

32-530-350-1

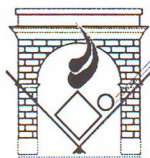


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE AMAR TELIDJI A LAGHOUAT



FACULTE DES SCIENCES ET DE L'INGENIERIE

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER** en Génie Civil

Option : **Matériaux et Structures**

Présenté par : **Mr. BACHAR MOHAMED**

Ingénieur d'état en Génie Civil diplômé de l'U.A.T. Laghouat

THEME

**OPTIMISATION DE LA COMPOSITION D'UN MORTIER DE
CHAUX EN VUE DE L'ELABORATION D'UN BETON DE
CHAUX LEGER A BASE DE COPEAUX DE BOIS**

Soutenu le,/2006

Devant la commission d'examen :

Dr. M. M. Khenfer	Professeur à l'U.A.T.Laghouat	Président
Dr. M. Bouhicha	Professeur à l'U.A.T.Laghouat	Examineur
Dr. M. Sayehi	M.A.C.C. au C.U.Djelfa	Examineur
Dr. M.S. Goual	Maître de Conférence à l' U.A.T.Laghouat	Rapporteur

Promotion 2006

Dédicace

Je dédie ce travail:

A ma famille en particulier :

mes parents

ma femme

mon enfant.

mes frères ,ma soeur

A tous mes amis.

A tous les enseignants du département de génie civil

Au personnel du laboratoire de génie civil.

Remerciements

Je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance et mes remerciements au directeur de ma thèse Monsieur M.S.GOUAL Maître de conférence à l'Université de Laghouat d'avoir proposé et diriger ce sujet, je le suis très reconnaissant pour tous ces conseils et ces directives durant toute la période de préparation de ce mémoire.

Je tiens à remercier vivement M.M. KHENFER Professeur à l'université de Laghouat de m'honorer en acceptant de présider l'examen de ce mémoire.

J'exprime également ma reconnaissance à Monsieur. M. BOUHICHA Professeur à l'Université de Laghouat et Monsieur M. SAIHI Maître de conférence à l'Université de Djelfa d'avoir accepter d'examiner ce travail.

Mes sincères reconnaissances à tous les enseignants du département de génie civil en particulier ceux qui ont contribué de près ou de loin par leur conseils et leurs aides.

Je ne dirais pas que je ne peux citer tout le monde, mais je tiens à remercier tous qui m'ont apporté, d'une manière directe ou indirect leur aide sans oublier l'ensemble du personnel du laboratoire de génie civil.

ملخص:

إن الطلب الملح والمتزايد للمواد للبناء، وخاصة حبيبات الخرسانة للقيام بمختلف المشاريع، سواء في الجزائر أو عبر مختلف أنحاء العالم، يتطلب مصاريف ضخمة والتي قد لا تكون في متناول بعض بلدان العالم الثالث. إن خرسانة الجير بحبيبات الخشب يسمح بتقييم منتج مستخلص من موارد متجددة (الخشب) أو استعمال بعض مواد الزيادة أو المستبدلة. إن تشكيل هذا المنتج للبناء يتماش مع التطوير المستمر الذي يسمح بتحديد استهلاك الطاقة داخل المباني. إن خواصه لا تسمح له حاليا أن يكون منافسا موازيا للبناء التقليدي، ولكن هذه الدراسة قد بينت لنا الطرق المتبعة حاليا لتحسين صلابته مع السهر لتطوير مسامية مفيدة للخواص الحرارية والسمعية. هدفتنا في هذه الدراسة هو تشكيل ملاط من الجير بحبيبات الخشب (3/8) ودراسة تأثيراته الميكانيكية والفيزيائية مع إيجاد تشكيلة مناسبة للضرورة التقنية والاقتصادية. إن الجير المميه المصنوع بمدينة سعيدة، والمستعمل في دراستنا ضعيف الصلابة مما انعكس سلبا على الخواص الميكانيكية للمنتج، ولكن استبدال كتلي لحبيبات الرمل ببقايا القرميد الأحمر، وكذلك استبدال 20% من الجير بالإسمنت قد حسن كثيرا من صلابته، وبالتالي تحسين خواصه الميكانيكية. إن نوعي من الرمل المستعمل في هذه الدراسة هو رمل الكثبان (0/0.63) ورمل الأودية (0/5) المحليين. إن بقايا صناعة الخشب قد أخضع للإشباع بماء مالح (NaCl) الذي له دور تقليل امتصاص الماء، وتحسين مقاومة النار، مع مراعاة كمية الماء الممتصة خلال التشكيل.

Résumé

La demande sans cesse croissante en matière de matériaux de construction, principalement le granulat de béton, pour réaliser de différents projets aussi bien en Algérie qu'à travers le monde, nécessite des coûts importants qui ne sont pas toujours à la portée de certains pays en développement. L'aggloméré considéré (béton de chaux-bois) dans ce travail permet la valorisation d'un produit provenant de co-produits industriels (menuiserie de bois) et l'utilisation d'un liant et ajouts minéraux. Sa composition en fait donc un matériau de construction s'accordant aux principes du développement durable en permettant à la limitation de consommation d'énergie de l'objet bâti. Ses propriétés ne lui permettent pas encore d'être compétitif face aux systèmes de maçonnerie traditionnels mais cette étude nous a indiqué les voies actuellement suivies pour améliorer sa résistance tout en veillant au développement d'une porosité bénéfique aux caractéristiques thermiques et acoustique. L'objectif de ce travail est de confectionner des mortiers de chaux à base de déchets de bois (3/8) et étudier son comportement mécanique et physique tout en ciblant une formulation adéquate aux exigences techniques et économiques. La chaux hydratée de Saida utilisée durant toute l'étude est trop faiblement hydraulique ce qui a répercuté négativement sur les propriétés mécaniques de l'aggloméré mais une substitution massive du sable ; par les fines de brique et une substitution de 20% de la chaux par un liant hydraulique (ciment) ont amélioré considérablement son hydraulicité et par la suite ses propriétés mécaniques, les deux sables utilisés localement sont le dunaire (0/0.63) et l'alluvionnaire (0/5). Les déchets de bois ont subi un traitement au sel (NaCl) qui aurait pour effet de limiter la capacité d'absorption et augmenter la tenue au feu, sans perdre de vue de leur grande capacité de rétention d'eau qui doit être minutieusement contrôlé pendant la confection.

Abstract:

The increasingly incessant demand on construction materials, especially, the concrete granulates for the realisation of different projects either in Algeria or in other country in the world, needs an important cost that are not always accessible to some countries in development. The composite (lime-wood) considered in this work permits the valorisation of a by-product provided from wood works and the substitution of cement currently used as a binder in the fabrication of mortars and concretes by the lime. In addition, and in order to ameliorate the mechanical properties of the matrix composites some minerals fines provided from carrier wastes are used as addition or substitution in the melange lime-sand. The aim of this work is focused on the study of physical and mechanical behaviour of a series of wood concretes having different porosities formulated from wood aggregates (3/8), lime, sand and mineral fines.

The hydrated lime used in the formulation is provided from SAIDA city. It is weakly hydraulic, this characteristic can affect negatively the mechanical properties of the elaborated concrete. In order to ameliorate the mechanical properties of concrete matrix, the substitution of 70% of sand by the brick fines and 20% of lime by cement have increasingly ameliorate the mechanical properties of matrix. In this work two types of local sand are used: the dune sand (0/0.63) and the river sand (0/5). The wood aggregates have been preliminary treated with NaCl salt in order to minimise their absorption capacity and increases their resistance to fire.

Table de matière

Table de matière

<i>Liste des figures</i>	
<i>Liste des tableaux</i>	
<i>Liste des notations</i>	
Introduction.....	1
Chapitre I Revue bibliographique	3
I.1 Revue bibliographique sur la chaux	3
I.1.1 Historique:	3
I.1.2 Procédés de fabrication de la chaux :	3
I.1.3 Différents types de chaux et leurs classifications :	5
I.2 Aperçu technique sur les mortiers :	6
I.2.1 Les mortiers romains :	6
I.2.2 Les mortiers de chaux :	7
I.2.2.1 Processus de durcissement des mortiers de chaux :	8
I.2.2.2 comportement simultané des mortiers mixtes chaux-ciment	9
I.2.2.3 Quelques travaux de recherche sur les mortiers de chaux :	10
I.3 Les produits à base de chaux.....	18
I.3.1 Les briques silico-calcaire :	18
I.3.2 Briques en béton de chanvre :	19
I.4 Revue bibliographique sur les bétons légers :	21
I.4.1 Définition et types de bétons légers:	21
I.4.2 Classification et Caractéristiques des bétons légers :	21
I.4.3 Porosité et capacité d'absorption d'eau des bétons légers :	24
I.4.4 Relation entre porosité et performances mécaniques :	26
I.4.5 Les bétons de bois :	27
I.4.5.1 Généralité sur la composition du bois.....	27
I.4.5.2 Caractéristiques des bétons de bois :	29
I.4.5.3 Influence de l'addition de copeaux de bois sur les performances mécaniques et thermiques du composite (argile-ciment-bois) :	32
Chapitre II : Matériaux utilisés et mesures expérimentales :.....	34
II.1 Essai de caractérisation et Normes :	34
II.2 Principales caractéristiques des matériaux utilisés :	35
II.2.1 la chaux	35
II.2.1.1 Analyse chimique et minéralogique de la chaux :	35
II.2.1.2 Caractéristiques physiques de la chaux :	36
II.2.2 Le Sable dunaire :	39
II.2.2.1 Analyse par diffraction aux rayons X du sable de dune employé :	39
II.2.2.2 Caractéristiques granulaire du sable dunaire :	40
II.2.2.3 Caractéristiques physiques du sable dunaire:	41
II.2.3 Le Sable alluvionnaire :	42
II.2.3.1 Caractéristiques granulaire du sable alluvionnaire :	42
II.2.3.2 Caractéristiques physiques du sable alluvionnaire :	42
II.2.4 Résultats récapitulatifs des différentes caractéristiques du sable dunaire et alluvionnaire avec leur courbe granulométrique :	43
II.2.5 Le Ciment	44
II.2.5.1 Analyse du ciment :	44
II.2.5.2 Caractéristiques physiques du ciment :	45

II.2.6 Les fillers.....	45
II.2.6.1 Filler de calcaire.....	45
II.2.6.2 Filler des déchets de brique.....	46
II.2.7 granulats de bois.....	47
II.2.7.1 Analyse granulométrique des granulats de bois.....	48
II.2.7.2 Caractéristiques physiques des déchets de bois :	48
II.2.8 Eau de gâchage.....	49
II.3 Différents essais de caractérisation physico-chimique des mortiers et bétons durcis.....	50
II.3.1 procédure de malaxage et de mise en moule :	50
II.3.2 Modes de conservation :	50
II.3.3 Masse volumique :	51
II.3.4 porosité:	51
II.3.5 Essai d'absorption d'eau par capillarité :	53
II.3.6 Mesure du retrait sur éprouvettes de béton NF P 15-433.....	54
II.3.7 Essai de Résistance à la traction (flexion trois points) :.....	54
II.3.8 Essai de Résistance à la compression :	55
Chapitre III : Formulation et Caractérisation des mortiers durcis.....	56
III.1 Introduction :	56
III.2 Méthodologie de travail :	56
III.3 Recherche de la composition optimale :	56
III.3.1 Eprouvettes utilisées :	56
III.3.2 Procédure de préparation :	57
III.3.3 Optimisation du mélange (chaux-sable) :	57
III.3.4 Effet de l'addition des fines calcaires dans le mélange S ₂ 35.....	61
III.3.5 Effet de la substitution partielle de la chaux par le ciment dans le mélange S ₂ 35.....	63
III.3.6 Effet de la substitution partielle et complète du sable mixte S ₂ par les fines de briques Br dans le mélange S ₂ 35.....	65
III.3.7 Effet de l'addition des fines calcaires dans le mélange S ₂ 35(20).....	68
III.3.8 Effet de la substitution partielle et complète du sable mixte S ₂ par les fines de brique Br dans le mélange S ₂ 35(20).....	70
Chapitre IV : Effet d'incorporation des granulats de bois dans la matrice optimisé	73
IV.1 Introduction :	73
IV.2 Mode de malaxage et de préparation :	73
IV.3 Caractéristiques physiques	74
IV.3.1 Masse volumique et Porosité.....	74
IV.4 Caractéristiques mécaniques :	78
IV.4.1 Effet d'incorporation des granulats de bois dans la matrice optimisée.....	78
IV.4.2 Résistance à la compression et porosité.....	82
IV.4.3 Ajustement de la de la relation (résistance à la compression -porosité) aux différents modèles.....	84
IV.5 Retrait et mécanisme de séchage.....	86
IV.6 Absorption capillaire.....	92
Conclusion générale et recommandations.....	94
Bibliographie.....	95
Annexe.A	
Annexe.B	

Liste des figures

Premier chapitre

Figure I-1: Schémas de fabrication de la chaux [2].

Figure I-2 : Evaluation de la résistance en fonction du taux de la silice combinable[2]..

Figure I-3 : Schéma de préparation de la chaux et du mortier de chaux [2].

Figure I-4 : Formes sous lesquelles le dioxyde de carbone est dissous d'après Valsaraj

Figure I-5 : Relation entre la composition du mortier de chaux, la résistance à la compression et le pouvoir de rétention d'eau selon la norme [ACNOR A179].

Figure I-6 : Courbes d'absorption capillaires des différentes compositions avec différents produits hydrauliques et pozolaniques.

Figure I-7 : Histogrammes des propriétés mécaniques et d'absorption Capillaire.[17]

Figure I-9 : Evaluation des propriétés mécaniques des différentes compositions de mortiers de chaux. [24]

Figure I-10 : Evaluation des propriétés mécaniques des différentes compositions de mortiers de chaux. (à 28j) [24]

Figure I-11 : Evolution des caractéristiques mécaniques des briques de chanvre [27]

Figure I-12 : variation de la masse volumique absolue et de retrait des briques de chanvre [27]

Figure I-13 : Représentation schématique des différents types de béton léger,
D'après SHORT ET KINNIBURGH [28]

Figure I-14 : Classification des bétons légers selon la norme (ACI 213R-87) [29]

Figure I-15: Taux d'absorption en fonction du temps des granulats d'argile expansés bouletés (Arg.) et de cendres volantes frittées (CV); granulats 4/8 mm, densité apparente ρ_g [30]

Figure I-16: Absorption d'eau en fonction du temps des granulats d'argile expansés bouletés (Arg.) et de cendres volantes frittées (CV); granulats 4/8 mm, densité apparente [30]

Figure I-17: Résistance sur prisme en compression à 28 jours (MPa) en fonction de p
[ARNOULD, 76]

Figure I-18: Différentes échelles d'observation du matériau bois d'après [Harrington, 1999].

Figure I-19 : Conductivité thermique sèche et humide de deux bétons de bois DURISOL
[KOSNY & DESJARLAIS, 94]

Liste des figures

Figure I-20 : Influence de l'addition de copeaux de bois sur la densité du composite (argile-ciment-bois). [41]

Figure I-21 : Influence du pourcentage massique du bois sur les propriétés mécaniques Du composite. [41]

Figure I-22 : Relation entre la résistance à la compression et à la flexion du Composite (argile-ciment-bois). [41]

Figure I-23 : Conductivité thermique en fonction de la densité du composite (argile-ciment-bois). [41]

Deuxième chapitre

Figure II.1 : Diffractogramme de la chaux de saida

Figure II.2 : Dispositif expérimental de l'appareil **LeChatelier**

Figure II.3 : Dispositif expérimental du perméabilimètre **Blaine**

Figure II.4 : Diffractogramme du sable dunaire de la zone de Laghouat

Figure II.5 : Courbes granulométriques des deux sables

Figure II.6 : Diffractogramme du ciment CPJ CEM II/A 32.5.

Figure II.7 : Diffractogramme des fillers de calcaire

Figure II.8 : Diffractogramme des fillers de brique

Figure II.9 : Courbe granulométrique du bois 3/8

Figure II.10 Description schématique de l'essai d'absorption d'eau par capillarité

Figure II.11 Dispositif pour la mesure du retrait

Figure II.12 Schéma mécanique de l'essai de traction par flexion trois points.

Figure II.13 Schémas mécanique de l'essai de compression.

Troisième chapitre

Figure III-1: Résistance à la compression en fonction de E/Ch ;Sable alluvionnaire (S_a)

Figure III-2: Résistance à la flexion en fonction de E/Ch. ;Sable alluvionnaire (S_a)

Figure III-3: Résistance à la compression en fonction de E/Ch ;Sable dunaire (S_d)

Liste des figures

Figure III-4: Résistance à la flexion en fonction de E/Ch ;Sable dunaire (S_d)

Figure III-5: Résistance à la compression en fonction de E/Ch

Sable mixte [$S_1 = 1/3(S_a) + 2/3(S_d)$]

Figure III-6: Résistance à la flexion en fonction de E/Ch

Sable mixte [$S_1 = 1/3(S_a) + 2/3(S_d)$]

Figure III-7: Résistance à la compression en fonction de E/Ch

Sable mixte [$S_2 = 2/3(S_a) + 1/3(S_d)$]

Figure III-8: Résistance à la flexion en fonction de E/Ch

Sable mixte [$S_2 = 2/3(S_a) + 1/3(S_d)$]

Figure III.9: Résistance à la compression en fonction du taux du calcaire introduit

Figure III.10: Résistance à la flexion en fonction du taux du calcaire introduit

Figure III.11: Résistance à la compression en fonction du taux du ciment substitué

Figure III.12: Résistance à la flexion en fonction du taux du ciment substitué

Figure III.13: Résistance à la compression en fonction du taux du calcaire introduit

Figure III.14: Résistance à la flexion en fonction du taux du calcaire introduit

Figure III-15: Résistance à la compression en fonction du taux de briques substitué par rapport au sable mixte (S_2). Traitement par les fines de briques .ENV(I)

Figure III-16: Résistance à la flexion en fonction du taux de briques substitué par rapport au sable mixte (S_2). Traitement par les fines de briques .ENV(I)

Figure III-17: Résistance à la compression en fonction du taux de briques substitué par rapport au sable mixte (S_2). Traitement par les fines de briques .ENV(II)

Figure III-18: Résistance à la flexion en fonction du taux de briques substitué par rapport au sable mixte (S_2). Traitement par les fines de briques .ENV(II)

Figure III-19: Résistance à la compression en fonction du taux de briques substitué par rapport au sable mixte (S_2).ENV(I)

Figure III-20: Résistance à la flexion en fonction du taux de briques substitué par rapport au sable mixte (S_2).ENV(I)

Figure III-21: Résistance à la compression en fonction du taux de briques substitué par rapport au sable mixte (S_2).ENV(II)

Figure III-22: Résistance à la flexion en fonction du taux de briques substitué par rapport au sable mixte (S_2).ENV(II)

Quatrième chapitre

Figure IV.1 Variation de la masse volumique en fonction du pourcentage massique en bois

Figure IV.2 Variation de la masse volumique en fonction du pourcentage massique en bois

Figure IV.3 Variation de la porosité en fonction Du pourcentage massique en bois

Figure IV.4 Variation de la porosité en fonction Du pourcentage massique en bois

Figure IV.5 Variation de la masse volumique en fonction de la porosité

Figure IV.6 Variation de la masse volumique en fonction de la porosité

Figure IV.7 Variation de la masse volumique et de la porosité en fonction du pourcentage massique en bois. ENV (I)

Figure IV.8 Variation de la masse volumique et de la porosité en fonction du pourcentage massique en bois. ENV (II)

Figure IV.9 : Résistance à la compression en fonction du taux massique du bois. ENV (I)

Figure IV.10: Résistance à la flexion en fonction du taux du massique de bois .ENV(I)

Figure IV.11: Résistance à la flexion en fonction du taux du massique de bois .ENV(I)

Figure IV.12 : Résistance à la flexion en fonction du taux massique du bois.ENV(II)

Figure IV.13 Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité ENV (II)

Figure IV.14 Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité. ENV (I)

Figure IV.15 Variation de la résistance à la compression et de la porosité en fonction du taux massique de bois. ENV (II)

Figure IV.16 Variation de la résistance à la compression et de la porosité en fonction du taux massique de bois. ENV (I)

Figure IV.17 Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité et différents ajustements aux trois modèles. ENV (I)

Liste des figures

Figure IV.18 Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité et différents ajustements aux trois modèles. ENV (II)

Figure IV.19: Variation du Retrait en fonction du temps

Figure IV.20: Variation du Retrait en fonction du taux massique de copeaux de bois

Figure IV.21: Variation de la masse volumique en fonction du temps

Figure IV.22: Variation du Retrait en fonction du temps

Figure IV.23: Variation du Retrait en fonction du taux massique de copeaux du bois

Figure IV.24: Variation de la masse volumique en fonction du temps

Figure IV.25 Courbe d'absorption capillaire des différentes compositions des béton éqlaborés.

