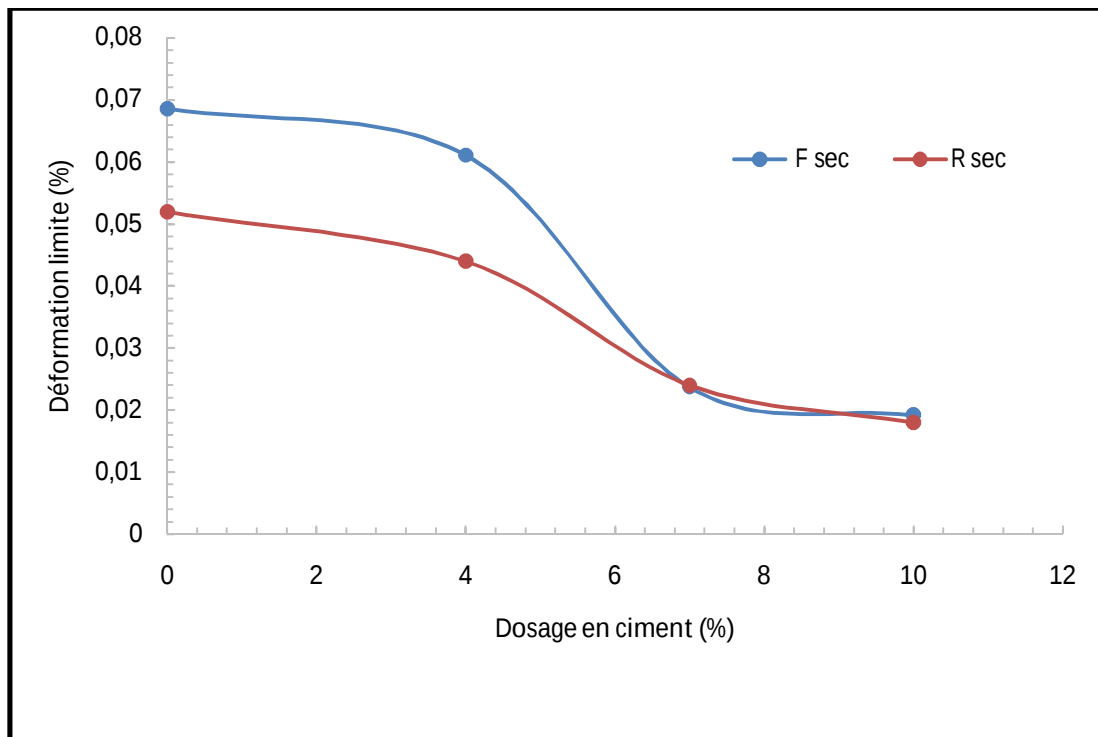


Figure IV-42: Déformation limite du mortier F et R à l'état sec en fonction du dosage du ciment

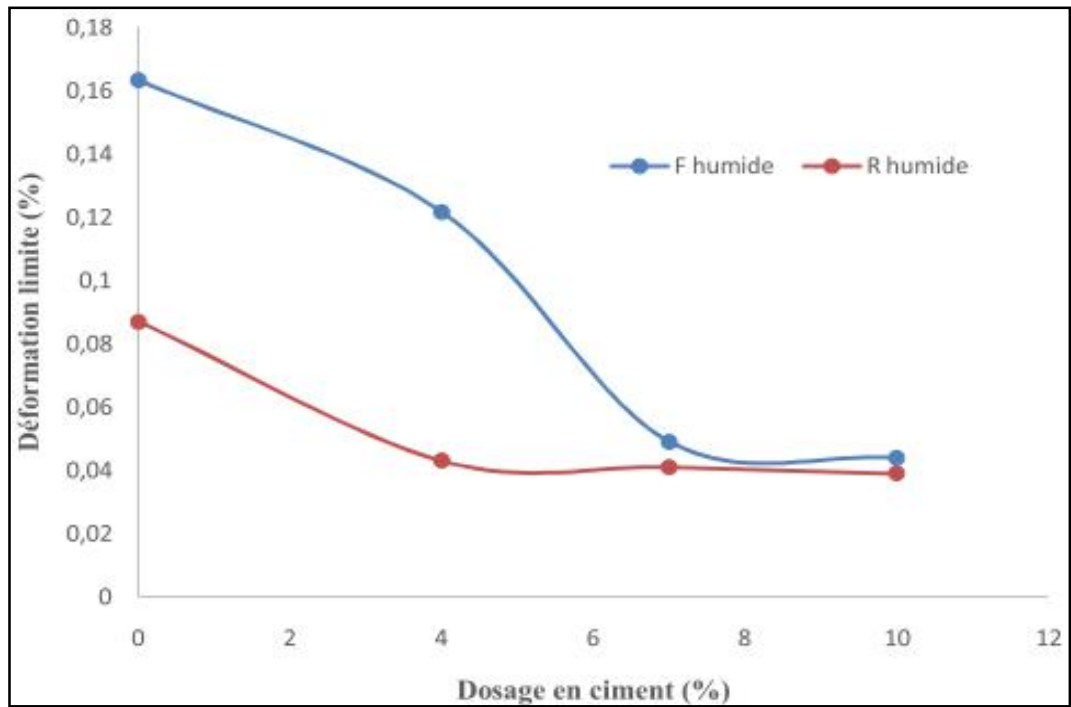


Figure IV-43: Déformation limites du mortier F et R à l'état humide en fonction du dosage du ciment

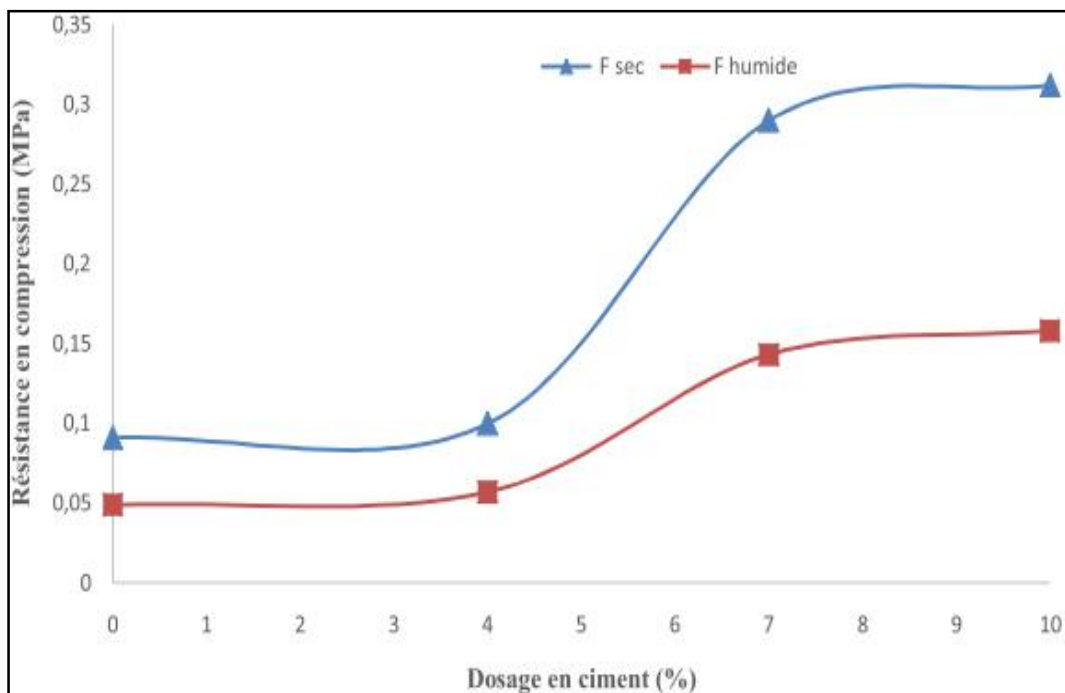


Figure IV-44: Résistance en compression du mortier F dans les deux cas en fonction du dosage du ciment

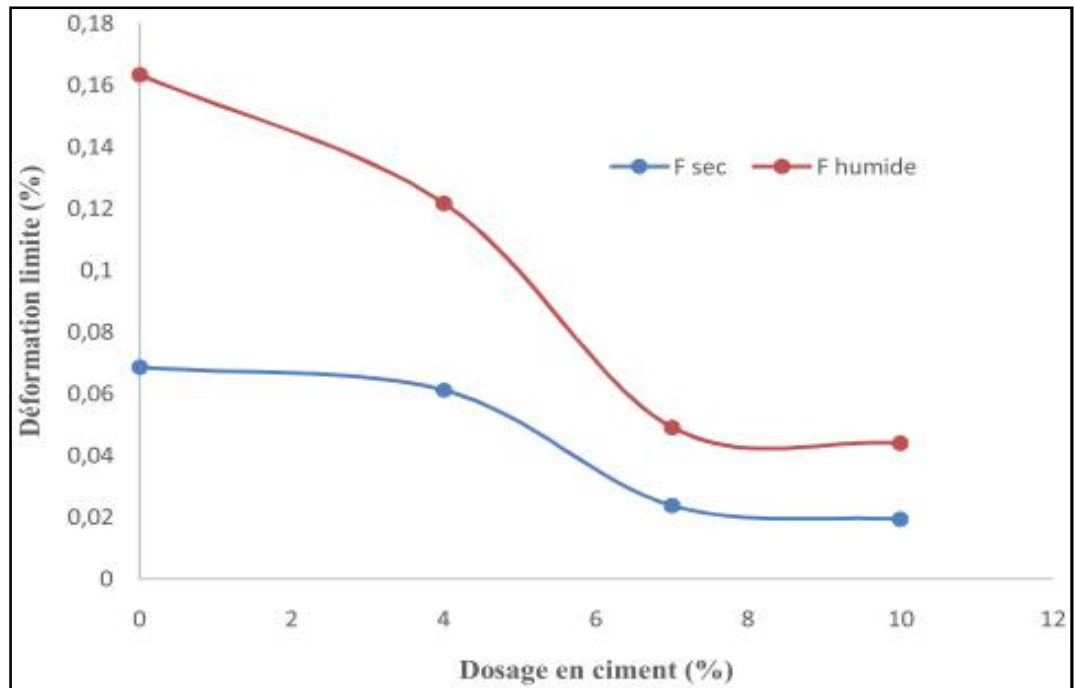


Figure IV-45: Déformation limite du mortier F dans les deux cas en fonction du dosage du ciment

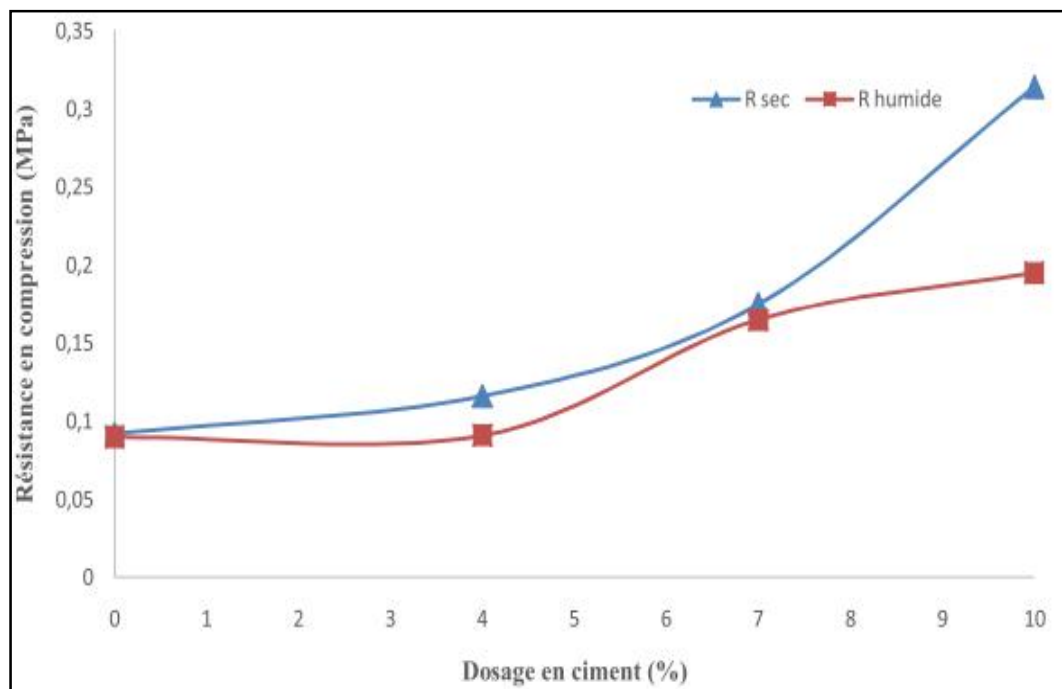


Figure IV-46: Résistance en compression du mortier R dans les deux cas en fonction du dosage du ciment