Figure IV.26 Variation du coefficient d'absorption capillaire en fonction du taux massique de copeaux de bois

Liste des tableaux

Premier Chapitre

Tableau I.1 Quelques recettes des mortiers romains [4]

Tableau I.2 Résistance à la compression de deux formulations romaines [4]

Tableau.I.3 Différentes formulations (en volume) et différentes cures [16]

Tableau.I.4 Module de Young, résistance à la flexion, résistance à la compression [16]

Tableau.I.5 La densité, la capacité maximale d'absorption d'eau et le coefficient d'absorption capillaire [16].

Tableau I.6 Mode de préparation selon les deux normes [17]

Tableau I.7 Mode de conservation selon les deux normes [17]

Tableau.I.8 Propriétés physico-mécaniques de la brique de Boussaâda [26] :

Tableau I.9 Quelques propriétés physico mécaniques et thermiques des bétons légers

Tableau I.10 Caractéristiques des bétons de bois.

Deuxième Chapitre

Tableau II.1 Différents Essais de caractérisation et Normes correspondants.

Tableau II.2 Gamme de certaines caractéristiques de différent type de chaux.

Tableau II.3 Composition chimique de la chaux de Saida.

Tableau II.4 Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique apparente de la Chaux.

Tableau II.5 Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique absolue de la Chaux.

Tableau II.6 Résultats des caractéristiques physiques de la chaux

Tableau II.7 Différentes propriétés physico- chimiques du sable dunaire de certaines régions.

Tableau II.8 Résultats de l'analyse granulométrique du sable dunaire.

Tableau I.9 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable alluvionnaire.

Tableau II.10 Résultats de caractérisation du sable dunaire et alluvionnaire

Tableau II.11 Composition chimique du ciment

Tableau II.12 Caractéristiques physiques du ciment

Tableau II.13 Caractéristiques physiques des fines de calcaires

Tableau II.14 Caractéristiques physiques des fines de briques

TableauII.15 Résultats de l'analyse granulométrique des granulats de bois.

Tableau II.16 Résultats expérimentales des caractéristiques physiques des granulats de bois

Tableau.II.17 Résultats d'analyse de l'eau de gâchage.

Tableau II.18 Différentes étapes de malaxage selon la norme EN 196-1.

Troisième Chapitre

Tableau III.1 Différentes compositions des mortiers de chaux pour $Ch/S=1/2$

Tableau III.2 : Résistance à la traction et la compression à 28j [Sd=Sable dunaire]

Tableau III.3 : Résistance à la traction et à la compression à 28j [Sa=sable alluvionnaire].

Tableau III.4 : Résistance à la traction et à la compression à 28j [$S_1 = 1/3(S_a) + 2/3(S_d)$]

Tableau III.5 : Résistance à la traction et à la compression à 28j [$S_2 = 2/3(S_a) + 1/3(S_d)$]

Tableau III.6 : Différentes compositions des mortiers de chaux dont la composition M_2S_2 avec addition des fines de calcaires au mélange totale sec.

Tableau.III.7: Propriétés mécaniques à 28j aux divers environnements.

Tableau.III.8 : Différentes compositions des mortiers de chaux dont la composition M_2S_2 avec substitution partielle du ciment par la chaux.

Tableau.III.9: Propriétés mécaniques à 28j aux divers environnements

Tableau.III.10 : Différentes compositions des mortiers de chaux dont la composition M_2S_2 avec substitution partielle et complète des fines de brique par le sable S_2

Tableau III.11 : Résistance à la traction R_t [Mpa]

Tableau III.12 : Résistance à la compression R_c [Mpa]

Tableau III.13 : Résistance à la traction R_t [Mpa]

Tableau III.14: Résistance à la compression R_c [Mpa]

Tableau III.15: Différentes compositions des mortiers de chaux dont la composition $M_2S_2L_4$ avec addition des fines de calcaire.

Tableau III.16 : Propriétés mécaniques à 28j aux divers environnements

Tableau III.17: Différentes compositions des mortiers de chaux dont la composition $M_2S_2L_4$ avec substitution partielle et complète des fines de brique par le sable S_2

Tableau III.18: Résistance à la traction R_t [Mpa]

Tableau III.19: Résistance à la compression R_c [Mpa]

Tableau III.20 : Résistance à la traction R_t (Mpa)

Tableau III.21 : Résistance à la compression R_c [Mpa]

Quatreimme Chapitre

Tableau.IV.1 Différentes compositions des bétons élaborés en granulats de bois

Tableau IV.2 Valeurs de masses volumiques et de porosités des différents bétons-bois

Tableau IV.3 Valeurs de masses volumique et de porosités des différents bétons-bois

Tableau IV.4:Résistance à la flexion et à la compression aux différents ages (7, 14,28) j

Tableau.IV.5: Résistance à la flexion et à la compression aux différents ages (7, 14,28) j

Tableau IV.6 Valeurs de la résistance à la compression et de la porosité à 28j en fonction du pourcentage en bois aux deux environnement I et II

Tableau IV.7 Relation entre la résistance à la compression et la porosité des bétons de chaux bois selon les trois modèles théoriques.

Tableau.IV.8 Résultats de la perte de masse et de la vitesse d'évaporation aux différentes cures

Tableau.IV.9 Résultats de la perte de masse et de la vitesse d'évaporation aux différentes cures

Tableau.IV.10: Retrait et masse volumique en fonction du dosage du bois et de l'age de cure

Tableau.IV.11: Retrait et masse volumique en fonction du dosage du bois et de l'age de cure

Tableau IV.12 : Résultats du teste d'absorption par capillarité des bétons avec différents pourcentages de bois.

Liste des symboles utilisés

Liste des symboles utilisés

NHL	: Chaux hydraulique naturelle
CL	: Chaux calcique
M₁	: Masse de (cellule + benzène)
M₂	: Masse de (cellule + benzène + ciment)
P_r	: Charge de rupture (en KN).
S	: Surface de compression de l'éprouvette.
S_d	: Masse du sable dunaire [kg].
S_a	: Masse du sable alluvionnaire.
S₁	: Masse du sable mixte.
S_{2i}	: Masse du sable de la série i
B	: Masse des déchets de bois.
Br	: Masse des fines de brique.
T	: Température [°C ou K].
t	: Temps [s]
ρ_{app}	: Masse volumique apparente [kg/m ³].
ρ_{abs}	: Masse volumique absolue [kg/m ³].
V	: Volume total du matériaux poreux [m ³].
V_{app}	: Volume apparent [m ³].
V_v	: Volume des vides [m ³
V₁	: Volume du benzène initial,
V₂	: Le volume du benzène final (après introduction du liant)
C	: Compacité
P	: Porosité
η	: Viscosité dynamique de l'eau (=0.001 Pa.s à 20°C).
σ_t	: Contrainte de traction [MPa].
σ_c	: Contrainte de compression (en MPa).
ω_m	: Capacité d'absorption massique [kg/kg].
ω_v	: Capacité d'absorption volumique
R_c	: Résistance à la compression [MPa].
R_t	: Résistance à la traction [MPa].

Liste des symboles utilisés

S_m	: Surface spécifique [cm^2/g].
E	: Dosage en eau (en litre).
E_s	: L'équivalent de sable [%].
g	: accélération de pesanteur [m/s^2].
HR	: L'humidité relative [%].
MF	: Module de finesse du sable

Introduction

Introduction

Pour s'adapter à la croissance du marché de la construction, le secteur cimentier oriente ses développements technologiques vers des solutions permettant à la fois d'améliorer le rendement de la fabrication des ciments et réduire leur coût de production sans perdre de vue la préservation de l'environnement, et ceci par la réduction du taux de CO₂ généré lors de la fabrication. L'utilisation d'ajouts minéraux à faible coût énergétique et technologique comme substituant du ciment est l'une des solutions adoptée par plusieurs chercheurs et producteurs de ciment pour y atteindre ces objectifs. Néanmoins, cette alternative, malgré qu'elle a contribué à l'augmentation de la production du ciment, le taux de CO₂ dégagé lors de la fabrication reste toujours au-delà des limites préconisées par les organismes de protection de l'environnement.

De plus, si le ciment demeure et par excellence le liant le mieux adapté pour la fabrication du béton de structure, les constructeurs peuvent rechercher d'autres liants plus économiques et à haute qualité environnementale pour la confection des éléments de remplissages ou même porteurs dans le cas des constructions de faibles hauteurs, étant donné que la charge transmise à ces éléments n'exigent que des résistances mécaniques largement inférieures à leur capacité portante. Sur ce, la substitution partielle ou totale du ciment par la chaux s'avère une alternative très intéressante non seulement sur le plan économique mais également environnementale. En outre, dans la mesure où les résistances mécaniques restent suffisantes, l'idée d'un allègement d'une pâte minérale peut contribuer à l'amélioration des performances thermiques du produit fini et à la diminution des charges mortes transmises à la structure. Ceci, permet d'améliorer le confort thermique dans les habitations, de minimiser les forces d'inerties dans la superstructure et de construire sur des sols de faible portance.

La chaux utilisée comme liant pour la confection du matériau étudié dans ce travail est celle de l'usine de Saïda. Cette chaux présente un caractère hydraulique assez faible, donc, utilisée telle qu'elle dans la confection de mortier ou de béton de chaux conduit à des résistances mécaniques assez faibles et qui ne répond pas aux exigences requises. La recherche de moyens de traitement qui visent à augmenter l'activité pouzzolanique de cette chaux est donc nécessaire avant le recours au procédé d'allègement. En effet, plusieurs modes de traitement par ajouts de fines minérales soit par voie d'addition ou par voie de substitution ont été testés. Le procédé d'allègement utilisé dans cette étude est l'incorporation des copeaux de bois issus des résidus de la menuiserie dans une matrice préalablement optimisée. Ces copeaux de bois

ont également subi un traitement de minéralisation par une solution saline de NaCl (100.g/litre) qui aurait comme effet la diminution de la capacité d'absorption et l'amélioration de la tenue au feu.

L'objectif visé dans ce travail est donc double: le premier consiste à l'étude de l'influence des ajouts de fines minérales sur les performances physicomécaniques du mortier de chaux. Cette partie va permettre d'optimiser la composition de la matrice liante. Le second consiste en la formulation et la caractérisation du composite chaux-bois ayant comme matrice la composition optimisée dans la première partie.

Afin d'atteindre ces objectifs, ce mémoire a été subdivisé en quatre chapitres :

Le premier est consacré à une recherche bibliographique sur la chaux, les mortiers de chaux, les bétons légers et enfin quelques travaux sur les bétons de bois.

Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation des matières premières utilisées dans la fabrication du mortier de chaux et du béton de chaux-bois. Chaque caractéristique est précédée par une description de l'essai expérimentale selon les normes en vigueur permettant son évaluation.

La recherche de la composition optimale du mortier de chaux a fait l'objet **du troisième chapitre**. Cette partie est consacrée à l'étude de l'influence de différents ajouts minéraux sur les performances physicomécaniques des mortiers élaborés.

Quant au quatrième chapitre, il s'articule sur la formulation et la caractérisation physicomécanique d'un composite de béton de bois ayant comme matrice la composition optimisée en troisième chapitre à laquelle on a ajouté différentes proportions de copeaux de bois.

Enfin, on termine ce mémoire par une conclusion et des recommandations pour des futures recherches.

Chapitre I

Revue bibliographique

1.1 Revue bibliographique sur la chaux :

1.1.1 Historique:

Les premières traces de la fabrication de la chaux remontent à la maîtrise de la pierre. Elle était utilisée comme liant dans les constructions. L'avènement de la chaux a marqué un tournant dans l'histoire de l'architecture en permettant le développement de l'espace d'une manière durable, c'est à dire en se passant du bois. Dès le VI^{ème} siècle avant J.C., période néolithique, toutes les civilisations connaissent l'utilisation de liants à bâtir (chaux ou plâtre), mais ce sont les romains qui, en réussissant à améliorer la qualité de leur mortier de chaux et en en faisant leur matériau de construction principal, ont inventé l'architecture moderne. A cette même époque, les civilisations méditerranéenne emploient aussi la chaux dans les enduits et décorations : peintures, stucs et ornements.

En perçant le secret de l'extraordinaire résistance des constructions romaines, les scientifiques s'inspirent de la formule magique du mortier romain pour mettre au point un ciment moderne répondant aux critères les plus exigeants

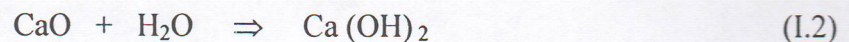
Les Romains ne connaissaient pas le ciment Portland moderne – produit seulement à partir du XIX^e siècle, avec lequel on construit aujourd'hui nos maisons – mais possédaient d'excellentes connaissances d'architecture et de technologie des matériaux. Ils ont développé un ciment particulier à haute performance, capable de durcir dans l'eau sans présence d'air, il est constitué de chaux mélangée à du sable et de la cendre volcanique ou à des ponces et des briques moulées. Le plus utilisé des matériaux ajoutés à cette chaux était le sable volcanique trouvé au pied du Vésuve dans la région de Pozzuoli (Italie du Sud). Aujourd'hui encore on appelle «pouzzolanes » (de Pozzuoli) tous les matériaux capables de réagir à température ambiante, au contact de l'eau, avec la chaux. Cette réaction produit des composants stables, aptes à se consolider dans l'eau et qui confèrent aux mortiers des caractéristiques physiques et mécaniques bien meilleures que celles des mortiers ordinaires.[1].

1.1.2 Procédés de fabrication de la chaux :

La chaux (CaO) est obtenue par cuisson de pierre calcaire à une température allant de 750 à 950°C, cuisson pendant laquelle elle abandonnera son gaz carbonique. Cuire le calcaire pour le transformer en chaux s'appelle calcination. Elle est exprimée par l'équation chimique suivante :



Le produit obtenu est appelé chaux vive (oxyde de calcium CaO). Plongée dans l'eau, la chaux vive se transforme en chaux éteinte (hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$), cette opération s'appelle extinction ou hydratation. Elle est exprimée chimiquement par l'équation:



Puis grâce au gaz carbonique de l'air l'hydroxyde de calcium durcit et devient du carbonate de calcium autrement dit du calcaire. L'équation chimique s'exprime par:



Le schéma de la figure I.1 représente les différentes proportions des constituants et leurs changements de la première phase (roche calcaire) à la dernière phase qui est l'extinction. En constatant particulièrement les différents pourcentages de la silice qui se différent en matière d'action sur le comportement de la chaux, et que ce n'est pas toute la silice présentant dans la chaux pendant la calcination rentre en action avec l'hydroxyde de carbone, on ne prend alors que la silice réactive combinée, jouant le rôle de la création des composants hydratés responsables au court durcissement et donnant au liant son aspect hydraulique.

L. Vicat (1832) n'a pas pris en considération cette approche, il considérait que toute la silice présente dans la roche mère réagit avec la chaux comme c'est indiqué dans l'histogramme de la figure I.2. Celui-ci exprime l'évolution de la résistance à la compression en fonction du pourcentage de la silice combinée avec la chaux. Cette combinaison conduit à la formation des silicates bi-calciques hydratés responsables à la cristallisation du mortier et dont l'augmentation améliore la résistance à la compression et à la flexion comme c'est indiqué dans la figure I.1 [3].

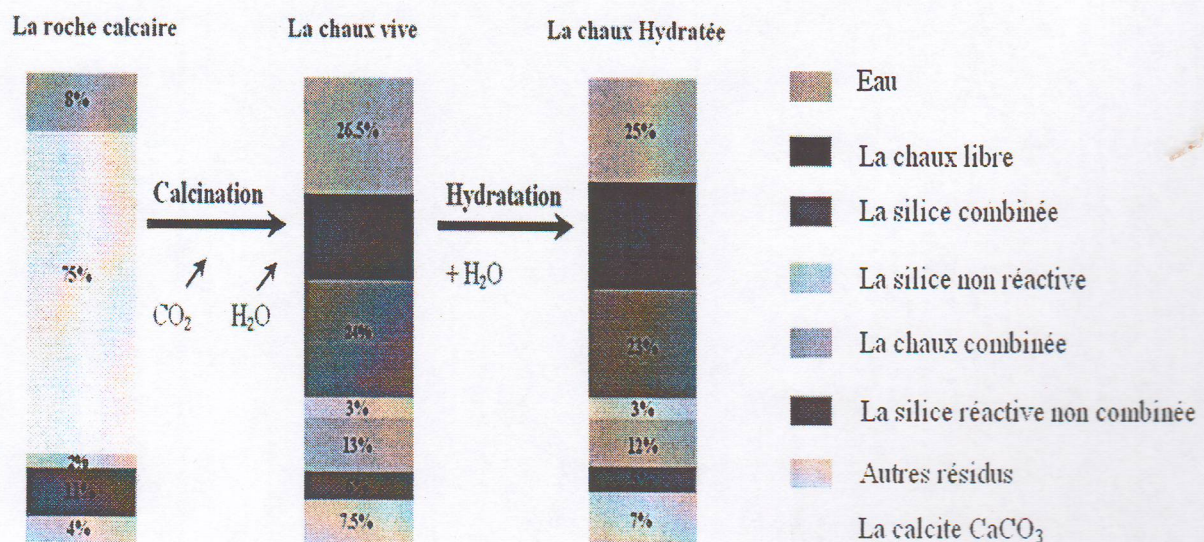


Figure I.1 : Schéma de fabrication de la chaux [2].

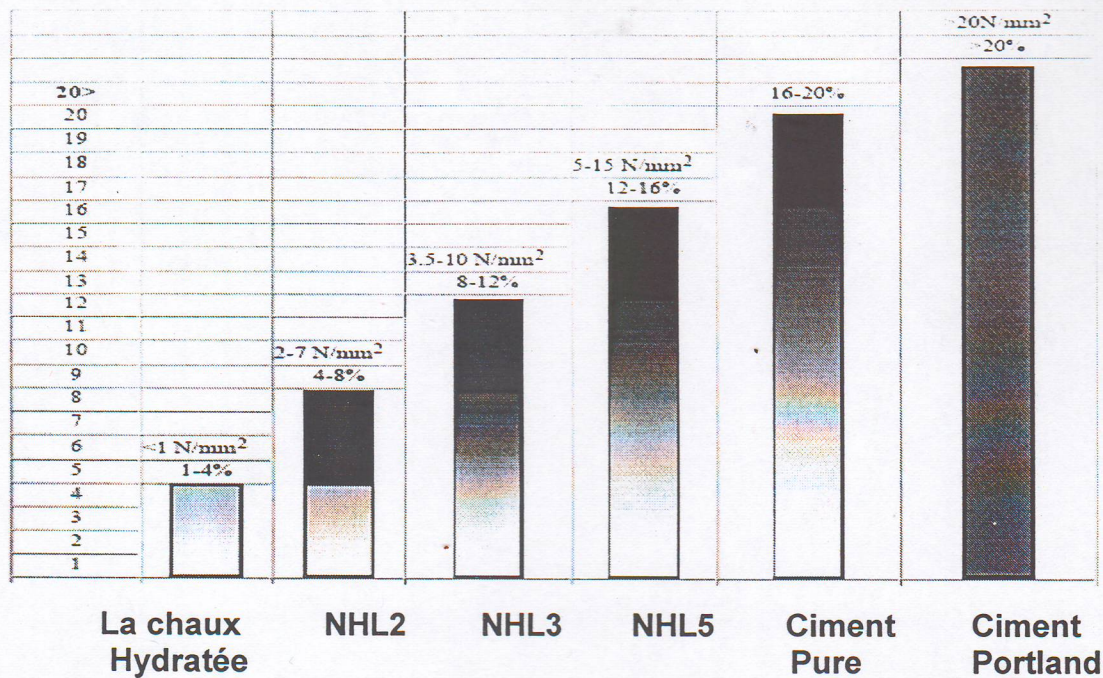


Figure I.2: Evolution de la résistance à la compression en fonction du taux de silice combinable [2].