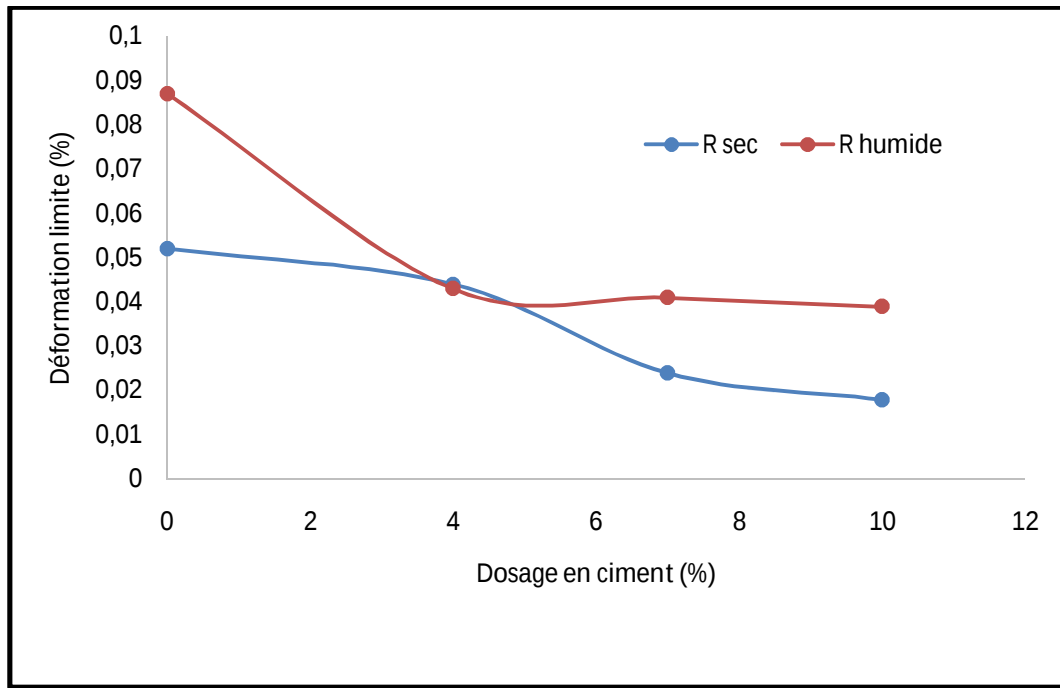


Figure IV-47: Déformation limite du mortier R dans les deux cas en fonction du dosage du ciment

D'après les figures (IV, 40- 47), on remarque que la résistance à la compression du mortier (sec ou humide) des deux terres **F** et **R** augmente en fonction du taux de dosage en allant de 0%, 4%, 7%, et à 10% en poids de ciment, alors que la déformation limite varie dans le sens inverse. Cette augmentation de la résistance à la compression diffère d'une terre à l'autre. La résistance à la compression pour le mortier **F** (humide et sec) affiche une variation significative à 7% de ciment ($R_s = 0,29$ MPa et $R_h = 0,143$ MPa). Par contre, le mortier de la terre **R** révèle une amélioration de la résistance à la compression (humide et sec) à 10% au poids de ciment ($R_s = 0,314$ MPa, $R_h = 0,195$ MPa).

D'après la fraction granulaire, la terre sableuse **F** contient 11,11% de l'argile et celle de la terre sableuse- argileuse **R** est égale 20,49%. Or, les résultats de l'analyse minéralogique par la diffraction du Rayon X des terres **F** et **R** illustrent que, ces deux types de mortier se composent principalement de la calcite (CaCO_3), du quartz (SiO_2) et du silico-alumineux (kaolinite).

Dans la littérature [39, 70], le quartz n'est pas un liant, il se constitue d'une partie de la fraction du sable fin. Bouassria et al., [43] ont conclu que la calcite est le produit de la carbonation de la chaux éteinte Ca(OH)_2 par absorption du dioxyde de carbone (CO_2) de l'air. Cette réaction est possible en présence de l'eau et se présente par :



Ammari et al [82], Bouassria et al [43], ont démontré que, le silico-alumineux a une propriété d'être un liant par la réaction chimique avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) en présence de l'eau à température ambiante.

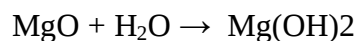
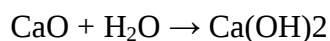
La diffraction du rayons X (figure IV.3) de la terre **F** associée au dosage de 7% de ciment montre l'absence de pics du silico-alumineux (Kaolinite) ce qui signifie que ce dernier réagit totalement avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 pour former des composés possédant des propriétés liantes et améliorer la résistance à la compression (sec et humide) du mortier de la terre **F**.

Pour les terres, contenant beaucoup d'argile telle que la terre **R**, Bouabid [104] et al, H. Houben et al [21], ont conclu qu'une terre comportant plus de 20% de l'argile à besoin plus de ciment pour la stabiliser. Cependant, les spectres des Rayons X du mortier **R** (figure IV.28) à 10% de ciment présentent des pics de la calcite (CaCO_3) ; des pics du quartz (SiO_2) et des faibles pics de silico-alumineux (kaolinite). En effet ce dernier montre qu'une grande partie de silico-alumineux est absorbée par la réaction avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 . Ainsi, l'augmentation de la résistance à la compression du mortier de la terre **R** à 10% en poids de ciment revient à l'effet des réactions de l'hydroxyde de calcium, qui se trouve dans le ciment et dans les minéraux argileux, avec le silico-alumineux (kaolinite) pour produire les liens entre la partie de l'argile lui-même et du ciment avec la matrice du sol inerte.

CONCLUSION

D'après les résultats de l'essai de la remontée capillaire présentée dans ce chapitre, nous pouvons conclure que :

- ✓ À 0% d'ajout de ciment (matériau brut) aux deux terres **F** et **R**, le coefficient d'absorption d'eau pour la terre **F** est supérieur à la terre **R** même si cette dernière contient plus d'argiles. En effet, c'est normalement la fraction argileuse qui est responsable de l'absorption de l'eau. Toutefois, la minéralogie intervient au même titre que la granulométrie, car la présence de pourcentages élevés (dominants) d'hydroxyde de calcium et d'oxyde de Magnésium, augmentent l'absorption d'eau par les réactions suivantes :



De plus, l'argile de la terre **F** est nettement plus active ($C_a = 1,28$) que celle de la terre **R** ($C_a = 0,39$).

- ✓ Le coefficient d'absorption d'eau diminue avec l'augmentation du taux en ciment et cette diminution diffère en fonction à la fois de la granulométrie et de la minéralogie. En effet, l'ajout de ciment agit non seulement macroscopiquement selon les fractions granulométriques, mais son effet dépend grandement de la composition minéralogique surtout de l'argile. Bien que la terre **F** ait un coefficient d'absorption supérieur à la terre **R**, à l'état brut (0% de ciment), en y ajoutant plus de ciment, la situation s'inverse. C'est la terre **F** qui a le coefficient d'absorption inférieur à celui de **R**.
- ✓ L'ajout de ciment au mortier pour les deux terres de **R** et **F** montre l'augmentation du pourcentage de la calcite et la présence silico-alumineux avec une très faible quantité.

Ce dernier n'agit pas comme un liant sans réagir chimiquement avec l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2) et l'eau. Ce qui produit une amplification de la résistance dans l'état sec et humide de 4% à 10% en poids de ciment et inversement pour la déformation limite.

- ✓ Les résultats de l'analyse par la diffraction des rayons X montrent que, à certains dosages du ciment on remarque l'absence de pics du silico-alumineux (kaolinite) ce qui signifie que ce dernier réagit totalement avec l'hydroxyde de calcium Ca(OH)_2 , par conséquent une amélioration de la résistance à la compression du mortier de la terre (sec et humide).

En somme, le comportement mécanique du mortier de terre est fortement influencé par le dosage en ciment employé, la minéralogie et la chimie de la terre, qui interagissent fortement entre eux.

V. Conclusion générale

La terre crue est le matériau utilisé dans la construction depuis les temps les plus reculés, comme en témoigne l'habitat traditionnel en de nombreux points de la planète. En partie abandonnée et oubliée avec l'avènement d'autres matériaux de construction, en particulier le béton et l'acier, la terre fait aujourd'hui l'objet d'un regain d'intérêt dans les pays en développement comme dans les pays développés.

A travers le patrimoine mondial de construction en terre, on dénombre plusieurs techniques d'utilisation de terre pour la construction : le pisé, l'adobe, le torchis, la terre paille, la bauge, la terre façonnée, la terre extrudée, la terre comprimée.....etc. Par rapport à l'histoire de la construction en terre, la technique du bloc de terre comprimée (BTC) est une technique plutôt récente, qui est une évolution moderne du bloc de terre moulée, plus communément dénommé bloc d'adobe. Comparé à l'adobe ou le pisé, le BTC est très régulier en formes et en dimensions, plus dense et présente une meilleure résistance à la compression et à l'eau.

Les productions artisanales de briques d'adobe stabilisées à la paille sont très variées mais on connaît aussi l'emploi de fibres pour construire en torchis, en terre paille, en bauge ainsi qu'en blocs comprimés et en pisé. Nous nous intéresserons dans cette thèse à la compréhension et à l'amélioration des propriétés physico-chimiques et minéralogiques de matériaux terre pour de meilleurs résistance et durabilité (contre la remontée capillaire de BTC et du mortier).

Pour améliorer l'insensibilité du BTC à l'eau, on a fait appel conventionnellement aux liants, à savoir le ciment et la chaux.

A titre de comparaison nous avons utilisé les blocs de terre comprimée pour deux terres ainsi que les briques d'adobe. L'objectif étant l'étude de la sensibilité à l'eau du mortier, en examinant son absorption totale et son comportement mécanique, après une immersion dans l'eau. Pour atteindre cet objectif nous avons d'abord déterminé la teneur en eau optimum avec la presse à bloc directement, contrairement à la démarche classique qui suggère un teneur en ciment entre 4 et 10% en spécifiant que le ciment est efficace avec les graviers et les sables plutôt qu'avec des limons et des argiles.

Or, les résultats n'ont de portée générale que s'ils sont obtenus de plusieurs terres et plusieurs sites : la terre prélevée de la ville de Fès, terre de Rabat, terre de Nadiapou (Burkina Faso) et terre de Tizi-Ouzou (Algérie).

Les résultats concluent que :

- L'analyse minéralogie des terres se combine mutuellement avec la texture granulaire pour influencer des blocs de terre comprimée et les briques d'adobes ;
- L'augmentation non linéaire de la résistance à la compression en fonction du taux de ciment est due à la fois à la texture granulaire et aux compositions minéralogiques de chaque type de terre. Après l'interaction avec la matrice de l'argile et une fois stabilisée ou neutralisée par ses constituants minéralogiques et chimiques propres, l'ajout du ciment amplifie les liens entre le squelette sableux-graveleux.

- La résistance à la compression des blocs de terre comprimée et d'adobes augmente fortement en fonction du ciment quand l'argile est dominée par la calcite et que la structure granulaire n'est pas très dominée par les sables et les graviers.
- L'accroissement important des performances pour un faible dosage en ciment résulte de la cimentation de l'argile par la calcite et le pourcentage de SiO_2 accélère les réactions d'hydratation du ciment.

A l'aide de la diffraction des rayons X, l'Infrarouge, le microscope électronique à balayage et la fluorescence X, les effets de la minéralogie et la chimie des terres étudiées sur leur durabilité sont examinés. Les résultats des essais de compression uni-axiale exercés sur des éprouvettes cylindriques sont présentés dans deux cas sec et humide, et ces deux terres associés aux différents pourcentages 0%, 4%, 7% et 10% en poids de ciment. Le coefficient d'absorption de l'eau du mortier pour les différents dosages en ciment est étudié afin d'optimiser la durabilité du mortier face aux intempéries, à la pluie et/ou à des climats très humides. Il ressort de ces résultats :