I.1.3 Différents types de chaux et leurs classifications :

La présence de l'argile dans le calcaire provoque d'importantes modifications qui affectent la chaux aussi bien à l'extinction qu'à la prise. Suivant le pourcentage de l'argile présente dans la roche pendant la calcination, on peut distinguer deux types de chaux [3] :

- **Les chaux aériennes (CL : Calcic Lime) :**

La prise s'effectue seulement en présence du gaz carbonique de l'air (d'où la lenteur de la prise et la possibilité de conservation de grandes quantités de chaux éteinte). Les chaux aériennes se distinguent elles-mêmes en:

- **Chaux grasse** : qui est du calcaire pur, ou contient 0,1 à 1 % d'argile
- **Chaux maigre** : qui contient 2 à 8 % d'argile.

- **Les chaux hydrauliques (NHL : Natural Hydraulic Lime) :**

Elles Prennent sans l'aide du CO₂ de l'air. Un mortier fait avec de telles chaux peut durcir sous l'eau. Elles sont obtenues avec des calcaires contenant entre 8 et 20 % d'argile.

On note que les chaux hydrauliques naturelles sont calcinées comme les chaux aériennes aux mêmes conditions. Elles se distinguent principalement par leur résistance à la compression mesurée après 28j de vieillissements donnée ci-dessous :

- **Chaux faiblement hydraulique (NHL 2)**: Correspond à une résistance comprise entre 2 et 5 MPa.
- **Chaux moyennement hydraulique (NHL 3,5)**: Correspond à une résistance comprise entre 3,5 et 10 MPa
- **Chaux fortement hydraulique (NHL 5)**: Correspond à une résistance comprise entre 5 et 15 MPa.

I.2 Aperçu technique sur les mortiers :

I.2.1 Les mortiers romains :

F. Davitovits (1992) [4] a cité dans ces travaux les différentes compositions des mortiers décrites par Vitruve. Quand la chaux sera éteinte, il faudra la mêler avec du sable, dans des proportions bien définies : Soit trois parties de sable de cave, soit deux parties de sable de rivière ou de mer, contre une part de chaux. Telle est, en effet, la proportion optimale du mélange chaux/sable, qui pourra encore être améliorée si on ajoute au sable de mer ou de rivière une troisième part de tuileaux pilés et tamisés. Il s'agit ici de la première mention de l'usage de la *testa* (qui est une argile kaolinite ayant la forme d'une tuile et cuite entre 700 et 800 °C).

F. Davitovits (1992) [4] a aussi parlé de la pouzzolane, cette admirable poudre volcanique qu'on ajoute au mortier pour le faire durcir sans le CO₂ de l'air. Le liant à base de pouzzolane (une part de chaux et deux parts de poudre) était employé pour la maçonnerie des installations portuaire. Celle-ci commença à être employée au XIX^{ème} siècle au détriment des chaux aériennes. Le tableau I.1 résume quelques compositions des mortiers romains.

La réaction chimique de la *testa* avec la chaux se traduit par



Les meilleures résistances des mortiers sont obtenues pour des mélanges dans lequel le rapport (**argile calcinée / chaux**) est supérieur à 1. Le tableau I.2 donne à titre comparatif l'influence du rapport **argile calcinée/ chaux** sur la résistance à la compression à 28 jours.

Tableau I.1 Quelques recettes des mortiers romains [4]

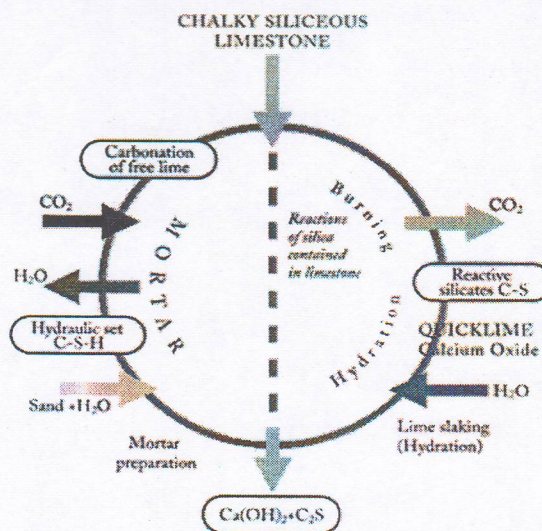
Chaux	agréats	eau
1 part de chaux	3 parts de sable de carrière	15 à 20%
1 part de chaux	2 parts de sable fluvial ou marin	15 à 20%
1 part de chaux	2 parts de sable fluvial ou marin 1 part de <i>testa</i> broyée	15 à 20%
1 part de chaux	2 parts de pouzzolane	15 à 20%

Tableau I.2 Résistance à la compression de deux formulations romaines [4]

Composition	Rc [MPa]
1 partie d'argile calcinée (testa) 1 partie de chaux (rapport=1)	10
2 parties d'argile calcinée (testa) 1 partie de chaux (rapport=2)	14.5

I.2.2 Les mortiers de chaux :

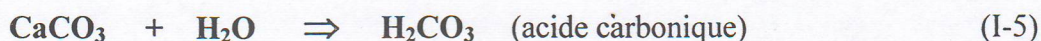
Le mortier de chaux est un matériau composé principalement du liant (chaux), du sable et de l'eau dans des proportions convenables afin de satisfaire aux divers besoins techniques et économiques. Le cycle représenté par la figure I.3, résume les différentes étapes de préparation du mortier de chaux de l'étape de calcination de la roche silico-calcaire jusqu'au processus de durcissement par hydratation et formation des C-S-H puis par carbonatation de la chaux libre.

**Figure I.3** : Schéma de préparation de la chaux et du mortier de chaux [2].

1.2.2.1 Processus de durcissement des mortiers de chaux :

- *La prise aérienne (réaction de carbonatation) :*

Quand un matériau à base de liant hydraulique est exposé à l'air, le dioxyde de carbone (CO_2) présent en moyenne de 0,035 % en volume dans l'air, réagit en présence d'eau avec la Portlandite $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pour former du carbonate de calcium ou calcite (CaCO_3) comme produit final [5]:



Le mécanisme réactionnel est cependant relativement complexe. La carbonatation est une réaction qui a lieu en milieu aqueux, par réaction du dioxyde de carbone dissous dans la solution contenue dans les pores avec la Portlandite. En fonction du pH de la solution, le dioxyde de carbone peut se trouver sous des formes différentes comme le montre la Figure I.4

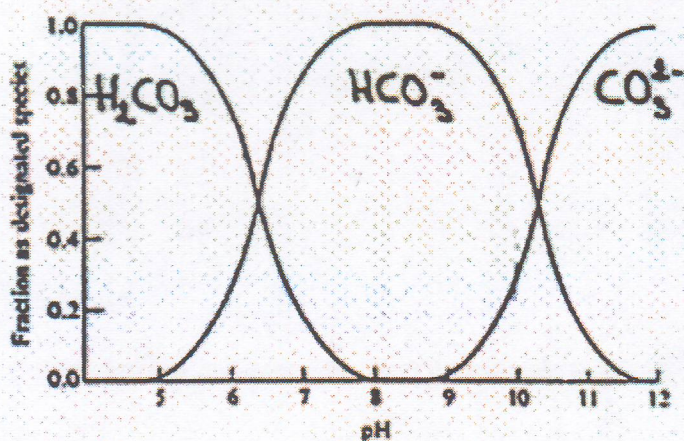
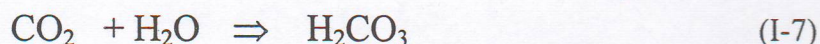
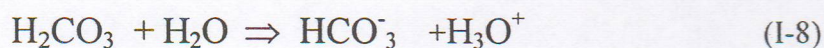


Figure I.4 Formes sous lesquelles le dioxyde de carbone est dissous d'après Valsaraj [6].

Dans les solutions dont le pH est inférieur à 4 il forme de l'acide carbonique:



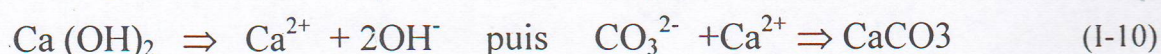
Si le pH de la solution est compris entre 6 et 10,5 la forme principale obtenue par dissociation est. l'ion bicarbonate:



Si le pH de la solution est supérieur à 10,5 l'espèce majoritaire en solution est l'ion carbonate:



Dans les conditions où le pH des solutions des pores de matériaux à base de liant hydraulique est supérieur à 12, les ions carbonates réagissent avec le calcium issu de la dissolution de la Portlandite pour former du carbonate de calcium précipité:



- *La Prise hydraulique*

Cette prise est évaluée selon le taux d'argile contenu dans la roche mère ; si la pierre de la carrière contient de l'argile, la cuisson va combiner la chaux avec la silice et l'alumine de l'argile pour former des silicates et aluminates de chaux. Les chaux hydrauliques conservent une part variable de chaux aérienne. La prise aérienne d'une chaux hydraulique représente environ 30% de sa prise.

- *La prise pozzolanique*

La prise pozzolanique est l'aptitude de certains matériaux dépourvus de propriétés hydrauliques propres, à fixer l'hydroxyde de calcium en présence d'eau pour donner des hydrates analogues de ceux du ciment portland. Cette propriété se constate à des degrés variables dans les matériaux riches en silice libre non quartzeuse, quelque soit leur origine : matériaux naturels (gaize, diatomite, cendre volcanique) matériaux artificiels (cendre volante, fumées de silice, argile calcinée, cendre de balles de riz). L'action pozzolanique se caractérise par deux aspects distincts [7 à 13]

- La quantité totale d'hydroxyde de calcium qu'une pouzzolane est capable de fixer
- La rapidité de fixation d'hydroxyde de calcium par la pouzzolane.

1.2.2.2 comportement simultané des mortiers mixtes chaux-ciment :

La figure I-5 indique toute la série de propriétés des mortiers de ciment et de chaux cités dans la norme [ACNOR A179]. Dans le cas extrême, le mortier contenant uniquement du ciment et celui qui possède une forte résistance à la compression et un faible pouvoir de rétention d'eau. Un mur construit avec ce mortier est très solide mais peut permettre à la pluie de s'infiltrer. A l'autre extrême, le mortier de chaux a une faible résistance mécanique à la compression et un fort pouvoir de rétention d'eau. Un mur construit avec ce mortier aura une résistance mécanique inférieure, en particulier la résistance initiale, mais il devrait avoir une meilleure résistance à la pénétration de la pluie. Entre ces deux extrêmes, il existe diverses

combinaisons de ciment et chaux capables de donner au mortier toute une gamme de propriétés intéressantes dues aux avantages de chaque liant c'est-à-dire une forte résistance mécanique et une prise rapide (ciment) modifiées par une ouvrabilité et un pouvoir de rétention d'eau excellents (chaux). Le concepteur qui sait exactement quelles qualités il veut obtenir ne devrait pas avoir de difficultés à trouver quel mortier il lui faut en se référant à la figure I-4. Le point d'intersection des deux courbes, qui indique le mortier possédant la plus forte résistance mécanique compatible avec un pouvoir de rétention d'eau optimal, se trouve dans les limites d'un mortier de type N. Ceci explique l'utilisation fréquente du mortier de ciment et de chaux 1:1:6. [14].

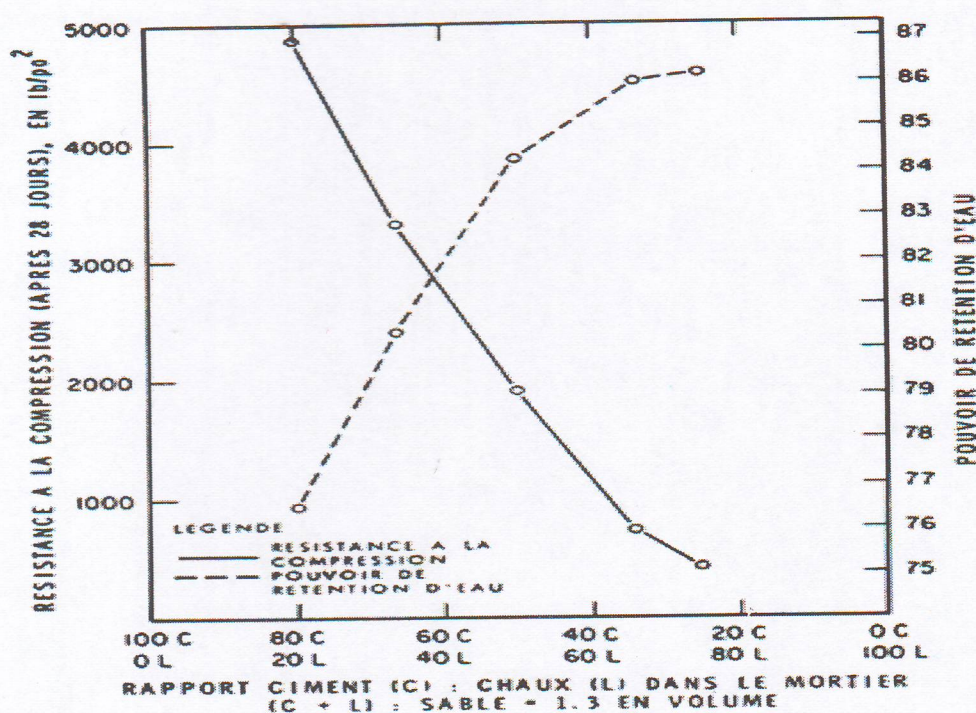


Figure I-5 Relation entre la composition du mortier de chaux, la résistance à la compression et le pouvoir de rétention d'eau selon la norme [ACNOR A179]. [14]

I.2.2.3 Quelques travaux de recherche sur les mortiers de chaux :

- Etude expérimentale sur l'effet pozzolanique des déchets de briques et tuiles cuites sur les propriétés mécaniques des mortiers de ciment :

○

U. Chinje melo et N. Billong [15] ont étudié l'effet des fines de briques et tuiles cuites sur l'activité pozzolanique des ciments Portland artificiel. La chaux hydratée (portlandite) formée lors de l'hydratation des composés du ciment réagit avec le matériau pouzzolanique (fines de

briques) pour donner les silicates, aluminates et aluminosilicates de calcium hydraté responsables de l'augmentation de la résistance. En étudiant la réactivité des poudres fines de quelques échantillons en présence de la chaux et d'eau. L'indice d'activité pouzzolanique a été déterminé par la vérification des résistances en compression des mortiers de ciment contenant des proportions définies de ces fines par rapport aux résistances d'autres mortiers de ciment ne contenant pas ces ajouts ou contenant de la cendre volcanique réactive dans les mêmes proportions. Ils ont conclu d'après les résultats trouvés que les fines de briques (**Argile calcinée**) présentent une action pozzolanique plus élevée que celles d'autres matériaux avec une augmentation notable en résistances mécaniques.

- *Effet de différents types de composants hydrauliques et pozzolaniques sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers de chaux :*

P. RODRIGUES, F.HENRIQUES [16] ont étudié l'influence de certains matériaux hydrauliques sur les performances physico-mécaniques des mortiers de chaux ayant tous la même proportion volumique (une part de chaux contre deux parts de sable) et avec la même consistance. Les matériaux utilisés sont le sable de rivière qui est pris du même lot durant toute l'expérience ; la chaux hydratée pure **li**, la pozzolane **poz**, la cendre volante **fly**, poudre de céramique et de kaolin calcinées à 600°C et 800°C (**cer600**, **cer800**) et (**kao600**, **kao800**). Après démoulage, les éprouvettes d'essais (4x4x16) sont curées dans deux ambiances - ambiance sec (**D**) et ambiance humide (**H**) (boîte plastique hermétiquement fermée avec de l'eau au fond de la boîte pour conserver une humidité maximale).

La métakaolinite est une pouzzolane de synthèse couramment utilisée dans le domaine de génie civil. Elle est le résultat de la calcination de la kaolinite. Cette calcination incomplète synthétise ce type de pouzzolane qui est très réactive avec l'hydroxyde de calcium.

Les composées ainsi formées, par exemple, les C-S-H et les hydrates alumino-silicatés ont pour effet de diminuer la porosité des mortiers et des bétons et favorisant ainsi la durabilité des ouvrages. La plus grande résistance à la compression (**8Mpa**) a été marquée par l'argile calciné à 800°C (**Kao800H**), avec un faible coefficient d'absorption ($0.08 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$), contrairement à la pouzzolane **PozH** qui marque une très faible résistance à la compression (**1.3 MPa**) et une forte valeur du coefficient d'absorption ($0.54 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{1/2}$). La formulation optimale retenue est celle (1/1/4) (chaux/composant hydraulique/ sable) dont les résultats sont présentés dans les deux tableaux I.-4 et I-5.

Tableau.I.3 Différentes formulations (en volume) et différentes cures [16]

mortier	chaux	Poz	Fly	Cer600	Cer800	Kao600	Kao800	sable	Flow test	cure
	1							2	67	D
Poz1	1	0.5						3	70	D
Poz2	1	0.5						3	70	H
PozD	1	1						4	67	D
PozH	1	1						4	69	H
Poz5	1	1.5						5	71	D
Poz6	1	1.5						5	75	H
Fly	1		0.5					3	73	D
Fly	1		0.5					3	69	H
Fly	1		1					4	70	D
Fly	1		1					4	70	H
Fly	1		1.5					5	75	D
Fly	1		1.5					5	71	H
Cer600	1			0.5				3	72	D
Cer600	1			0.5				3	71	H
Cer600	1			1				4	70	D
Cer600	1			1				4	74	H
Cer600	1			1.5				5	70	D
Cer600	1			1.5				5	70	H
Cer800	1				0.5			3	72	D
Cer800	1				0.5			3	74	H
Cer800	1				1			4	77	D
Cer800	1				1			4	70	H
Cer800	1				1.5			5	70	D
Cer800	1				1.5			5	71	H
Kao600	1					0.5		3	71	D
Kao600	1					0.5		3	71	H
Kao600	1					1		4	72	D
Kao600	1					1		4	72	H
Kao600	1					1.5		5	69	D
Kao600	1					1.5		5	73	H
Kao800	1						0.5	3	69	D
Kao800	1						0.5	3	71	H
Kao800	1						1	4	74	D
Kao800	1						1	4	71	H
Kao800	1						1.5	5	72	D
Kao800	1						1.5	5	73	H

Tableau.I.4 Module de Young, résistance à la flexion, résistance à la compression [16]

Mortier	Li 0	pozD	pozH	flyH	flyD	Cer 600D	Cer 600H	Cer 800D	Cer 800H	K 600D	K 600H	K 800D	K 800H
E (MPa)	2638	3502	6087	2311	2691	4639	-	2057	-	3903	3672	2444	5232
R _f (MPa)	0.17	0.14	0.17	0.26	0.52	0.21	0.2	0.36	0.22	0.69	0.8	0.57	1.07
R _c (MPa)	0.7	1	1.3	0.7	2.4	0.7	2	1.4	2.2	3.8	7	2.9	8

Tableau.I.5 La densité, la capacité maximale d'absorption d'eau et le coefficient d'absorption capillaire [16].

Mortier	Li 0	pozD	pozH	flyH	flyD	Cer 600D	Cer 600H	Cer 800D	Cer 800H	Ka 600D	Ka 600H	Ka 800D	Ka 800H
Densité (kg/m ³)	1720	1718	1644	1832	1786	1732	1672	1737	1678	1722	1686	1688	1671
Capacité d'absorption d'eau (kg/m ²)	20.6	21.4	23.4	16.7	21.3	20.91	23.45	20.42	23.25	20.71	24.47	21.83	23.29
sorptivité Kg/m ² /s ^{0.5}	0.22	0.48	0.54	0.22	0.21	0.31	0.33	0.26	0.28	0.18	0.10	0.21	0.08

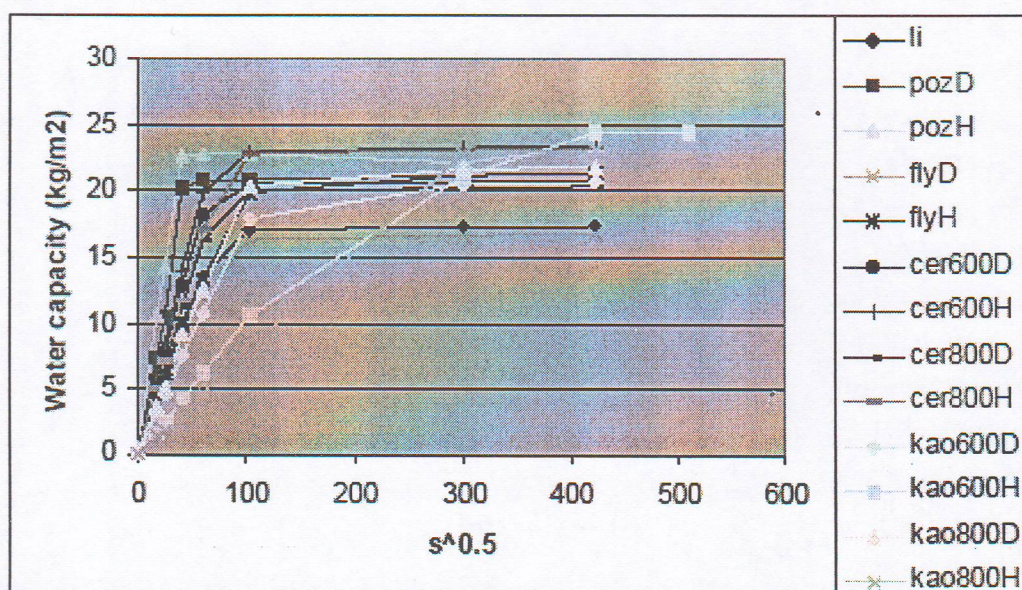


Figure.I-6 : Courbes d'absorption capillaire des différentes compositions de mortiers de chaux avec différents produits pozzolaniques [16]

- *Influence du mode de malaxage et de cure sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers de chaux:*

FERNANDO.M.A. HENRIQUES et **A.E CHAROLA** [17] ont étudié l'influence du mode de malaxage et de cure sur les propriétés physico-mécaniques des mortiers de chaux avec et sans ajout pouzzolanique. Deux types de composition de mortier ont été préparés l'une par une chaux hydratée pure (aérienne) et l'autre par le même type de chaux mais adjuvantée par la pouzzolane.

- La première composition : (1 / 4) chaux /sable
- La deuxième composition : (1 /1 / 4) chaux /pouzzolane/ sable

On soumet les deux compositions à deux modes de malaxage selon les normes : BS 4551 [18] et EN196-1 [19] et à deux types de conservations selon les normes : BS 4551 et CSTB [20,21] conformément aux tableaux (I.6) et (I.7).

Tableau I.6 Mode de préparation selon les normes BS4551 et EN196-1 [17]

BS4551	EN196-1
-Mélanger à sec pendant 30s	-Mélanger la chaux et l'eau 30s à vitesse 1
-Mélanger en versant de l'eau pendant 30s	-Mélanger avec le sable 30s à vitesse 1
-Mélanger le tout pendant 60s	-Mélanger le tout 30s à vitesse 2
-Arrêt du malaxage pendant 10 min	- Arrêt du malaxage pendant 1mn,30 s
-Redémarrage du malaxage pendant 60s	- Redémarrage du malaxage pendant 60s

Tableau I.7 Mode de conservation selon BS4551 et CSTB [17]

BS4551	CSTB
- Placer les moules dans des sachets plastiques à 20° durant 1 à 3 jours - On les déplace dans une chambre saturée à 20°C	-à 20°C et 50% d'humidité relative

Chaque éprouvette est identifiée par deux lettres, la première indique le mode de préparation et la deuxième indique le mode de conservation selon les normes indiquées ci-dessus :

BB: chaux –sable- pouzzolane, préparé selon BS et conservé selon BS.

bb : chaux- sable, préparé et conservé selon les même normes.

BC: chaux -sable -pouzzolane, préparé selon BS et conservé selon CSTB.

bc : chaux -sable, préparé et conservé selon les même normes.

EB : chaux -sable -pouzzolane, préparé selon EN et conservé selon BS.

eb : chaux- sable, préparé et conservé selon les même normes.

EC : chaux- sable- pouzzolane, préparé selon EN et conservé selon CSTB.

ec : chaux -sable, préparé et conservé selon les même normes.

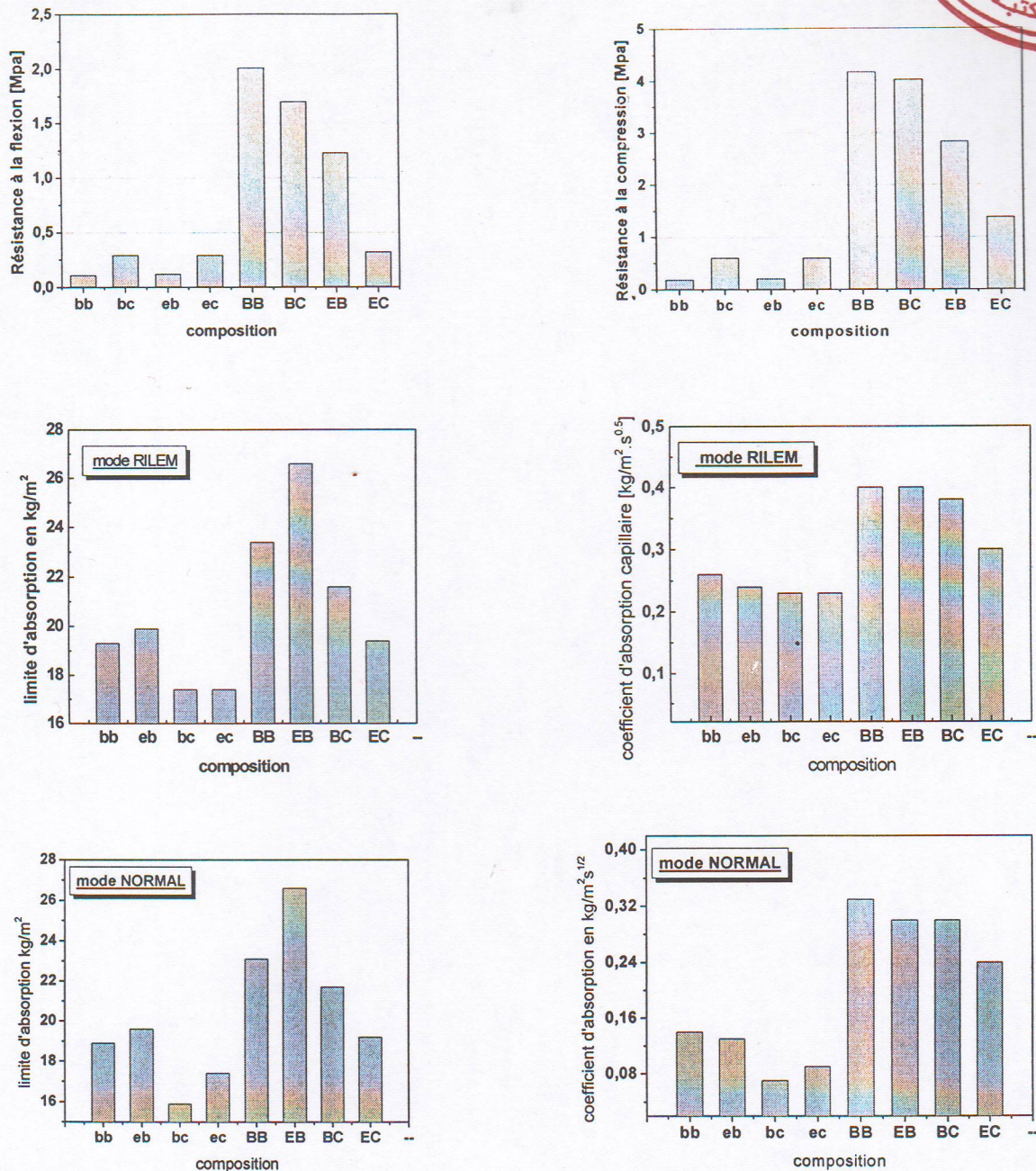


Figure.I.7 Histogrammes des propriétés mécaniques et d'absorption Capillaire [17]

Les modes de préparation et de conservation jouent un rôle important dans l'amélioration des propriétés mécaniques des mortiers de chaux avec pouzzolane. Cela est dû à l'adjonction de la chaux aérienne avec le matériau pozzolanique. D'après la figure I-7, les propriétés mécaniques sont meilleures pour le mode de malaxage et de conservation établis selon la norme britannique. Le test d'absorption par capillarité a été réalisé selon les deux modes : RILEM II.6 [22] et NORMAL 11/85 [23] (figure I-7). Ces deux normes se différencient par leur mode de pose des éprouvettes, la première consiste à immerger 2mm le fond de

l'échantillon tout en imperméabilisant les facettes latérales contre les infiltrations d'eau. La deuxième méthode est identique à la première, sauf que l'éprouvette est posée sur un papier filtre saturé d'eau. Les résultats de cet essai sont regroupés dans la figure I-7.

On remarque que les mortiers avec pouzzolane présentent des coefficients d'absorption et des taux d'absorption plus élevés que ceux dépourvus de pouzzolane cela du à la création d'une microstructure interconnectée, autrement dit, d'un réseau poreux continu qui favorise l'ascension capillaire.

- *Effet de la composition chimique de différents agrégats sur les propriétés physico mécaniques des mortiers de chaux :*

[J. Lanas, J.L. Pérez Bernal, M.A. Bello, J.I. Alvarez Galindo]. [24] ont étudié l'influence de la composition chimique de différents agrégats sur les propriétés mécaniques des mortiers de chaux. Ces mortiers sont confectionnés avec une chaux (NHL5) dont la quantité initiale en argile pendant la calcination entre 1000° C et 1250°C est de 6.5 à 20% mélangée avec différents types d'agrégats (Ag1 ; Ag2 ; Ag3 ; Ag4) de granulométries et compositions chimiques différentes (slico-calcaire et calcaire). Les mortiers sont confectionnés avec tous les types d'agrégat avec des rapports (1 :1 , 1 :2 , 1 :3 , 1 :4 , 1 :5) en gardant à chaque fois une consistance comparable pour tous les mélanges. Les agrégats utilisés diffèrent aussi de leur nature. En effet, les agrégats (Ag1 ; Ag2) proviennent des roches silico-calcaire alors que (Ag3 ; Ag4) proviennent des roches calcaires. D'après les résultats présentés dans les figures I-9 et I-10, la plus grande résistance à la compression est enregistrée avec les agrégats (Ag3 ; Ag4) cela est due effectivement à leur nature qui est chimiquement semblable à la chaux, celle-ci permet d'assurer une bonne liaison inter-faciale liant/agrégat.

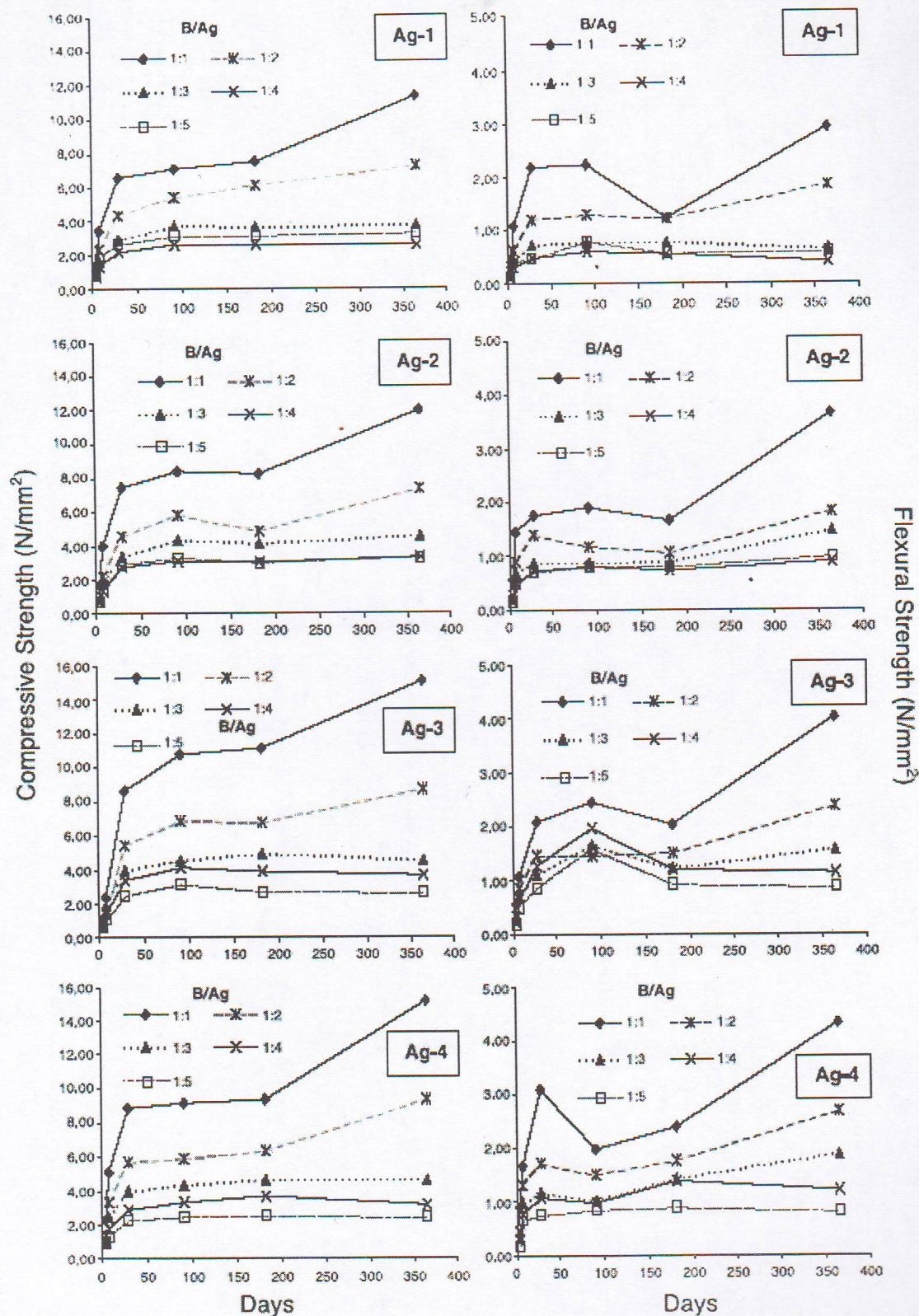


Figure.I.9 Evaluation des propriétés mécaniques des différentes compositions des mortiers de chaux [24]

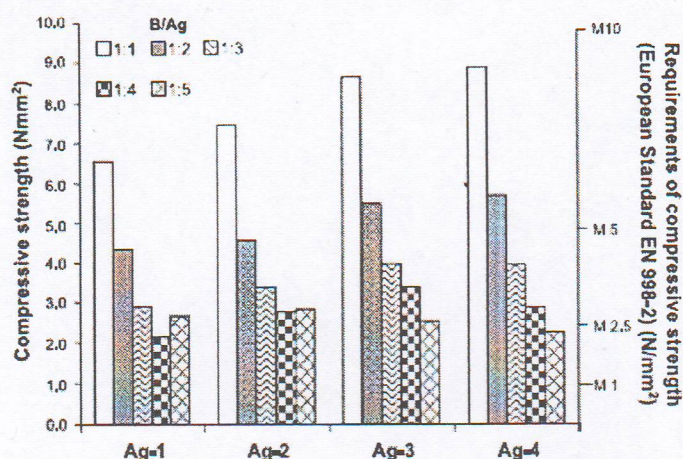
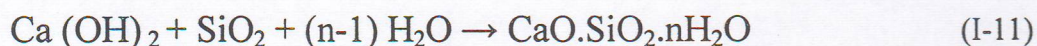


Figure.I.10 Evaluation des propriétés mécaniques des différentes compositions (à 28j) [24]

I.3 les produits à base de chaux :

I.3.1 Les briques silico-calcaire :

Une chaux aérienne et un sable de quartz servent des matériaux d'origine pour la confection des briques silico-calcaire. La chaux utilisée est une chaux hydratée vive broyée, partiellement ou totalement gâchée. Dans les conditions normales, le sable dans le mélange chaux-sable est pratiquement inerte et n'entre pas en réaction chimique avec la chaux. Dans une ambiance normale, les mortiers de chaux n'acquièrent leur résistance que par le durcissement de la chaux en particulier. Mais, en autoclave ($T \approx 170^\circ\text{C}$, $P \approx 11$ bars et $HR=100\%$), la silice du sable devient chimiquement active et commence à réagir rapidement avec la chaux suivant la réaction suivante [25].



Les briques silico-calcaire de Boussàada par exemple sont formées d'un mélange en proportion convenable de sable siliceux et de chaux aérienne vive. Le sable est déversé en tas et repris par des bandes transporteuses qui l'amènent dans des tamiers d'attente. D'autres matériaux peuvent remplacer totalement ou partiellement le sable, à savoir le laitier de haut fourneau, cendres volantes, schistes ... De la chaux vive CaO lui ajoutée à raison de 5 à 12 %

en poids à l'aide de balances doseuses pondérales. Le mélange chaux vive et sable est déversé dans un premier mélangeur : on y ajoute une certaine quantité d'eau, ainsi que les colorants (à l'aide de pigments minéraux, si les produits sont teintés). Après cette première homogénéité, le mélange est envoyé dans des silos tracteurs ou dans des « réacteurs » où il séjournera de 2 à 4 heures. Ce temps est nécessaire pour que la chaux vive (CaO) puisse s'éteindre et donner de la chaux hydratée $\text{Ca}(\text{OH})_2$. La matière homogène de consistance sèche est déversée dans des moules où elle est fortement comprimée par des presses puissantes capable de la compacter ou de la vibro-comprimer sous des pressions de 150 à 500 kg/cm^2 . La consistance du matériau est faite qu'il peut être immédiatement démonté. Les produits « crus » sont empilés sur chariots puis enfermés dans des autoclaves pouvant atteindre 2 à 3 m de diamètre et de 10 à 30 m de long. Le traitement s'effectue sous des pressions variables de 10 à 15 atmosphères et dures de 4 à 8 heures dont 1 heure pour la montée en température et 1 heure pour la descente [26].

Tableau.I.8 Propriétés physico mécaniques de la brique de Boussaâda [26] :

Principales Caractéristiques	Normes	Unités	Valeur Moyenne
- Résistance à l'écrasement	DIN 106	N/mm^2	15
- Poids	DIN 106	KG	2,4
- Dimensions	DIN 106	mm	240-115-50
- Masse volumique	DIN 106	Kg/m^3	1700
- Absorption par immersion totale (48 h 00)	Méthodes Standards	%	≤ 14
- Isolation acoustique	Normes Belge	dB	
100 – 315 HZ			38
400 – 1250 HZ			50
1600 – 3150 HZ			65
- Tenue au feu	Normes Belge	Temps	2 h 30 mn
- Isolation thermique		/	Bonne
- Résistance au gel & dégel		/	Bonne

1.3.2 Briques en béton de chanvre :

Les briques de chanvre sont composées de la chaux aérienne et de particules de chènevottes qui sont issues de la fragmentation de l'intérieur des tiges de chanvre. La structure cellulaire et la composition de la chènevotte se rapprochent de celles de certains bois légers. La grande porosité des particules leur donne notamment des propriétés d'absorption et hygroscopiques particulières qui se répercutent sur les propriétés des bétons de chanvre. La chènevotte se

présente sous la forme de petits copeaux de bois de chanvre d'une longueur de 5 à 15 mm et d'une épaisseur inférieure à 1mm. La masse volumique de la chènevotte en vrac est d'approximativement 110 kg/m^3 alors que celle des copeaux est d'environ 340 kg/m^3 dans des conditions ambiantes de température et d'humidité. La chaux utilisée est une chaux éteinte ayant une teneur en hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ de 97,2 %.