- À 0% d'ajout de ciment (matériau brut), une forte présence d'argile ne signifie pas un coefficient d'absorption d'eau élevé. Même si normalement la fraction argileuse est responsable de l'absorption de l'eau, la minéralogie intervient au même titre que la granulométrie, car la présence de pourcentages élevés (dominants) d'hydroxyde de calcium et d'oxyde de Magnésium, augmentent l'absorption d'eau ;
- La diminution du coefficient d'absorption d'eau avec l'augmentation du taux en ciment n'est pas linéaire. Elle diffère en fonction à la fois de la granulométrie et de la minéralogie. En effet, l'ajout de ciment agit non seulement macroscopiquement selon les fractions granulométriques, mais son effet dépend grandement de la composition minéralogique surtout de l'argile. Bien qu'une terre ait un coefficient d'absorption élevé, à l'état brut (0% de ciment), en y ajoutant plus de ciment, la situation peut s'inverser. Les deux phénomènes granulométrique et minéralogie sont en concurrence ;
- L'ajout de ciment au mortier n'induit d'augmentation conséquente de la durabilité qu'au delà d'un certain pourcentage de la calcite ;
- Le silico-alumineux n'est pas un liant sans la réaction chimique préalable avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) et l'eau. Ce qui produit une amplification de la résistance dans l'état sec et humide de 4% à 10% en poids de ciment et inversement pour la déformation limite ;
- A certains dosages du ciment, l'absence de pics du silico-alumineux (kaolinite) suggère que ce dernier réagit totalement avec l'hydroxyde de calcium, et par conséquent une amélioration de la résistance du mortier de la terre (sec et humide).

Références

- [1] T. Abdelghanni, Règles parasismiques pour la construction en terre : RPCT 2011 Marocain et Benchmark, Université Ibno Tofail, 2016.
- [2] N. EL YAKOUBI, Potentialités d'utilisation des argiles marocaines dans l'industrie céramique : cas des gisements de Jbel Kharrou et de Benhmed (Meseta marocaine occidentale), Université Mohamed V, Rabat, 2006.
- [3] J. GAOMBALET, Modélisation du gonflement des argiles et ses effets sur les ouvrages souterrains de stockage, Ecole Polytechnique X, Français, 2004.
- [4] Q.T. PHAM, Souterrains, Effets de la désaturation et de la resaturation sur l'argilite dans les ouvrages, Ecole Polytechnique X, 2006.
- [5] E. PRUD'HOMME, Rôles du cation alcalin et des renforts minéraux et végétaux sur les mécanismes de formation de géopolymères poreux ou denses, Université de Limoges, Faculté des Sciences et Techniques, 2011.
- [6] G.H. Houben.h., Traité de construction en terre', CRATerre-EAG, Parenthèse, 2006.
- [7] M. Z, Construction en Terre: Etat de la Connaissance et Essais de Normalisation, TFE, Facultés Polytechnique de Mons, Belgique, 1996.
- [8] M.B.-O. M. Ghomari., science des matériaux de construction travaux pratique, , université ABOUBEKR Belkaid faculté des sciences, 2007.
- [9] S. Gutierrez, granulométrie laser. Professionnel en caractérisation des matériaux LCG/CCM/IMSI/UdeS, Cour en linge, n.d.
- [10] NF P94 005, "Analyse Granulométrique des Sols, Méthode par Tamisage," n.d.
- [11] Blocs de Terre Comprimée, Procédure d'Essais, Série Technologique N°16, 'Granulométrie: Tamisage par Voie Humide, CRATerre-EAG, CDE, ENTPE, 2000.
- [12] NF P94 005, Analyse Granulométrique des Sols, Méthode de Sédimentométrie', n.d.
- [13] NF P94 057, Analyse granulométrique des sols, méthode par sédimentation, n.d.
- [14] N.P. 068, Mesure de la quantité et de l'activité de la fraction argileuse, essai à la tache, n.d.
- [15] Association Françaises de Normalisation, blocs de terre comprimée pour murs et cloison, paris: AFNOR, 2001.
- [16] CRATERRE, Traité de construction en terre, Tomes I et II, Ed. Parenthèses, Marseille, 1989.
- [17] NF P94 051, Détermination des limites d'Atterberg.
- [18] L. Guerin, Construction à faible cout, Première édition, 1985.
- [19] K. BOUASSRIA, Evaluation de la ductilité – fragilité des matériaux hétérogènes: Application au matériau de terre comprimée stabilisée au ciment, Université Ibno Tofail, 2016.
- [20] CRATerre-EAG, CDE, ENTPE, Blocs de terre comprimée, procédure d'essais', Série Technologique N° 16, "Essai au bleu de Méthylène", 2000.
- [21] H. Houben, H. Guillaud, Earth construction: a comprehensive guide, Intermediate Technology

-
- Publications, 1994.
- [22] R. Stulz, K. Mukerji, Appropriate building materials a catalogue of potential solutions revised, in: *Approp. Build. Mater. a Cat. Potential Solut. Revised, Enlarg. Ed.*, Intermediate Technology Publications, 1993.
 - [23] K.M.A. Hossain, M. Lachemi, S. Easa, Stabilized soils for construction applications incorporating natural resources of Papua New Guinea, *Resour. Conserv. Recycl.* 51 (2007) 711–731.
 - [24] P. Duxson, A. Fernández-Jiménez, J.L. Provis, G.C. Lukey, A. Palomo, J.S.J. van Deventer, Geopolymer technology: the current state of the art, *J. Mater. Sci.* 42 (2007) 2917–2933.
 - [25] H. Tremblay, Amélioration mécanique et prediction de la compressibilité des sols fins du Québec., (2000).
 - [26] E.A. Basha, R. Hashim, H.B. Mahmud, A.S. Muntohar, Stabilization of residual soil with rice husk ash and cement, *Constr. Build. Mater.* 19 (2005) 448–453. doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2004.08.001.
 - [27] R. Vincent, Blocs de terre comprimée Vol 1 Manuel de Production, CRA-Terre EAG, Grenoble, Fr. (1995).
 - [28] E. Quagliarini, S. Lenci, The influence of natural stabilizers and natural fibres on the mechanical properties of ancient Roman adobe bricks, *J. Cult. Herit.* 11 (2010) 309–314.
 - [29] Gandreau D., Delboy L., Patrimoine mondial, inventaire et situation des biens construits en terre, UNESCO/CH/CPM, Paris, 2010.
 - [30] B. Taallah, ETUDE DU COMPORTEMENT PHYSICO-MECANIQUE DU BLOC DE TERRE COMPRIMÉE AVEC FIBRES, Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
 - [31] Q.-B. Bui, Stabilité des structures en pisé: Durabilité, caractéristiques mécaniques, Villeurbanne, INSA, 2008.
 - [32] B.V.V. Reddy, A. Gupta, Characteristics of soil-cement blocks using highly sandy soils, *Mater. Struct.* 38 (2005) 651.
 - [33] A. Guettala, A. Abibsi, H. Houari, Durability study of stabilized earth concrete under both laboratory and climatic conditions exposure, *Constr. Build. Mater.* 20 (2006) 119–127.
 - [34] R. Bahar; M. Benazzoug; S. Kenai, Performance of compacted cement-stabilised soil, *Cem. Concr. Compos.* 26 (2004) 811–820.
 - [35] K. Zine-Dine, H. Bouabid, M. Kortbi, S. Charif-d’Ouazzane, A. Hakimi, A. Hammoumi, O. Fassi-Fehri, Rheology of walls in compressed earth blocks in uniaxial compression: study et modelling, *Mater. Struct.* 33 (2000) 529–536.
 - [36] A. Hakimi, O. Fassi-Fehri, H. Bouabid, S.C. D’ouazzane, M. El Kortbi, Comportement mécanique non linéaire du bloc de terre comprimée par couplage élasticité endommagement, *Mater. Struct.* 32 (1999) 539–545.
 - [37] Bouassria K., Cherraj M., Bouabid H., Charif D’ouazzane S., Tayyibi A., Ductility diagram for heterogeneous materials ductility assessment: application to cement soil material., *Phys. Chem. News.* (2014).
 - [38] H.B. Nagaraj, M. V Sravan, T.G. Arun, K.S. Jagadish, Role of lime with cement in long-term

-
- strength of Compressed Stabilized Earth Blocks, *Int. J. Sustain. Built Environ.* 3 (2014) 54–61.
- [39] A. Ammari; K. Bouassria; A. Tayyibi; H. Bouabid; M. Cherraj; S. Charif D'ouazzane; M. Ibnoussina, Promoting the technique of grounding block compressed in the construction sector by improving its mechanical behavior, *J. Mater. Environ. Sci.* 7 (10) (2016) 3532–3537.
 - [40] S.L. Pagliolico, S. Ronchetti, E.A. Turcato, G. Bottino, L.M. Gallo, R. DePaoli, Physicochemical and mineralogical characterization of earth for building in North West Italy, *Appl. Clay Sci.* 50 (2010) 439–454.
 - [41] Y. Millogo, J.-C. Morel, Microstructural characterization and mechanical properties of cement stabilised adobes, *Mater. Struct.* 45 (2012) 1311–1318.
 - [42] Y.M.M.H.R. Ouedraogo, Microstructure and physical properties of lime-clayey adobe bricks, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 2386–2392.
 - [43] K. Bouassria, A. Ammari, A. Tayyibi, H. Bouabid, J. Zerouaoui, M. Cherraj, S. Charrif D'ouazzane, The effect of lime on alumino-silicate and cement on the behavior of compressed earth blocks, *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (2015) 3430–3435.
 - [44] Y. Millogo, M. Hajjaji, J.C. Morel, Physical properties, microstructure and mineralogy of termite mound material considered as construction materials, *Appl. Clay Sci.* 52 (2011) 160–164.
 - [45] ARS 671, Blocs de terre comprimée Norme de définition, classification et désignation des blocs de terre comprimée, 1996.
 - [46] K. Kariyawasam, C. Jayasinghe, Cement stabilized rammed earth as a sustainable construction material, *Constr. Build. Mater.* 105 (2016) 519–527.
 - [47] B.V.V. Reddy, M.S. Latha, Influence of soil grading on the characteristics of cement stabilised soil compacts, *Mater. Struct.* 47 (2014) 1633–1645.
 - [48] L. Fontaine, R. Anger, P. Doat, H. Houben, H. Van Damme, *Bâtir en terre: du grain de sable à l'architecture*, Belin Paris, 2009.
 - [49] G.H. Brundtland, others, *Notre Avenir à Tous, rapport de la commission mondiale sur l'Environnement et le Développement*, Les Ed. Du Fleuve, Paris (Traduction Française Our Common Futur. (1987).
 - [50] M. Olivier, A. Mesbah, Le matériau terre: Essai de compactage statique pour la fabrication de briques de terre comprimées, *Bull Liaison Labo P.* (1986) 146.
 - [51] H. Bouabid, Contribution à l'étude du comportement rhéologique du bloc de terre comprimée et du mortier de terre stabilisée-Proposition d'un optimum Technico Economique, Thèse de Doctorat d'Etat, Université Mohamed V, faculté des Sciences, Rabat, 2000.
 - [52] M. Cherraj, K. Gueraoui, H. Bouabid, S. Charrif D'Ouazzane, R. Bouabid, A. Hammoumi, O. Fassi-Fehri, Mechanical characterization of earth stabilized mortar. determination of the technico-economic optimum, *Phys. Chem. News.* 42 (2008).
 - [53] ARS, 670, Blocs de terre comprimée Norme de terminologie, 1996.
 - [54] B.V.V. Reddy, P.P. Kumar, Cement stabilised rammed earth. Part A: compaction characteristics and physical properties of compacted cement stabilised soils, *Mater. Struct.* 44 (2011) 681–693.
 - [55] N.P. Barbosa, Structural behaviour of compressed earth blocks masonry, Sexta Reun. Do Com. TC-EBM. (1997).