La chènevotte possède aussi des propriétés thermiques intéressantes que l'on a cherché à exploiter en l'utilisant comme matériau de construction. On a donc cherché à l'associer à des liants minéraux afin d'obtenir ce que l'on a appelé le "béton de chanvre". L'isolation phonique est comparable à de nombreux systèmes traditionnels mais par contre l'isolation thermique n'est pas encore compétitive [27].

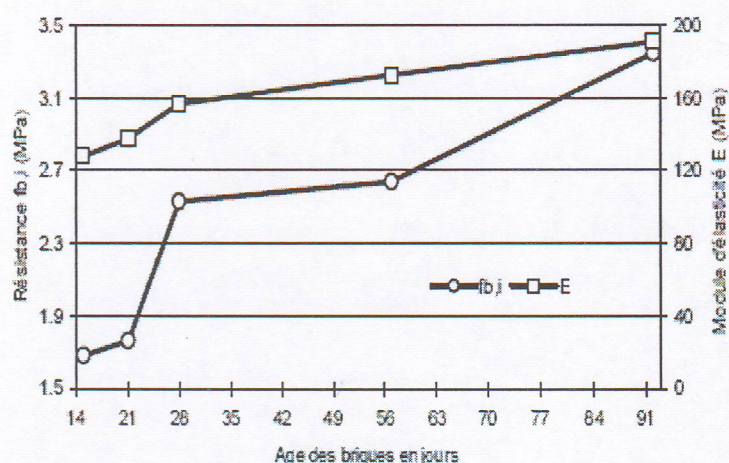


Figure.I.11 Evolution des caractéristiques mécaniques des briques de chanvre [27]

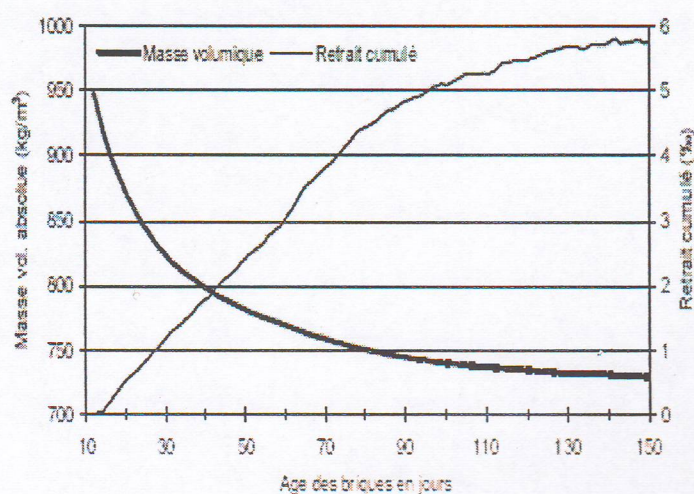


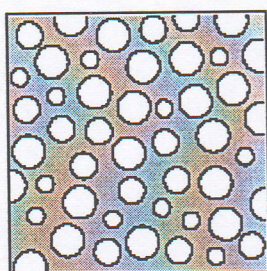
Figure.I.12 variation de la masse volumique absolue et de retrait des briques de chanvre [27]

I.4 Revue bibliographique sur les bétons légers :

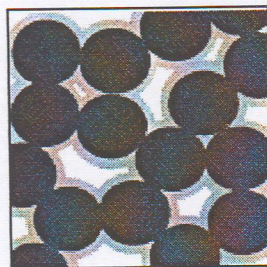
I.4.1 Définition et types de bétons légers:

Les bétons légers sont des bétons à haute porosité et dont la masse volumique se situe dans les limites de 500 à 1800 kg/m³. Ils peuvent être constitués de granulats légers ou lourds et de liants hydrauliques ou de résines synthétiques (époxydes mousse polyuréthane, etc.).

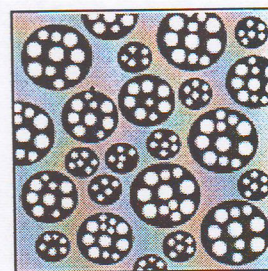
On diminue la masse volumique du béton en substituant une certaine quantité de matériau solide par de l'air. Les trois endroits possibles pour incorporer de l'air dans le béton sont : dans la matrice (béton cellulaire), entre les gros granulats (béton caverneux ou sans fines, c à d. sans sable) et dans les granulats (béton de granulats légers). La figure I.13 illustre ces trois types de béton **SHORT ET KINNIBURGH [28]**.



Béton cellulaire



Béton caverneux



Béton de granulats légers

Figure.I.13 Représentation schématique des différents types de béton léger,
D'après **SHORT ET KINNIBURGH [28]**

I.4.2 Classification et Caractéristiques des bétons légers :

L'augmentation de la porosité affecte la résistance du matériau. Le guide ACI 213R-87 [29] distingue alors trois catégories de bétons légers, classées selon la masse volumique du matériau durci voir Figure I.14.

- le béton de granulats légers de structure dont la masse volumique est comprise entre 1350 et 1900 kg/m³ : comme son nom l'indique, ce béton est utilisé pour des applications structurales et présente une résistance à la compression minimale de 17Mpa.
- le béton léger de faible masse volumique : sa masse volumique est comprise entre 300 et 800 kg/m³ et il n'est pas utilisé pour des applications structurales, mais surtout comme isolant thermique.

- le béton de résistance moyenne se situe entre les deux 800-1350 kg/m³: sa résistance à la compression est comprise entre 7 et 17MPa et ses caractéristiques d'isolation thermique se situent entre celles du béton léger et celles du béton structural léger.

On signale également qu'il y'a d'autre classifications qui déterminent les limites admissibles de certains propriétés physico mécaniques notamment, la masse volumique et la résistance à la compression

Le tableau I.9 donne les propriétés physicomécaniques et thermiques de certaines catégories de bétons légers.

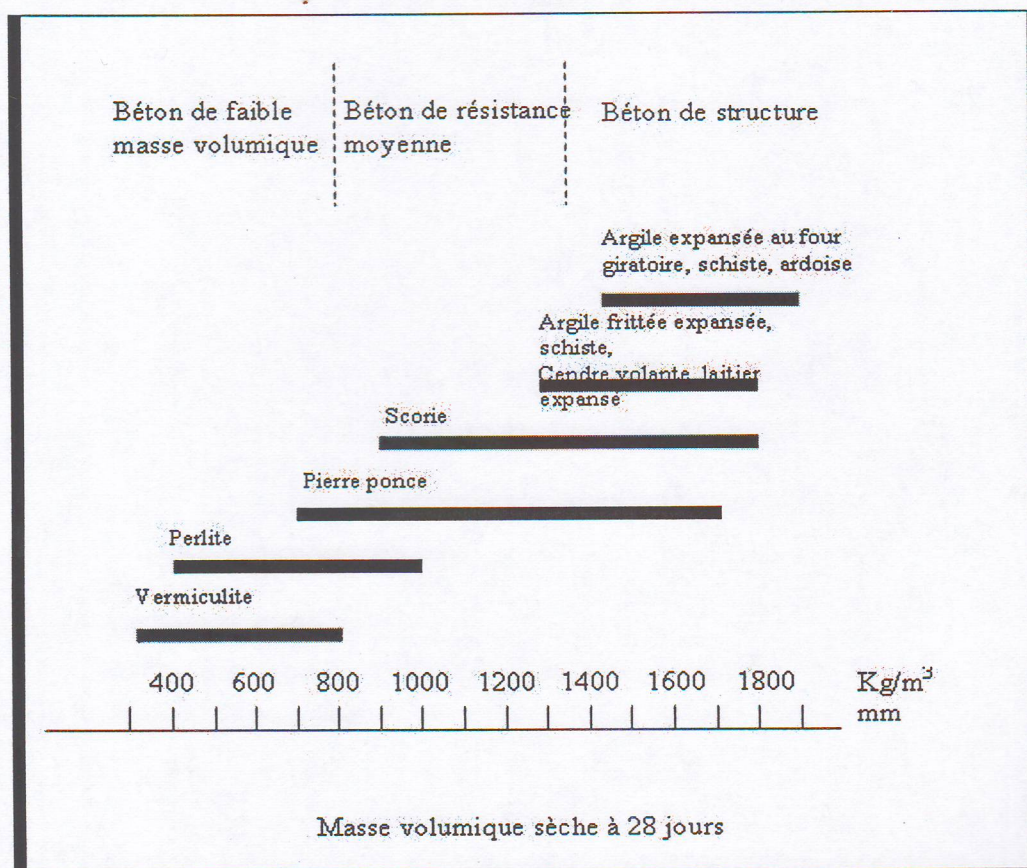


Figure I.14 Classification des bétons légers selon la norme (ACI 213R-87) [29]

Tableau I.9 Quelques propriétés physico mécaniques et thermiques des bétons légers

Type de Béton	Taille des granulats	Masse volumique globale des granulats (Kg/m ³)	masse volumique sèche du béton (Kg/m ³)	résistance à la compression à 28 jours (MPa)	retrait de Séchage (µm/m)	conductivité thermique (W/m/K)
laitier expansé	Fin	900	1850	21	500	0,69
	Grossier	650	2100	41	600	0,76
argile expansée au four giratoire	Fin	700	1200	17	600	0,38
	Grossier	400	1300	20	700	0,4
Argile expansée au four giratoire avec sable naturel	Grossier	400	1500	20	-	0,57
			1600	35	-	-
			1750	50	-	-
			1900 *	70 **	-	-
argile frittée expansée ardoise expansée au four giratoire	Fin	1050	1500	25	600	0,55
	Grossier	650	1600	30	750	0,61
	Fin	950	1700	28	400	0,61
	Grossier	700	1750	35	450	0,69
cendre volante frittée	Fin	1050	1500	25	300	-
	Grossier	800	1540	30	350	-
			1770	40	400	-
cendre volante frittée avec sable naturel			1700	25	300	-
	Grossier	800	1750	30	350	-
			1790	40	400	-
pierre ponce		500-800	1200	15	1200	-
			1250	20	1000	0,14
			1450	30	-	-
perlite		40-200	400-500	1,2-3	2000	0,05
vermiculite		60-200	300-700	0,3-3	3000	0,1
cellulaire	Cendre Volante	950	750	3	700	0,19
	Sable	1600	900	6		0,22
cellulaire autoclave		-	800	4	800	0,25

* Avec cendre volante et fumée de silice

1.4.3 Porosité et capacité d'absorption d'eau des bétons légers :

C'est le pouvoir d'un matériau d'absorber ou de retenir l'eau. Elle se caractérise par la quantité d'eau absorbée par un matériau sec entièrement immergé et s'exprime en pourcentage de la masse (capacité d'absorption massique) ou du volume (capacité d'absorption volumique) d'un matériau sec.

$$\omega_m = \frac{M_2 - M_1}{M_1} \times 100 \quad (\text{I-12})$$

et l'absorption volumique, en kg/m^3 , d'après la formule

$$\omega_v = \frac{M_2 - M_1}{V} \times 100 \quad (\text{I-13})$$

Où M_2 est la masse du matériau saturé d'eau, en kg ; M_1 la masse du matériau sec, en kg ; V le volume du matériau à l'état naturelle, la capacité d'absorption est toujours inférieure à la porosité réelle (totale), car une partie des pores est fermée, sans communication avec le milieu ambiant et inaccessible à l'eau. L'absorption volumique est toujours inférieure à 100% tandis que l'absorption massique pour les matériaux très poreux peut dépasser 100%. Lorsqu'on fabrique un béton avec des granulats légers, une quantité importante d'eau de gâchage peut être absorbée par les granulats, voir les figures I.15-16. Les figures I.14 et 15 présentent l'absorption d'eau et le taux d'absorption de quelques granulats légers tels que mesures par [30]. Les cendres volantes frittées, qui sont des agglomérations de microsphères, sont les plus absorbants, étant donné l'interconnexion plus élevée entre les pores. Lorsqu'on fabrique un béton avec des granulats légers, une quantité importante d'eau de gâchage peut être absorbée par les granulats. Cette absorption d'eau dépend toutefois de l'interconnexion des pores dans les granulats, du degré de saturation initial des granulats et du rapport eau/ciment de la matrice cimentaire. L'effet sur l'ensemble du matériau peut se traduire par une perte rapide de maniabilité, mais peut aussi contribuer à améliorer la microstructure de la matrice cimentaire aux interfaces pâte granulats par un effet de filtration [31-36].

Certains moyens tels que le pré mouillage ou l'utilisation d'un traitement de surface visant à réduire l'absorption des granulats s'avèrent très efficaces pour diminuer la perte de maniabilité des bétons légers. Le tableau I-9 présente quelques valeurs de conductivité thermique de bétons légers séchés au four. L'humidité absorbée par le béton augmente considérablement sa conductivité thermique. Dans le cas de bétonnage de grande masse de béton léger, il est

important de noter que sa faible conductivité thermique se traduit par un plus faible transfert de chaleur au milieu ambiant.

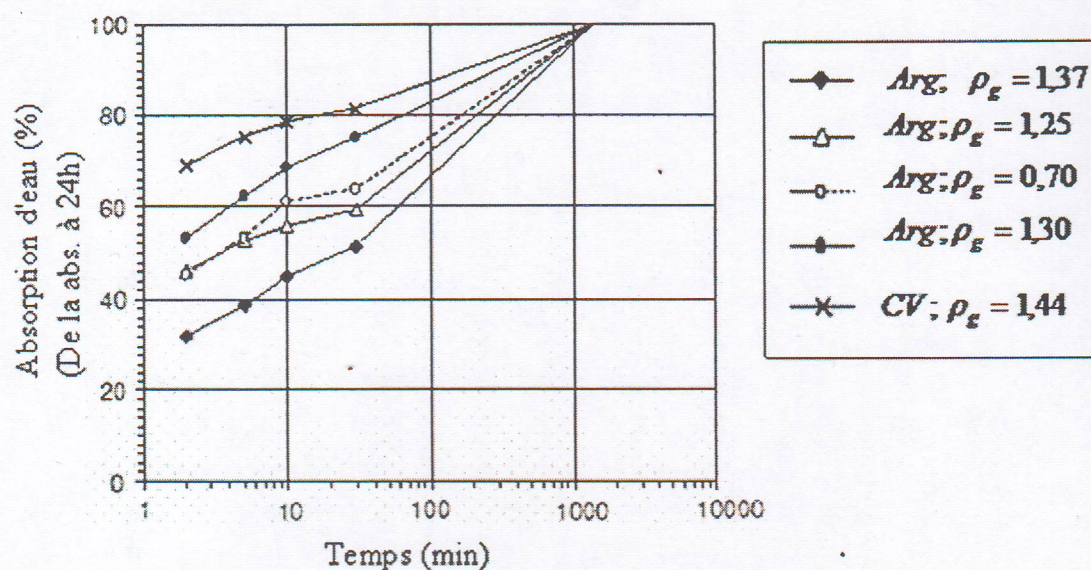


Figure I.15 Taux d'absorption en fonction du temps des granulats d'argile expansés bouletés (Arg.) et de cendres volantes frittées (CV); granulats 4/8 mm, densité apparente ρ_g [30]

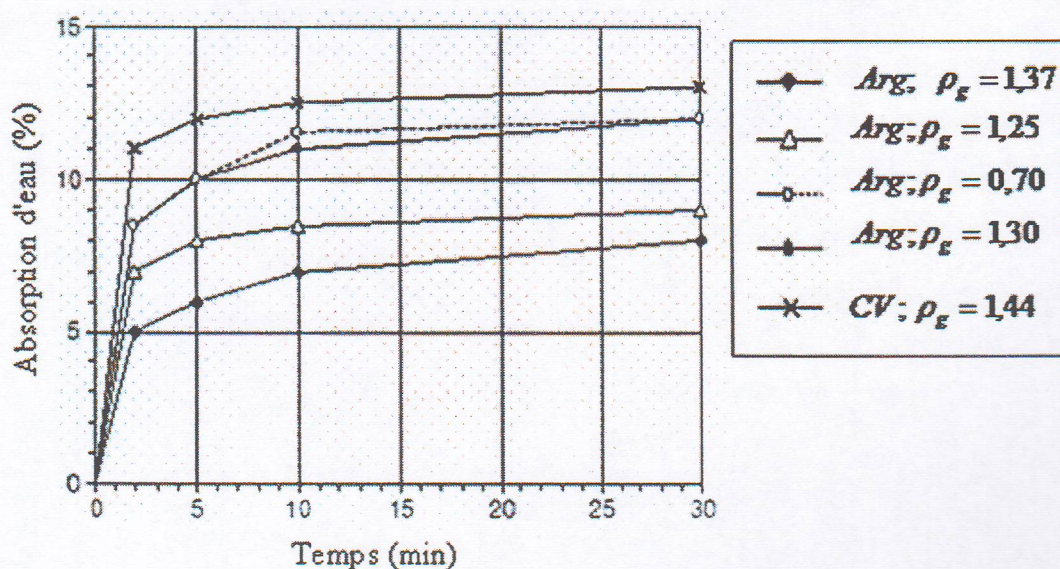


Figure I.16 Absorption d'eau en fonction du temps des granulats d'argile expansés bouletés (Arg.) et de cendres volantes frittées (CV); granulats 4/8 mm, densité apparente [30]

1.4.4 Relation entre porosité et performances mécaniques :

Les niveaux de performances des bétons légers sont inférieurs à ceux des matériaux usuels de construction, puisque les granulats légers possèdent une porosité propre, qui les rend déformables. D'une manière générale, la résistance en compression à 28 jours et le module d'élasticité E augmentent lorsque la porosité des granulats n diminue. Des campagnes expérimentales ont mis en relation performances mécaniques et masse volumique des bétons légers. Dans le cas de granulats d'argile expansée de type Liapor, [ARNOULT, 76] a obtenu une relation linéaire entre la résistance en compression et la masse volumique.

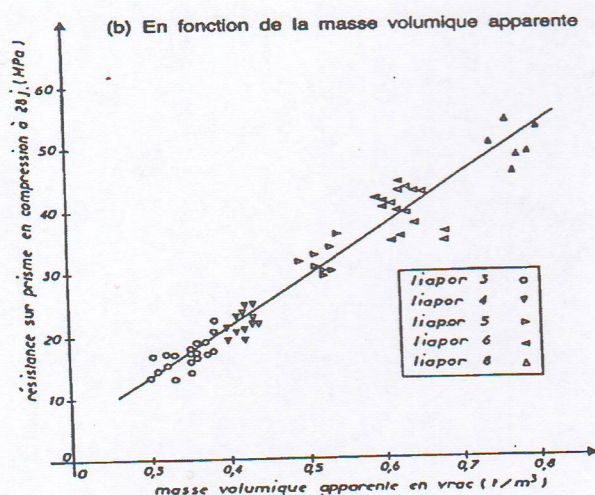


Figure I.17 Résistance sur prisme en compression à 28 jours (MPa)
en fonction de ρ [ARNOULD, 76]

Dans le cas du béton cellulaire, la grande proportion de vides d'air dans le matériau est un facteur essentiel dans le niveau de performances. On distingue deux types de pores : les macropores (diamètre supérieur à $60 \mu\text{m}$) et les micropores (diamètre $< 60 \mu\text{m}$) avec une répartition de $3/4$ de macropores pour $1/4$ de micropores. Diverses formules empiriques ont été déterminées afin de prédire la résistance en compression R_c et le module d'élasticité E du béton cellulaire autoclavé en fonction de la porosité. On obtient R_c compris entre 1 et 5 MPa et E entre 20 et 30 MPa. Cependant, il faut nuancer cette corrélation entre performances et porosité en fonction du type de granulats légers et de la quantité employée dans le matériau. En effet, si le volume occupé par les granulats est faible devant le volume de pâte de ciment, sa contribution à la résistance du matériau sera négligeable quelles que soient ses caractéristiques. En revanche, si le volume de granulats devient suffisamment important, ses propriétés piloteront les caractéristiques du matériau global.