-
- [56] A. Hakimi, H. Ouissi, M. El Kortbi, N. Yamani, Un test d'humidification-séchage pour les blocs de terre comprimée et stabilisée au ciment, *Mater. Struct.* 31 (1998) 20–26.
 - [57] A. Hakimi, N. Yamani, H. Ouissi, Rapport: Résultats d'essais de résistance mécanique sur échantillon de terre comprimée, *Mater. Struct.* 29 (1996) 600–608.
 - [58] K. Heathcote, Compressive strength of cement stabilized pressed earth blocks: Strength of cement stabilized pressed earth blocks depends on cement content and compacted density-simple formula presented to predict strength based on variables, *Build. Res. Inf.* 19 (1991) 101–105.
 - [59] M. Olivier, *Le matériau terre, compactage, comportement, application aux structures en bloc sur terre*, Lyon, INSA, 1994.
 - [60] A.Ammari, K. Bouassria, A. Tayyibi, M. Ech-Chahad, N. Zakhm, H. Bouabid, M. Cherraj, S. Charif D'ouazzane, Influence de la calcite en présence du ciment sur le comportement mécanique des blocs de terre comprimée, (2014).
 - [61] B.V.V. Reddy, P.P. Kumar, Cement stabilised rammed earth. Part B: compressive strength and stress--strain characteristics, *Mater. Struct.* 44 (2011) 695–707.
 - [62] K. Zine-dine, Etude expérimentale du comportement mécanique des murs porteurs en maçonnerie en blocs de terre comprimée et stabilisée, Thèse Dr. Labo. Public d'Essais d'Etudes (LPEE), Rabat, Maroc. (2000).
 - [63] R. Hachem, Etude de la ductilité de déplacement des poteaux en béton armé, (2004).
 - [64] Mohammed Adil ElAzreq, "Vulnérabilité Sismique des Constructions en Terre", Thèse de Doctorat, Université Mohamed V, Faculté des Sciences Rabat.
 - [65] A. Bakchich; F. Mriss, Comportement mécanique des murets en bloc de terre compressée'. Premiers essais de chargement et modélisation., PFE, EHTP, Casablanca.
 - [66] M. Acharhabi, A; Berrada, M; Kouam, Modélisation numérique et expérimentale des murs porteurs en maçonnerie', *Mar. Gén. Civ.* 23 (n.d.) 35–41.
 - [67] D. M, *Le matériau terre: compactage, comportement, applications aux structures en BTC*, '. Thèse de Doctorat Tomes I, II et III, INSA, Lyon, n.d.
 - [68] C. Egenti, J.M. Khatib, D. Oloke, Conceptualisation and pilot study of shelled compressed earth block for sustainable housing in Nigeria, *Int. J. Sustain. Built Environ.* 3 (2014) 72–86.
 - [69] M. Olivier, A. Mesbah, Z. El Gharbi, J.C. Morel, Mode opératoire pour la réalisation d'essais de résistance sur blocs de terre comprimée, *Mater. Struct.* 30 (1997) 515–517.
 - [70] G. Mertens, J. Elsen, D. Laduron, R. Brulet, Minéralogie des silicates de calcium présents dans des mortiers anciens à Tournai, *ArcheoSciences. Rev. D'archéométrie.* (2006) 61–65.
 - [71] Y. Millogo, Etude géotechnique, chimique et minéralogique de matières premières argileuse et latéritique du Burkina Faso améliorées aux liants hydrauliques: application au génie civil (bâtiment et route), Univ. d'Ouagadougou, Th. Doct. Chim. Minérale. 142 (2008).
 - [72] A. Dekayir, M. Amouric, J. Olives, C. Parron, A. Nadiri, A. Chergui, M.A. El Hajraoui, Structure et caractérisation des matériaux utilisés dans la construction d'une mosaïque romaine de la cité de Volubilis (Maroc), *Comptes Rendus Geosci.* 336 (2004) 1061–1070.
 - [73] F. Gouny, F. Fouchal, P. Maillard, S. Rossignol, A geopolymer mortar for wood and earth structures, *Constr. Build. Mater.* 36 (2012) 188–195.

-
- [74] M. Cherraj, “Valorisation des matériaux locaux: Un modèle numérique d’évaluation des caractéristiques mécaniques du BTC et du mortier en fonction de la stabilisation en comptage et/ou en ciment”, These de doctorat. Univeristé Mohammed V, faculté des Sciences, (2008).
 - [75] N. Srisuwan, Propriétés inhibitrices d’un mélange d’amines grasses et de sébaçate de sodium vis-à-vis de la corrosion d’un acier au carbone, 2008.
 - [76] RILEM TC 76-LUM-b1, Compressive strength of small walls and prisms, n.d.
 - [77] J.-C. Morel, A. Pkila, P. Walker, Compressive strength testing of compressed earth blocks, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 303–309.
 - [78] B.V.V. Reddy, A. Gupta, Influence of sand grading on the characteristics of mortars and soil-cement block masonry, *Constr. Build. Mater.* 22 (2008) 1614–1623.
 - [79] Q. Piattoni, E. Quagliarini, S. Lenci, Experimental analysis and modelling of the mechanical behaviour of earthen bricks, *Constr. Build. Mater.* 25 (2011) 2067–2075.
 - [80] H.B. Kaushik, D.C. Rai, S.K. Jain, Stress-strain characteristics of clay brick masonry under uniaxial compression, *J. Mater. Civ. Eng.* 19 (2007) 728–739.
 - [81] C. Jayasinghe, N. Kamaladasa, Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls, *Constr. Build. Mater.* 21 (2007) 1971–1976.
 - [82] A. Ammari, K. Bouassria, M. Cherraj, H. Bouabid, S.C. D'ouazzane, Combined effect of mineralogy and granular texture on the technico-economic optimum of the adobe and compressed earth blocks, *Case Stud. Constr. Mater.* 7 (2017) 240–248.
 - [83] P. Walker, T. Stace, Properties of some cement stabilised compressed earth blocks and mortars, *Mater. Struct.* 30 (1997) 545–551.
 - [84] P. Zak, T. Ashour, A. Korjenic, S. Korjenic, W. Wu, The influence of natural reinforcement fibers, gypsum and cement on compressive strength of earth bricks materials, *Constr. Build. Mater.* 106 (2016) 179–188.
 - [85] P.J. Walker, Strength, durability and shrinkage characteristics of cement stabilised soil blocks, *Cem. Concr. Compos.* 17 (1995) 301–310.
 - [86] R.N. Yong, V.R. Ouhadi, Experimental study on instability of bases on natural and lime/cement-stabilized clayey soils, *Appl. Clay Sci.* 35 (2007) 238–249.
 - [87] F.G. Bell, Lime stabilization of clay minerals and soils, *Eng. Geol.* 42 (1996) 223–237.
 - [88] H. Xing, X. Yang, C. Xu, G. Ye, Strength characteristics and mechanisms of salt-rich soil-cement, *Eng. Geol.* 103 (2009) 33–38.
 - [89] ARS 672, Blocs de terre comprimée”, Norme de terminologie et classification, technologique N°11, CRATerre-EAG, Bruxelles, 1996.
 - [90] R. Shaan, J.M. Torrenti, Influence de la variation du type et d'épaisseur de joints sur le comportement de la maçonnerie, in: *Annales l'ITBTP*, 1991: pp. 61–69.
 - [91] RILEM TC76-LUM-A.6, Compressive strength of mortar, 1991.
 - [92] A. ASTM, C 780 , 91, Compressive strength of molded masonry mortar cylinders and cubes ., 1991.
 - [93] B.T.A. Guettala, The mechanical and physical properties of compressed earth block stabilized