1.4.5 Les bétons de bois :

1.4.5.1 Généralité sur la composition du bois :

A l'heure actuelle, on utilise avec efficacité les déchets de bois à côté des éléments en fibrolithe et en xylolithe, les sciures et les copeaux de bois sont employés à la fabrication des plaques et des planches pressés. Les fibres naturelles du bois sont des structures biologiques principalement composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine et certains composés inorganiques. Il existe différentes classifications de ces fibres. Les fibres dures forment un groupe à part entière qui représente 90% de la production mondiale. Ce sont ces fibres dures ou rigides qui sont utilisées lors de la fabrication des plaques pressées. La proportion d'holocellulose (cellulose, hémicelluloses) et de lignine varie beaucoup selon les fibres naturelles (jute, bois, sisal, kenaf, etc.). Chaque fibre se présente sous la forme d'un composite multicouches dans lequel la lignine joue le rôle d'une matrice enrobant un élément structurant très rigide qu'est la cellulose [37]. Ces changements dimensionnels varient selon les espèces et l'orientation des fibres du bois. Au fur et à mesure que les membranes cellulaires laissent échapper l'eau, le bois se rétracte presque en proportion directe de la perte d'eau. Autrement dit, pour chaque point de teneur en eau perdu, le bois diminue de volume à raison d'environ 1/30 de son retrait potentiel total.

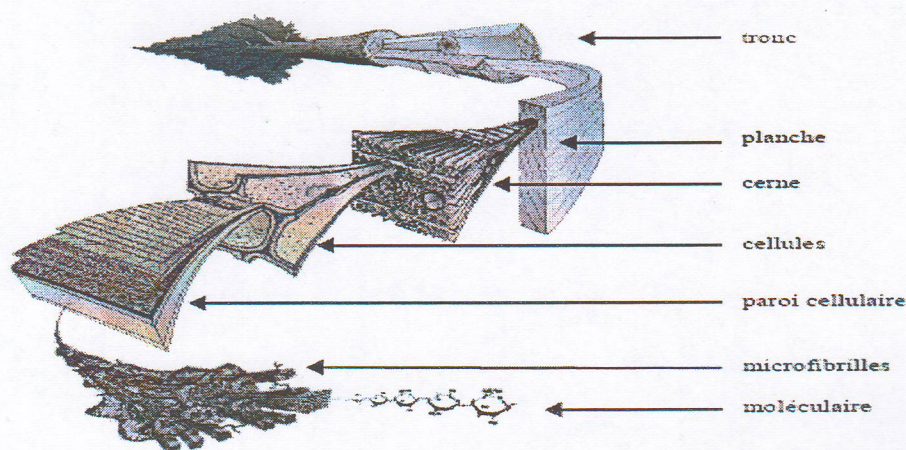


Figure I.18 Différentes échelles d'observation du matériau bois d'après [Harrington, 1999]

1.4.5.2 procédés de traitements :

Le bois était un matériau naturel peu durable, il est très judicieux de le traiter pour une utilisation humaine : résistance contre les insectes ou le pourrissement, accroître sa dureté au diminuer sa sensibilité à l'humidité. Certains traitements font appel à plusieurs techniques. Citons par exemple classé en grandes catégories :

I.4.5.2.1 Les traitements physiques :

Ils ont pour but principal de limiter les transferts d'eau avec le milieu extérieur tout en laissant le granulat chimiquement identique. Ce sont en général des traitements d'interface accompagnés d'une imprégnation plus ou moins légère du bois. Ils font appel soit un gonflement du bois soit à son enrobage ou procédé de minéralisation.

- **Le gonflement** consiste à remplir les vides cellulaires du bois au moyen de techniques d'imprégnation vide- pression. Des études réalisées avec du polyéthylène glycol ont montré une amélioration considérable du retrait [38] et des traitements avec des huiles ont permis de mettre en évidence le blocage de la libération des sucres néfastes à la prise du ciment. Les caractéristiques mécaniques et la perte d'eau du matériau composite ne semblent pas affectées par ce traitement.
- **L'enrobage** superficiel a simplement pour but d'isoler le bois en le rendant inerte vis à vis d'agents extérieurs ; les agents utilisés dans ce cas sont des hydrofuges, des hydrocarbures saturés ou non mais aussi des particules siliceuses, du bitume et des polymères synthétiques [39]
- **La minéralisation** aurait comme effet la diminution de la capacité d'absorption et l'amélioration de la tenue au feu. Elle se fait par imprégnation par des sels minéraux : chlorure de calcium de sodium ou de magnésium, sulfate d'aluminium, mélange d'une pâte de chaux et de silicate de sodium [40]

I.4.5.2.2 Les traitements thermiques :

Ils ont pour but de modifier la structure chimique du bois par action de la chaleur et vont spécialement dégrader ou extraire les hémicelluloses responsables du gonflement du bois.

- **La torréfaction** s'effectue par chauffage à 280°C maximum par un gaz inerte grâce auquel on évite la combustion. La modification chimique correspond à une dégradation des hémicelluloses plus sensibles à la chaleur la cellulose et la lignine ne se décomposent qu'à des températures plus élevées. La torréfaction conduit ainsi à un bois faiblement hygroscopique mais de couleur plus foncée.
- **L'hydrolyse** consiste à solubiliser les hémicella par un traitement à chaud (160°C) sous pression pendant 15 heures [41]. La réduction du gonflement à l'eau est alors consécutive à la création de nouvelles liaisons entre les composants chimiques des parois

I.4.5.2.3 Les traitements chimiques :

L'objectif est d'éviter la fixation des molécules par les groupements hydroxyles du bois. Divers procédés de traitement dans la masse ont été utilisés : remplacement des groupements hydroxyles par des groupements chimiques plus hydrophobes, blocage des groupements OH par estérification utilisant des agents ignifugeants, des agents d'étanchéité

I.4.5.2.4 Les traitements mixtes :

Certains auteurs ont proposé plusieurs techniques, par exemple l'association d'un traitement d'imprégnation suivi d'une compression ou encore l'association de traitements thermiques et chimiques [42] Toutefois, même si les traitements sont plus au moins efficaces en eux-mêmes, il faut toujours tenir compte des interfaces avec la matrice dans laquelle les granulats sont introduits.

I.4.5.3 Caractéristiques des bétons de bois :

Les bétons de bois appartiennent à la famille des bétons légers qui regroupe plusieurs types de produits. On désigne par (valeur cible) les valeurs des caractéristiques des bétons de bois qui ont été adoptées dans les programmes de recherche et développement présentés dans le cadre de la communauté européenne (programme aliment 2002) Ces (valeur cible) sont

- Une masse volumique de 600 à 900 kg/m³.
- Une résistance mécanique de 3,5 à 4 MPA.
- Des variations dimensionnelles maximales de l'ordre de 1 mm/m.

En fait, la première difficulté technique réside dans le caractère simultané de ces trois exigences ; la deuxième difficulté est de résoudre ce problème technique dans un cadre financier réaliste.[43]

Les principales caractéristiques quantifiables du béton de bois actuellement sur le marché (résistance en compression, Masse volumique apparente, conductivité thermique, sont résumées dans le tableau I.10 :

- **Conductivité thermique λ**

La conduction thermique λ est le flux de chaleur par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses deux faces. Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. Des mesures expérimentales sur du béton de bois ont montré que la conductivité thermique augmentait de 40 à 90 % pour des teneurs en eau de 30 %. Cependant, les variations dépendent de la masse volumique sèche puisqu'une teneur en eau massique

identique pour deux bétons de bois ne représentera pas le même volume d'eau dans chaque matériau humide. Ceci permet d'expliquer les écarts observables sur la figure.I.19

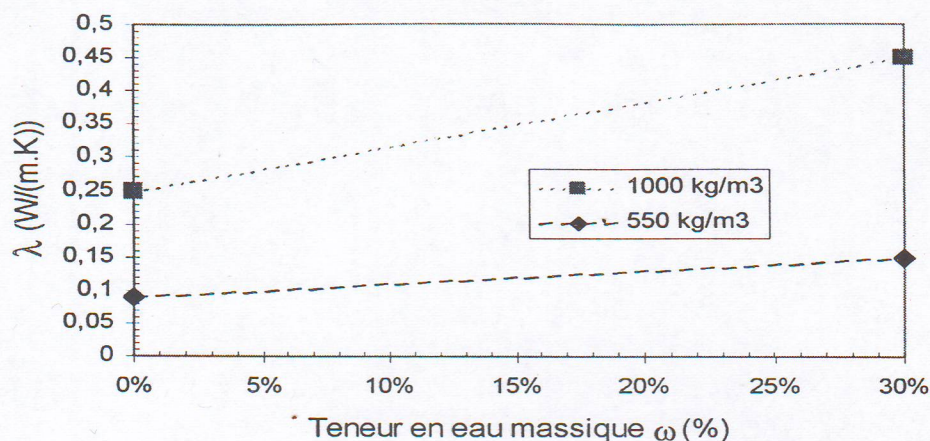


Figure I.19 Conductivité thermique sèche et humide de deux bétons de bois **DURISOL**
[KOSNY & DESJARLAIS, 94]

Pour la mesure des caractéristiques thermiques on utilise la méthode de la sonde TPS. L'essai consiste à placer en sandwich la sonde TPS et la relier à un circuit électrique. La Variation de la résistance à la borne du pont de Whestone, ΔU permet d'accéder à la différence de potentielle $\Delta E(t)$ aux bornes de l'élément TPS. Une relation entre $\Delta E(t)$ et la variation de température dans l'élément TPS peut être établie. Celle-ci est fonction de la diffusivité thermique a et de conductivité thermique λ . Un traitement mathématique approprié permet d'accéder à λ , a et ensuite c [44]

- **Propriétés acoustiques :**

Lorsqu'un son est émis, une onde acoustique se propage dans l'air jusqu'à atteindre un obstacle. Lorsque cette onde incidente rentre en contact avec un matériau, deux ondes sont créées : une onde réfléchie qui se propage dans le même milieu que l'onde incidente, une onde transmise qui traverse le matériau de part en part. Un traitement acoustique est une démarche qui va influencer soit sur l'onde transmise, soit sur l'onde réfléchie de façon à améliorer l'acoustique d'un local. Au delà de 400 Hz, le béton de bois absorbe plus de 80 % de l'énergie de l'onde incidente, ce qui traduit une atténuation très importante du son. Seul 20 % de l'énergie acoustique incidente est réfléchie par le matériau. Le pouvoir absorbant du béton de bois est deux à trois fois plus élevé que celui des autres matériaux de construction rencontrés usuellement dans le bâtiment.

- **Masse volumique :**

L'emploi de granulats légers a pour première conséquence une diminution de 20 à 30 % de la masse volumique des bétons. A titre de comparaison, la masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2300 kg/m^3 alors qu'elle se situe autour de 1600 kg/m^3 pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900 kg/m^3 pour un béton de bois et qu'elle varie entre 350 et 650 kg/m^3 pour un béton cellulaire (norme NF P 14-306). L'intérêt est d'avoir un matériau facile à mettre en œuvre lorsqu'il est vendu manufacturé sous forme de parpaings. De plus, ce matériau allégé nécessite des fondations moins importantes lors de la construction.

- **Résistance mécanique :**

A défaut de norme spécifique sur le béton légers prêts à l'emploi, la résistance mécanique du béton de bois peut être appréciée par comparaison avec la norme NF P 14-304 « blocs en béton de granulat léger pour mur et cloisons ». Pour des blocs pleins, celle-ci prévoit trois classes de résistance à la compression : 3,5-4,5 et 7 MPa aucune valeur ne doit être inférieure à, respectivement 2,8 - 3,6 et 5,6 MPa. Ces valeurs de résistance sont relatives à des bétons de masse volumique inférieure à 1700 kg/m^3 . La résistance mécanique en compression des bétons de bois est, quelle que soit la masse volumique apparente, sensiblement plus faible que celle des bétons légers. Elle semble évoluer actuellement de 0,5 à 4 MPa. Pour des bétons de bois respectivement du type **Dursiol** et **Agresta**. Logiquement, cette caractéristique est, comme pour les bétons classiques, une fonction croissante de la masse volumique ainsi que du dosage en ciment. Elle est, bien entendu fonction du granulat, (sa propre résistance et sa granularité) et du dosage en liant. Il est utile de noter que le comportement mécanique des bétons de bois est très différent de celui des bétons de granulats minéraux. Le rapport entre résistance à la compression et résistance à la traction est de l'ordre de 10 pour les bétons traditionnels : ce rapport est de l'ordre de 2 pour les bétons de bois.

La valeur cible de 3,5 à 4 MPa semble correspondre actuellement à un maximum technique réalisable, si l'on veut de plus conserver les autres atouts des bétons de bois relatifs à une basse densité ; elle est en général largement suffisante pour assurer la fonction de portance lorsque celle-ci est requise pour l'ouvrage réalisé en béton de bois.

Tableau I.10 Caractéristiques des bétons de bois [43]

	R _c (MPa)	Masse volumique apparente (kg/m ³)	Variations dimensionnelles (mm/m)	Résistance Au feu	Conductivité thermique (W/m. °C)	R _f (MPa)	E (MPa)
Valeur – CIBLE ALIMENT 2002	3.5 – 4	600– 900	< 1				
NF P 14-304	2.5 - 7	< 1700	< 0.45	.	K _U > 0.16	0.5-1.16	
NF P 14-306	3-7	400-800	< 0.45				
Règle d'Agrément (1958)	> 0.65	> 450	L < 4 H < 12				
Agresta	2.5-4 2.5-4	500-700 600-800	4.5	M 1	0.11-0.16	1.2-1.9	6500
		1250	1.37				
Mortier	2.2	730	5.8				
	7.8	1400	1				
Granuland Mortier	3.3	800 700	4.9		0.22 0.15		1630
Fixolite		480	7		0.11 K _U = 0.14		1500
Lithophore	> 1.3	950	< 0.9		K _U = 0.27		

1.4.5.3 influence de l'addition de copeaux de bois sur les performances mécaniques et thermiques du composite (argile-ciment-bois) :

Cette étude a été faite par K.Al Rim et al [45] sur l'effet de la variation du pourcentage du bois (sipo) sur les propriétés mécaniques et thermiques du composite (argile-ciment-bois). Les figures I.20-21 indiquent une chute de densité et des propriétés mécaniques avec l'augmentation du pourcentage massique des granulats de bois. Et la figure I.22 marque la relation graphique entre la résistance à la compression et celle à la flexion. La figure I.23 indique l'augmentation du coefficient de la conductivité thermique avec l'augmentation de la densité

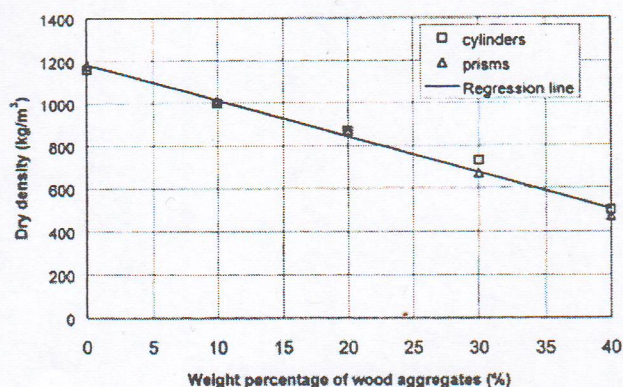


Figure I.20 Influence de l'addition de copeaux de bois sur la densité du composite (argile-ciment-bois). [45]

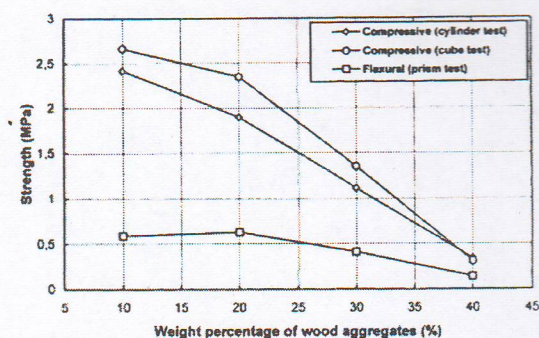


Figure I.22 Relation entre la résistance à la compression et à la flexion du composite (argile-ciment-bois). [45]

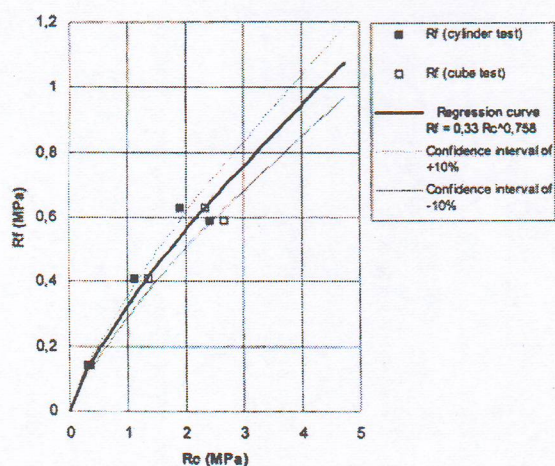


Figure I.22 Relation entre la résistance à la compression et à la flexion du Composite (argile-ciment-bois). [45]

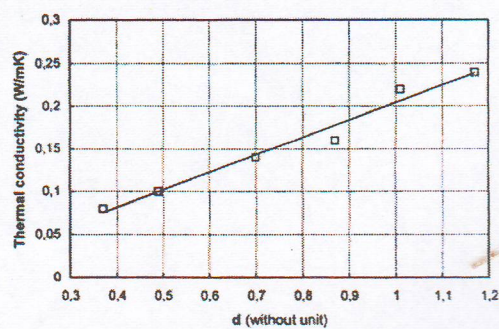


Figure I.23 Conductivité thermique en fonction de la densité du composite argile-ciment-bois). [45]



Chapitre II

*Matériaux utilisés et mesures
expérimentales*

Chapitre II : Matériaux utilisés et mesures expérimentales :

II.1 Essai de caractérisation et Normes :

Les performances d'un béton dépendent des caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des éléments constitutifs. Le béton de chaux bois confectionné est constitué essentiellement de la chaux hydratée provenant de la région de Saida, du sable dunaire et alluvionnaire provenant de la région de Laghouat (400 km au sud d'Alger), et certains éléments de substitution à savoir, le ciment les fines de calcaire et de brique. Ces constituants doivent être caractérisés au préalable selon les normes en vigueur citées dans le tableau II.1 [46]

Tableau II.1 Différents Essais de caractérisation et Normes correspondants.

Matériaux	Type d'essai	Norme [Réf]	Âge (jours)
Sable de dune Et alluvionnaire	-Granulométrie	NF P 18-360	-
	-Module de finesse	NF P 18-360	-
	-Classe de sable	N.G.B.1986	-
	-Equivalent de sable	NF P 18-597	-
	-Masse volumique	NF P 18-555	-
	-Compacité et porosité	NF P 18-555	-
Ciment chaux	- Masse volumique	NF P 18-558	-
	-Finesse	EN 196-6	-
	-La consistance normale	EN 196-3	-
	-Le temps de prise	EN 196-3	-
	-Résistance mécanique	EN 196-1	28 j
Fillers	-Finesse	EN 196-6	-
	-Masse volumique	NF P 18-558	-
Bois	-Masse volumique	-	24h
	-Granulométrie	-	
	- taux d'absorption d'eau	-	
Béton –chaux-bois	- Résistances mécanique	EN 196-1	28j
	- Retrait	NF P-433	-
	-Absorption capillaire	NF P 10-502	-

II.2 Principales caractéristiques des matériaux utilisés :

II.2.1 La Chaux :

Les différents types de liants se distinguent par le mécanisme de leur durcissement qui est influencé par la composition des matières de départ. La chaux utilisée durant notre étude est celle de la région de Saida ; c'est une chaux éteinte présentant une faible concentration en éléments oxydes comme les silicates SiO_2 , et aluminates Al_2O_3 et une forte concentration en éléments basiques comme la chaux libre CaO , ce qui donne à notre liant son aspect aérien. Pour caractériser notre chaux on doit se référer aux valeurs donnés par le tableau suivant .