-
- with lime and filled with untreated and alkali-treated date palm fibers, *Constr. Build. Mater.* 104 (2016) 52–62.
- [94] A. Ammari, K. Bouassria, N. Zakham, M. Cherraj, H. Bouabid, S.C. D'ouazzane, Durability of the earth mortar: Physico-chemical and mineralogical characterization for the reduction of the capillary rise, *MATEC Web Conf.*, 2018: p. 1024.
 - [95] E. Hind, *Analyse Expérimentale et Numérique des Propriétés mécaniques et Hygrométriques du mortier de terre.*, Diplôme de Master, Spécialité: Mécanique et Energétique, Université Mohamed V, Rabat, 2016.
 - [96] E. Kohler, *La réactivité des matériaux argileux sous gradient thermique*, Université d'Evry-Val d'Essonne, 2005.
 - [97] S. Waldmann, R. Gaupp, Grain-rimming kaolinite in Permian Rotliegend reservoir rocks, *Sediment. Geol.* 335 (2016) 17–33.
 - [98] A.E.B.A.G.A.E. bazaoui; K.E.K.M.T.A. EL Hourch;, Mineralogical and physico-chemical study of four soils from different cereal regions of Morocco, *J. Mater. Environ. Sci.* 6 (4) (2014) 1082–1090.
 - [99] D.A. Silva, H.R. Wenk, P.J.M. Monteiro, Comparative investigation of mortars from Roman Colosseum and cistern, *Thermochim. Acta.* 438 (2005) 35–40.
 - [100] S. Andrejkovičová, A.L. Velosa, E. Ferraz, F. Rocha, Influence of clay minerals addition on mechanical properties of air lime--metakaolin mortars, *Constr. Build. Mater.* 65 (2014) 132–139.
 - [101] M. Theodoridou, I. Ioannou, M. Philokyprou, New evidence of early use of artificial pozzolanic material in mortars, *J. Archaeol. Sci.* 40 (2013) 3263–3269.
 - [102] C. Borges, A.S. Silva, R. Veiga, Durability of ancient lime mortars in humid environment, *Constr. Build. Mater.* 66 (2014) 606–620.
 - [103] A.H. Shah, U.K. Sharma, D.A.B. Roy, P. Bhargava, Spalling behaviour of nano SiO₂ high strength concrete at elevated temperatures, in: *MATEC Web Conf.*, 2013: p. 1009.
 - [104] H. Bouabid, K. Zine Dine, M. El Kortbi, S. Charif d'Ouazzane, O. Fassi Ferhri, A. El Hammoumi, 'Modèle de prévision des propriétés mécaniques du bloc de terre comprimée et du mortier de terre', *Rev. Mar. Gén. Civ.*, N° 84, Oct./Nov. 1999.

Résumé

Les travaux de recherche réalisés dans le cadre de cette thèse, proposent des techniques et des procédés pour l'amélioration du matériau terre, en étudiant à la fois la minéralogie et la granulométrie pour la durabilité du matériau et contre la remontée capillaire du bloc de terre comprimée et du mortier. Les résultats expérimentaux des analyses chimiques-minéralogiques et des essais de compression uni-axiale sur des éprouvettes de trois terres prélevées de différents sites, et associées à trois dosages de ciment, sont présentés pour analyser et quantifier l'influence de sa fraction granulométrique et les éléments minéralogiques de son argile, sur l'optimum technico-économique du ciment. Les résultats montrent que le comportement mécanique et l'optimum technico-économique de ciment s'améliorent nettement par la minéralogie de la fraction argileuse que par la distribution granulométrique. De plus, ce travail étudie l'amélioration des caractéristiques du mortier de terre en tant que revêtement ou jointement, notamment, en présence de la remontée capillaire, afin d'accroître sa durabilité. Nous présentons les analyses minéralogiques et chimiques sur des éprouvettes de mortier de deux terres et leurs effets sur les caractéristiques mécaniques de ces mortiers. Le coefficient d'absorption de l'eau du mortier est calculé pour différents dosages en ciment afin d'optimiser la durabilité du mortier face aux intempéries, à la pluie et/ou des climats très humides. Les résultats montrent que l'absorption d'eau diminue avec l'ajout du ciment mais que cette diminution dépend beaucoup de la composition minéralogique et chimique de l'argile. Même si la fraction argileuse, absorbante d'eau, est moins présente et que la minéralogie d'un matériau est dominée par l'oxyde de calcium et l'oxyde de magnésium, l'absorption est très élevée sans présence de ciment. La situation s'inverse à partir d'un niveau d'ajout de ciment ou l'hydroxyde de calcium entre en réaction chimique avec le silico-alumineux en présence d'eau. Le silico-alumineux devient à son tour un liant qui stabilise le matériau contre la remontée capillaire.

Mots - Clés: terre, ciment, bloc de terre comprimée, mortier, chimie-minéralogie, comportement mécaniques, remontée capillaire.

Abstract

The research work carried out as part of this thesis proposes technics and processes for the improvement of the earth material, by studying both the mineralogy and the particle size for the durability of the material and against the capillary rise of the compressed earth block and the mortar. Experimental results of chemical-mineralogical analyzes and uni-axial compression tests on specimens of three earths taken from different sites, and associated with three cement content, are presented to analyze and quantify the influence of its granulometric fraction and the mineralogical elements of its clay, on the technico-economic optimum of the cement. The results show that the mechanical behavior and the technico-economic optimum of cement improve significantly by the mineralogy of the clay fraction than by the particle size distribution. In addition, this work studies the improvement of the characteristics of the earth mortar as a coating or jointing, especially in the presence of the capillary rise, in order to increase its durability. We present mineralogical and chemical analyzes on two-earth mortar specimens and their effects on the mechanical properties of these mortars. The water absorption coefficient of the mortar is calculated for different cement content in order to optimize the durability of the mortar in the face of bad weather, rain or very humid climates. The results show that the water absorption decreases with the addition of cement but that this decrease depends very much on the mineralogical and chemical composition of the clay. Even though the clay fraction, which absorbs water, is less present and the mineralogy of a material is dominated by calcium oxide and magnesium oxide, the absorption is very high without the presence of cement. The situation is reversed from a cement addition level where the calcium hydroxide enters a chemical reaction with the silico-aluminous in the presence of water. The silico-aluminous becomes in turn a binder that stabilizes the material against capillary rise.

Keywords: earth, cement, compressed earth block, mortar, chemistry-mineralogy, mechanical behavior, capillary rise.