Tableau II.2 Gamme de certaines caractéristiques de différent type de chaux. [47]

Matériaux	Masse volumique absolue (gr/cm^3)	Masse volumique apparente (gr/cm^3)	Surface spécifique (cm^2/g)
Chaux vive CaO	3.2-3.4	0.8-1	Très variable
Chaux éteinte	2.2-2.4	0.5-0.65	8000-12000
Chaux hydraulique	2.6-2.9	0.6-0.80	5000-8000

II.2.1.1 Analyse chimique et minéralogique de la chaux :

L'analyse chimique réalisée au laboratoire de l'unité de fabrication de la chaux de Saida a donné les résultats récapitulés dans le tableau II.3

Tableau II.3 Composition chimique de la chaux de Saida

Composition chimique	Chaux broyée	Chaux hydratée
Humidité	<5%	
CaO	>83.3%	67.4 % - 73.25 %
MgO	< 0.5%	< 0.4%
Fe_2O_3	< 2%	< 2%
Al_2O_3	<1.5%	< 1%
SiO_2	< 2.5%	< 2.2%
SO_3	< 0.5%	< 1%
$\text{K}_2\text{O} + \text{Na O}$	0.47 à 0.50	< 0.4%
CO_2	< 5%	< 5%
CaCO_3	< 10%	< 10%
Ca (OH)_2		< 80%
Constance volumique	Bonne	bonne
Insoluble	< 1%	< 0.35%

La dominance de la chaux hydratée Ca (OH)_2 a été confirmée par une deuxième analyse par diffractométrie aux rayons x voir figure II1. Voir annexe B

La figure II.1 indique nettement la dominance de la chaux hydratée

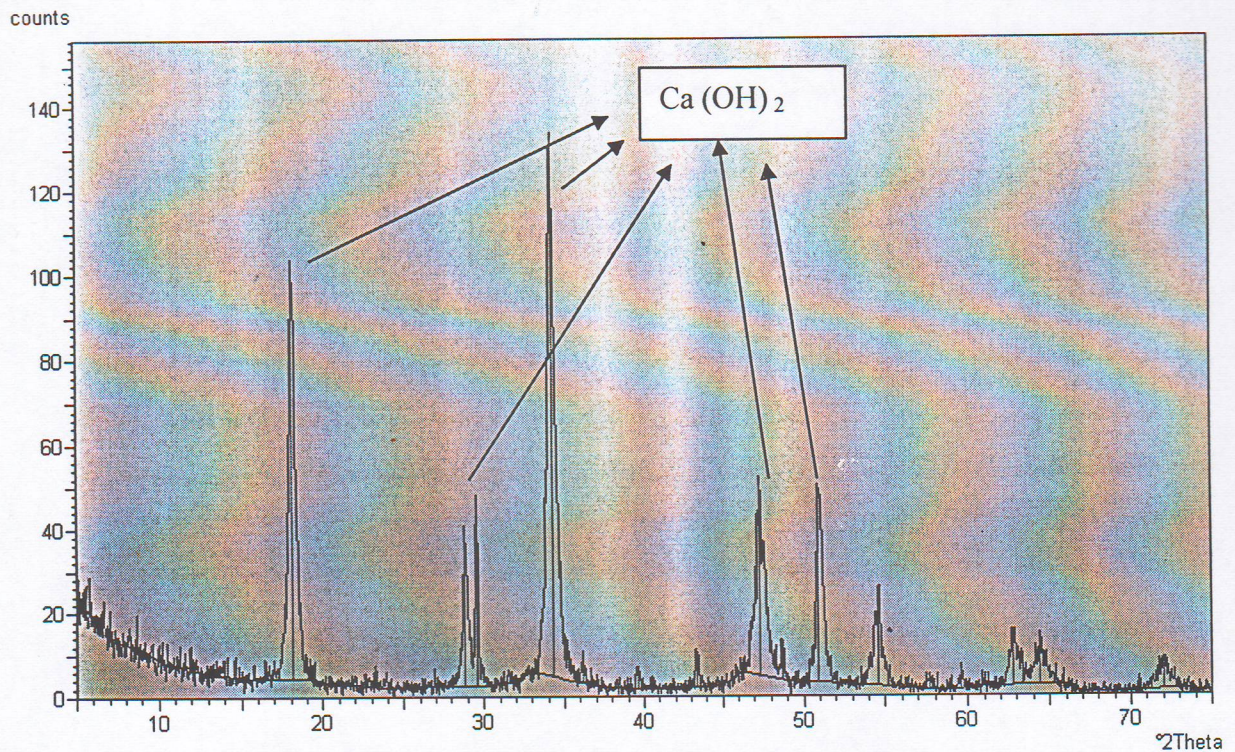


Figure II.1 Diffractogramme de la chaux de saida

II.2.1.2 Caractéristiques physiques de la chaux :

- Masse volumique apparente NF P18-558 :

C'est le rapport de la masse de l'échantillon M sur son volume total apparent V_{app}

$$\rho_{abs} = \frac{M_T}{V_{APP}} \quad (II.1)$$

Les mesures sont effectuées sur trois échantillons de chaux qui ont donné les résultats récapitulés dans le tableau II.4

Tableau II.4 Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique apparente de la chaux

Essai N°	Poids du récipient vide $P_1(\text{gr})$	Poids total du récipient $P_2(\text{gr})$	Poids net de la chaux (gr)	Volume du récipient (cm^3)	ρ_{app} (gr/cm^3)	ρ_{app} moyenne (gr/cm^3)	Ecart type σ
1	2401.6	2921.1	519.5	1000	0.5195	0.521	0.001
2		2923.4	521.8		0.5218		
3		2922.7	512.1		0.5211		

- **Masse volumique absolue NF P18-558 :**

La masse volumique absolue est déterminée en utilisant le dispositif Le Chatelier.

(Figure II.2)

$$\rho_{ab} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \quad (\text{II.2})$$

M_1 : Masse de (cellule + benzène),

M_2 : Masse de (cellule + benzène + chaux),

V_1 : Le volume du benzène initial,

V_2 : Le volume du benzène final (après introduction de la chaux)

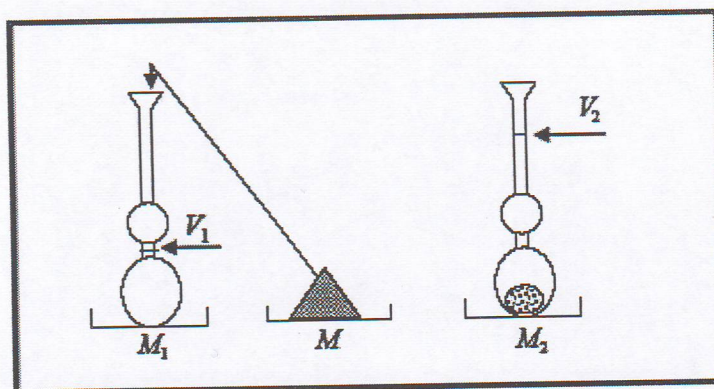


Figure II.2 Dispositif expérimental de l'appareil LeChatelier

Tableau II.5 Résultats de l'essai de détermination de la masse volumique absolue de la chaux

Essai N°	M_1 (gr)	M_2 (gr)	M (gr)	$V(\text{cm}^3)$	ρ_{abs} (gr/cm ³)	ρ_{abs} moy (gr/cm ³)	σ
1	353.50	401.35	47.85	18.70	2.559	2.559	0.001
2	353.40	404.60	51.20	20.00	2.560		
3	353.50	403.90	50.40	19.70	2.558		

- **Surface spécifique Blaine EN 196-6 :**

La chaux se présente sous forme de poudre finement broyée, cette finesse est une Caractéristique importante car lors du gâchage, plus la surface de la chaux en contact avec l'eau est grande, plus l'hydratation est complète et rapide. De plus, si la surface spécifique de la chaux est grande, plus la quantité d'eau nécessaire à l'hydratation est grande et plus la porosité diminue. La finesse est exprimée par sa surface spécifique qui exprime la surface étendue des grains de l'unité de masse de la chaux. Elle est généralement exprimée en (cm²/g). La méthode utilisée pour mesurer la surface spécifique est la perméabilité à l'air

« **Méthode de Blaine** ». Il s'agit de faire passer un volume d'air connu à travers une poudre de filler. Plus la surface spécifique de la poudre est importante et plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long. Dans les conditions normalisées, la surface spécifique est Proportionnelle à $t^{1/2}$. L'appareil utilisé dans cet essai est connu par **Appareil Blaine** voir Figure II.3 Cet essai est régi par la norme Française EN 196-6.

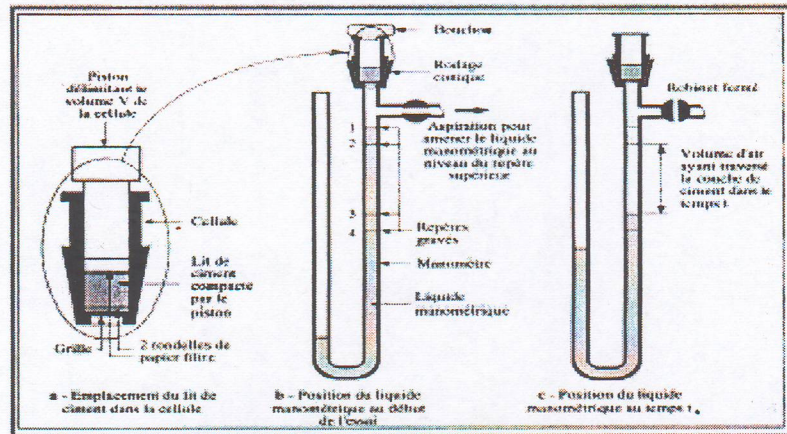


Figure II.3 Dispositif expérimental du perméabilimètre Blaine

D'après cet essai, la surface spécifique est calculée à l'aide de l'expression :

$$S_m = K_s \frac{\sqrt{\varepsilon^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho_{abs} (1 - \varepsilon) \sqrt{\eta}} \quad (\text{II.3})$$

Où $K_s = 43$ la constante de l'appareil

ε La porosité

ρ_{abs} La masse volumique absolue de la chaux (kg/m^3) ;

η La viscosité dynamique de l'air (Pa.s)

t Le temps en seconde (s) mis par l'air pour traverser la masse de la chaux.

$$\rho_{abs} = 2.56$$

$$V = 4.2 \text{ cm}^3 \text{ donc } M = \rho_{abs} \cdot V (1 - 0.8) = 2.15 \text{ gr}$$

$$\varepsilon = 0.8$$

Le constant d'appareil..... $K = 38$

Le temps mesuré $t = 8 \text{ s}$

La température $T = 20^\circ\text{C} \rightarrow \eta = 0.01359$

Donc, la surface spécifique $S_m = 11053 \text{ cm}^2/\text{gr}$

▪ Prise de la chaux EN 196-3 :

La durée de prise d'un liant est généralement caractérisée par deux temps:

- Le temps de début de prise.
- Le temps de la fin de prise

On appelle le début de prise le moment où l'aiguille de Vicat, de section 1 mm^2 ne pénètre plus jusqu'au fond de l'anneau. La fin de prise correspond au moment où cette même aiguille ne laisse plus d'empreinte sur la pâte. La vitesse de prise augmente avec l'augmentation de la finesse de mouture du liant. La vitesse de prise est d'autant plus faible que la quantité d'eau de gâchage est élevée. L'accroissement de la température accélère la prise. L'essai expérimental a donné les résultats suivants :

$$T_{\text{début de prise}} = 1\text{j}$$

$$T_{\text{fin de prise}} = 3\text{j}$$

II.2.1.3 Résultats récapitulatifs

Le tableau II.6 regroupe tous les résultats des essais expérimentales fait sur la chaux

Tableau II.6 Résultats des caractéristiques physiques de la chaux

Masse volumique absolue g/cm^3	Surface spécifique Blaine cm^2/g	Masse volumique apparente g/cm^3	Nature du Liant (chaux)	Temps début de prise	Temps de fin de prise
2,559	11053	0.521	Aérien	1j	3j

II.2.2 Le Sable dunaire :

Le sable dunaire utilisé dans ce travail est de provenance locale, présentant de très bonnes qualités physico-chimiques. Ce sable est soumis à la caractérisation selon les normes en vigueur.

II.2.2.1 Analyse par diffraction aux rayons X du sable de dune employé :

La composition minéralogique du sable est déterminée par l'analyse de diffraction des Rayons X. Le diffractogramme du sable utilisé figure II.4 montre qu'il est exclusivement composé du quartz SiO_2 avec quelques traces de calcium Ca, de Magnésium Mg et d'aluminium Al.

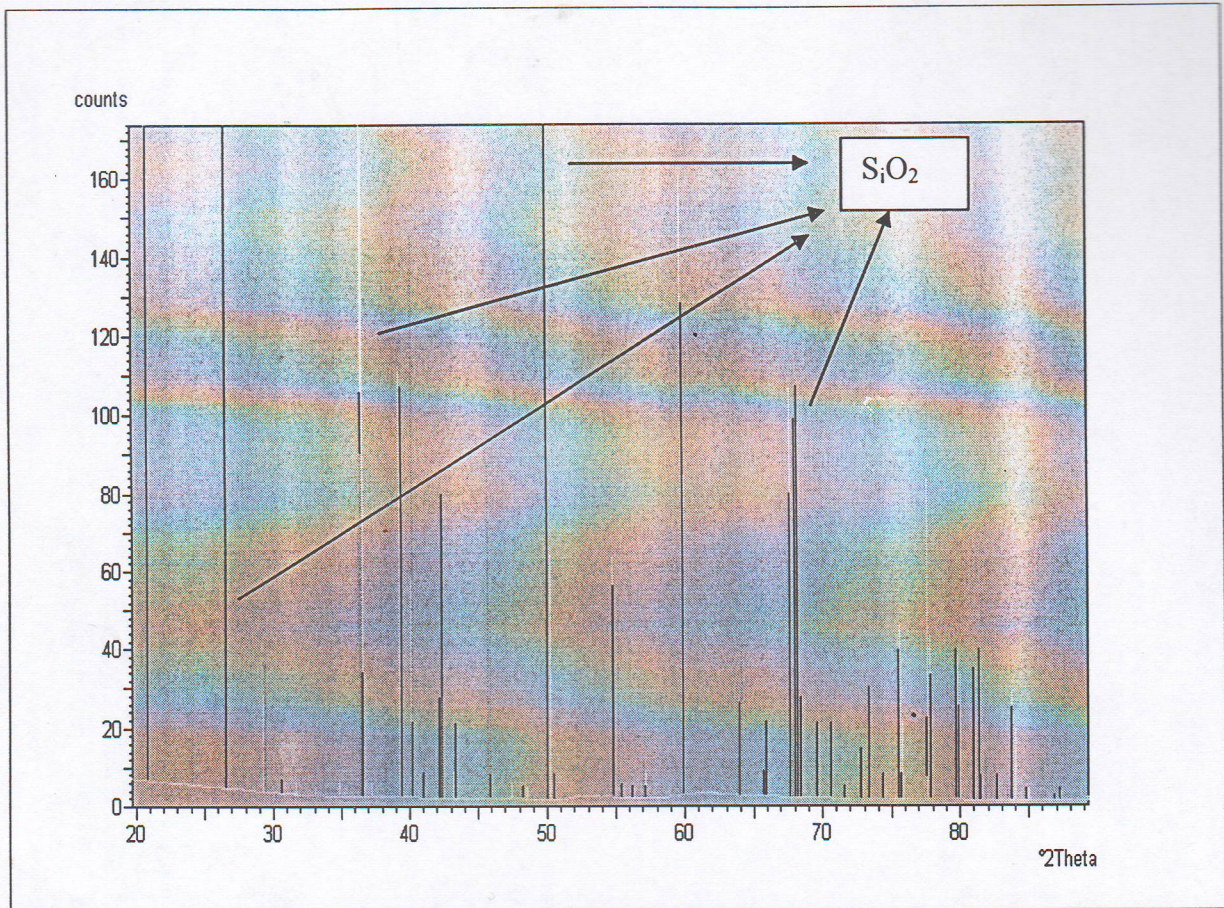


Figure II.4 : Diffractogramme du sable dunaire de la zone de Laghouat

II.2.2.2 Caractéristiques granulaire du sable dunaire :

▪ Analyse granulométrique du sable dunaire:

La granulométrie est la distribution par dimension des grains d'un granulat. L'analyse granulométrique est l'un des essais les plus indispensables effectués dans la composition du béton. C'est un essai qui est réalisé selon NF P 18-36 et qui consiste à classer les granulats suivants leurs grosseurs. Les résultats de l'analyse granulométrique du sable dunaire utilisé sont regroupés dans le tableau II.8 en Annexe.A schématisé par la figure II.5

○ Module de finesse NF P 18-360 :

La finesse du sable est définit comme étant la somme des refus cumulés exprimés en Pourcentage sur les tamis de la série : 5, 2.5, 1.25, 0.63, 0.315 et 0.16 mm.

$$M_f = \frac{\sum \text{refus cumulée en \%}}{100} \quad (\text{II.4})$$

Plus le module de finesse est élevé plus le granulat est grossier. Un sable de béton courant devrait avoir un module de finesse compris entre 2.20 et 2.80 [48]. L'essai a donné le résultat suivant : $M_f = 1.13$

Le sable utilisé est donc un sable fin.

▪ **Equivalent de sable NF P 18-597 :**

La propreté d'un sable est généralement identifiée par l'essai d'équivalent de sable, qui a pour but de déterminer la proportion d'impuretés argileuses, limoneuses ou ultrafines nuisibles dans le sable. L'essai a été réalisé conformément à la norme NFP 18-598. les valeurs du coefficient d'équivalent de sable sont :

$$Es \text{ à vue} = 97.74$$

$$Es \text{ à piston} = 96.58$$

II.2.2.3 Caractéristiques physiques du sable dunaire:

▪ **Masse volumique apparente ρ_{app} et absolue ρ_{abs} NF P 18-555 :**

$$\rho_{app} = 1491.13 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{abs} = 2517 \text{ kg/m}^3$$

▪ **Compacité et porosité NF P 18-555 :**

Ces deux caractéristiques sont très importantes sur les différentes propriétés des bétons de chaux, à savoir la résistance, la durabilité et la déformation. La compacité (C) ne dépend pas uniquement de l'étendue granulaire, mais également de la répartition granulométrique des grains. La compacité est définie comme le volume occupé par les éléments solides rapportés au volume total. Elle est bien sûr complémentaire à la porosité (P). La pénétration de l'eau dans les pores des granulats affaiblit la structure en cas de gel, il est important de connaître la porosité de chaque granulat entrant dans la confection de notre béton.

$$C = \frac{V - V_v}{V} = 1 - \frac{V_v}{V} = 1 - P = \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \quad (\text{II-5})$$

Avec :

V = volume total

V_v = volume du vide

$$P = \frac{V_v}{V} = 1 - C \Rightarrow C + P = 1$$

L'essai est réalisé selon la norme NF P 18-555 qui consiste à mettre en évidence la porosité du sable utilisée exprimée en pourcentage. L'essai a donné les résultats suivants :

$$P=59 ; C=41$$

II.2.3 Le Sable alluvionnaire :

Ce sable est très exploité vu son abondance dans les oueds aux environs de la ville de Laghouat. Le sable alluvionnaire utilisé dans notre étude a été caractérisé selon les mêmes normes utilisées pour la caractérisation du sable dunaire.

II.2.3.1 Caractéristiques granulaire du sable alluvionnaire :

▪ Analyse granulométrique du sable alluvionnaire :

Selon la même norme NF P 18-360 qu'on va classer tous les granulats du sable suivant leur taille par analyse granulométrique, les résultats de l'essai sont regroupés dans le tableau II.9.en Annexe.A schématisé par la figure II.5

▪ Module de finesse NF P 18-360 :

Selon la même norme qu'on va déterminer le module de finesse du sable alluvionnaire

$$M_f=2.9$$

▪ Equivalent de sable NF P 18-597 :

Le résultat de mesure de la propreté du sable alluvionnaire selon la même norme du sable utilisé est donné par :

$$E_s \text{ à vue} = 89.52$$

$$E_s \text{ à piston} = 86.91$$

II.2.3.2 Caractéristiques physiques du sable alluvionnaire

▪ Masse volumique apparente ρ_{app} et absolue ρ_{abs} NF P18-555 :

$$\rho_{app} = 1544.8 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{abs} = 2517 \text{ kg/m}^3$$

▪ Compacité et porosité NF P 18-555 :

Le résultat de mesure de la compacité et de la porosité selon la même norme du sable utilisé est donné par : $C=56 ; P=44$

II.2.4 Résultats récapitulatifs des différentes caractéristiques du sable dunaire et alluvionnaire avec leur courbe granulométrique :

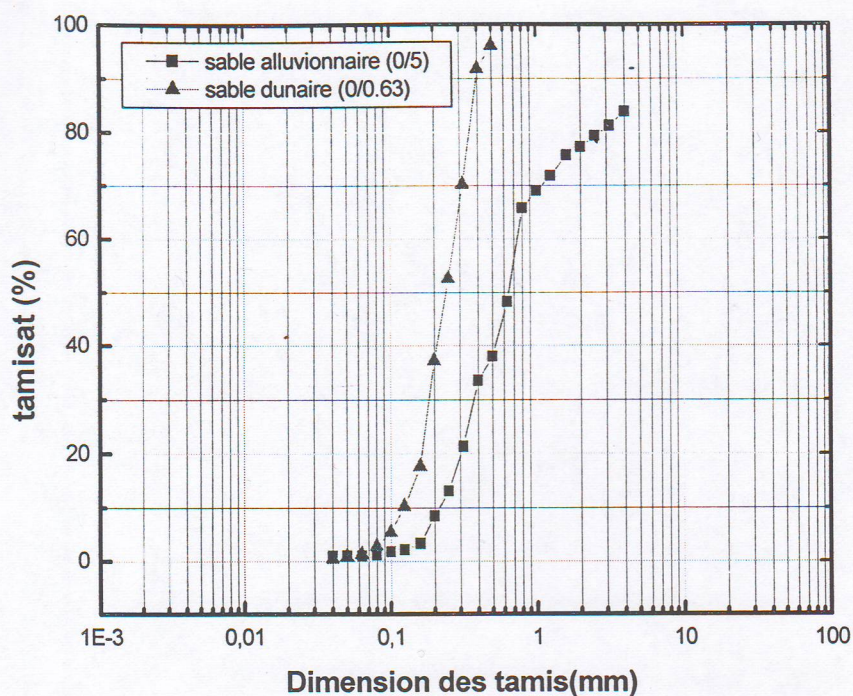


Figure II.5 : Courbes granulométriques des deux sab

Tableau II.10 Résultats de caractérisation du sable dunaire et alluvionnaire.

Propriétés physiques des deux sables		Sable de dune	Sable alluvionnaire
Granulométrie		Continue 1.136% d'éléments fins	Continue 8.375% d'éléments fins
Granularité (0/d mm)		0/0.63	0.63/5
Module de finesse		1.13	2.9
ρ_{app} (kg/m ³)		1491.13	1544.8
ρ_{abs} (kg/m ³)		2517	2655.88
Porosité (%)		41	44
Compacité (%)		59	56
Equivalent de sable	Es à vue	97.74 très pure	89.52
	Es à piston	96.58 très pure	86.91

II.2.5 Le Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, qui gâche avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. Ce ciment sera utilisé comme ajout afin d'augmenter à une certaine limite l'hydraulicité de la chaux. Le ciment utilisé pour élaboration de notre matériau est de type CPJ.32.5 ciment portland produit dans la cimenterie de « SOUR EL GHOZLANE ».

II.2.5.1 Analyse du ciment :

- **Analyse chimique du ciment :**

L'analyse chimique du ciment a révélé que le ciment utilisé contient des pourcentages plus élevés en chaux et silice que les autres éléments, le tableau II.11 présentent les différentes concentrations des éléments du ciment.

Tableau II.11 Composition chimique du ciment

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	Mg O	SO ₃	KO ₂	Na ₂ O	CaO
%	21,62	5,30	2,67	61,20	2,01	2,10	0,52	0,34	0,056

- **Analyse par diffraction aux rayons X du ciment :**

Les résultats de la diffractométrie sur la poudre du ciment sont présentés sur la figure II.6 Il est composé principalement de C₃S et C₃A donnant à ce liant sa rapidité au durcissement.

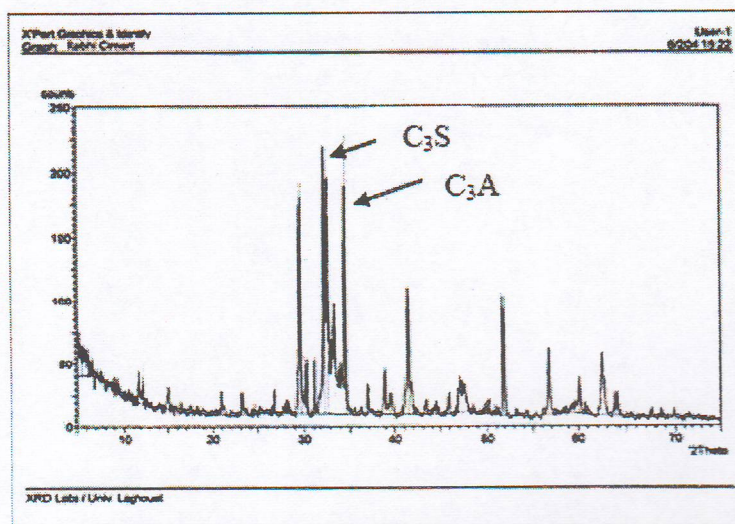


Figure II.6 Diffractogramme du ciment CPJ CEM II/A 32.5.

II.2.5.2 Caractéristiques physiques du ciment :

Les résultats de l'expérimentation sont regroupés dans le tableau II.12

Tableau II.12 Caractéristiques physiques du ciment :

Masse volumique absolue g/cm^3	Surface spécifique Blaine cm^2/g	Masse volumique apparente g/cm^3	Consistance Normale %	Temps début de prise (heures)	Temps de fin de prise (heures)
3.04	3880	1.28	27	3h	6h

II.2.6 Les fillers

Les fillers sont les éléments passant par le tamis de maille $80\mu\text{m}$, ce sont des matières minérales naturelles ou artificielles. Un filler généralement comble les vides inter granulaires dans le sable, et permet d'améliorer ainsi la compacité du mélange et par conséquent l'augmentation de ses performances mécaniques. L'amélioration des performances apportées par la quantité d'ajout (filler) dépend de la nature de ces derniers, en particulier de la finesse et de l'action chimique avec la chaux. Un type de fillers a coté de celui du calcaire a été utilisé dans cette étude qui est de la brique présentant une forte action pozzolanique sur le mélange (voir étude bibliographique).

II.2.6.1 Fillers de calcaire

Les fillers de calcaire provient des déchets de concassage d'une carrière dans la montagne dit « djebel-eddakhla » à la sortie nord de la ville de Laghouat vers la commune de El Assafia, ce filler est passé au tamisage manuel (tamis de $0,80\mu\text{m}$ de maille) dont les caractéristiques physiques sont récapitulées dans le tableau II.13.

▪ Caractéristiques physiques :

Le tableau II.13 regroupe les trois principales caractéristiques d'un filler dont on a déterminés selon les normes recommandées.

Tableau II.13 Caractéristiques physiques des fines de calcaires

Masse volumique absolue $[\text{g/cm}^3]$	Masse volumique apparente $[\text{g/cm}^3]$	Surface spécifique Blaine $[\text{cm}^2/\text{g}]$
2,83	2,5	2314

▪ Analyse par diffraction aux rayons X :

Le résultat de diffraction aux rayons X sur une fraction des fines de calcaire indique une dominance en élément calcite CaCO_3 avec quelques traces en d'autres éléments non identifiés

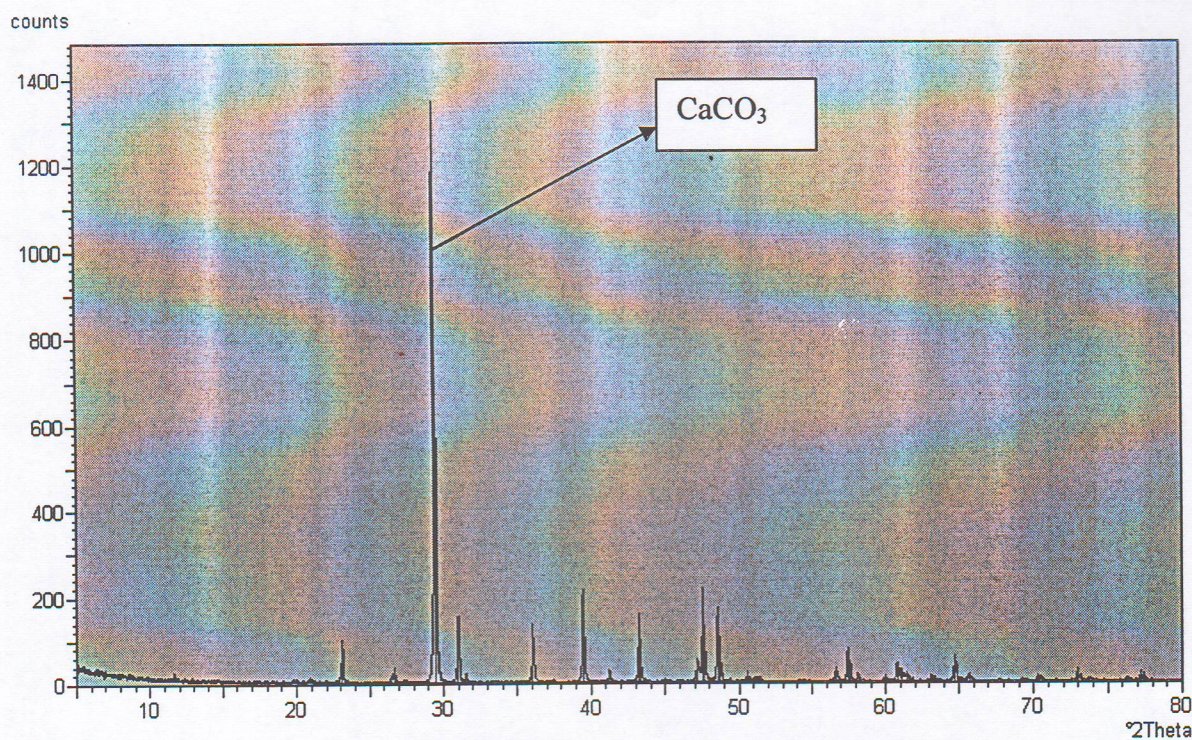


Figure II.7 Diffractogramme du filler de calcaire

II.2.6.2 Fillers de brique

Les briques rouges fabriquées au niveau de la briqueterie de SOFABRIL située à la sortie de la ville de Laghouat sont composées principalement d'une argile kaolinite cuite à une température comprise entre (800-900 C°), les déchets de briques récupérés au niveau des chantiers de construction sont broyés à l'aide d'une machine (Los-Angles) disposée de 12 boules, cette opération est suivie d'un tamisage manuel du produit broyé par un tamis de 80 μm dont les caractéristiques physiques sont récapitulées dans le tableau II.14.

▪ Caractéristiques physiques :

Tableau II.14 Caractéristiques physiques des fines de briques

Masse volumique absolue g/cm^3	Masse volumique apparente g/cm^3	Surface spécifique Blaine cm^2/g
3,21	2,5	2847

▪ Analyse par diffraction aux rayons X :

L'analyse de la diffractométrie sur les fines de brique a indiqué un élément majoritaire qui est le quartz SiO_2 . c'est pratiquement l'élément principale qui rentre en action avec la chaux en donnant les composants hydrates.

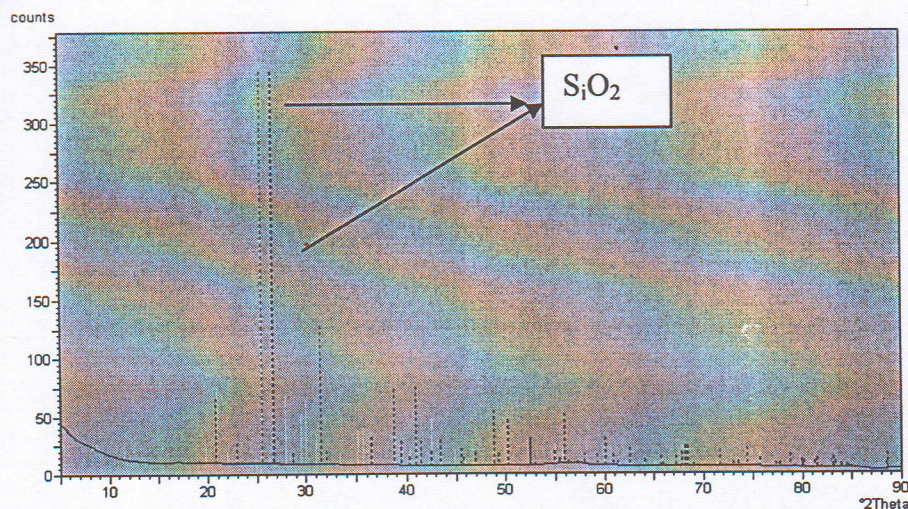


Figure II.8 Diffractogramme du filler de brique

II.2.7 Granulats de bois

Le bois entrant dans la composition du matériau BCB. Voir figure.A-1 en annexe A est pris sous forme de sciure, déchet de fabrication des matériaux en bois, on détermine selon les normes recommandées toutes les caractéristiques physiques de ce matériau notamment son coefficient d'absorption qui sera pris en considération pour déterminer les quantités d'eau absorbées par ses pores lors du malaxage. Cette eau absorbée par les pores des granulats doit être également mélangée avec du NaCL (chlorure de sodium) avec un dosage de 100 g/L afin de briser toute action chimique entre les constituants de bois (lignine et cellulose) et ceux du mélange.

II.2.7.1 Analyse granulométrique des granulats de bois

Les résultats expérimentaux de cette analyse est présenté dans le tableau II.15 en Annexe.A schématisé par la figure II.9

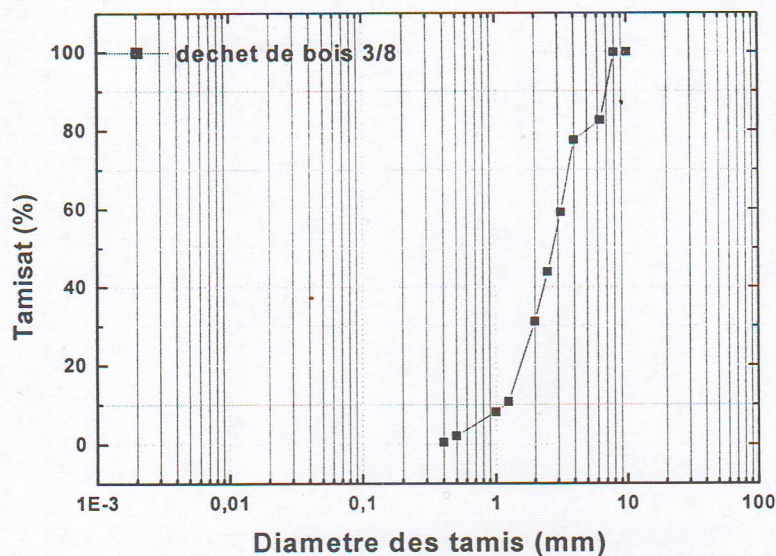


Figure II.9 Courbe granulométrique du bois 3/8

II.2.7.2 Caractéristiques physiques des granulats de bois :

- **Masse volumique apparente :**

Cette masse volumique est généralement déterminée à l'aide d'un pycnomètre et avec la même procédure expliquée plus haut, seulement vue le problème d'absorption de l'eau par les granulats, il est recommandé d'utiliser un pycnomètre à mercure au lieu d'un pycnomètre à eau. Cet essai est régi par la norme Mais cette méthode est assez délicate vu la particularité des granulats utilisés. Une autre méthode plus simple a été utilisée ;il s'agit de peser un parallélépipède du matériaux après avoir mesurer ces dimensions. La masse volumique apparente se détermine par le rapport du poids de l'échantillon à son volume

- **Masse volumique absolue :**

La détermination de la masse volumique absolue du bois est plus délicate vue que la matière première du bois contient toujours des vides et que la propriété d'absorption du bois engendre des erreurs lors de la détermination de la masse volumique. La procédure utilisée est de prendre un morceau de bois de forme parallélépipédique qu'on sèche dans l'étuve pendant 24 heures, on le pèse et on mesure ces dimensions. Soit M_s et V_0 la masse et le volume de l'échantillon. Ensuite on le fait bouillir dans une cocotte afin que l'eau envahie

tous ces pores, on le pèse soit M_h sa masse. Le volume des vides qu'on note V_v est égale au volume d'eau absorbée par l'échantillon qui est équivalent à la différence de la masse humide à la masse sèche, d'où la masse volumique absolue qui est égale à :

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_o - V_v}$$

Tableau II.16 Résultats expérimentales des caractéristiques physiques des granulats de bois

Masse volumique apparente (kg/m ³)	Masse volumique absolue (kg/m ³)	Coefficient d'absorption (g/g)
87.05	630.21	3.75

II.2.8 Eau de gâchage

L'eau de gâchage du béton de sable est l'eau potable du robinet, Elle doit être conforme à la norme NF P 18-303, cette eau joue un rôle très important dans l'hydratation du liant, mouillage des granulats, malaxage et facilité de mise en œuvre, en général, la résistance d'un béton est en fonction du rapport E/C. L'analyse chimique de cette eau est effectuée au laboratoire de l'EPDEMI A indiquant que c'est une eau de potabilité chimique passable avec un pourcentage élevé de sulfates. Les résultats de l'analyse chimique de l'eau de gâchage sont donnés dans le tableau II.1

Tableau.II.17 Résultats d'analyse de l'eau de gâchage

Nature du point d'eau		Concentration en cations et en anions			
Ca ⁺² en mg/L	104	Balance Cations m.éq/L 18.7		5.2	
Mg ⁺² en mg/L	97			8	
Na ⁺ en mg/L	102.3			4.45	
K ⁺ en mg/L	6.46			0.16	
Cl ⁻ en mg/L	148	Balance Anions m.éq/L 16.2		4.17	
SO ₄ ⁻² en mg/L	520			10.82	
HCO ₃ ⁻ en mg/L	94			1.55	
NO ₃ ⁻ en mg/L	12.4			0.2	
Résidu sec à 105°C 1576 en mg/L	P _H (laboratoire) 7.7	Conductivité en 1/10 mm à 25° 16.80		Dureté total 43.25	
Test chlore (ml d'eau de javel à 15°/m ³ 0.96 ml/l)		T.H 66°F	T.A.C 7.75°F	S.A.F 95°F	I.S 62°F
Minéralisation 1067 mg/l	Oxygène dissous O ₂ 12.05		SiO ₂ 0.0 mg/l		Somme des ions 1101.5
Cations	Ca ⁺² =15%	Mg ⁺² =23%		Na ⁺ =13%	K ⁺ =0.5%
Anions	SO ₄ ⁻² =31.3%	CL ⁻¹ =12%		HCO ₃ ⁻¹ =4.5	NO ₃ =30.60

II.3 Différents essais de caractérisation physico-mécanique des mortiers et bétons durcis :

II.3.1 procédure de malaxage et de mise en moule :

Il y'a pratiquement deux normes, l'une britannique et l'autre européenne qui conditionnent la manière dont il faut procéder pour préparer les différentes éprouvettes d'étude BS 4551 [18] et EN 196-1 [19] (voir étude bibliographique). la norme européenne EN 196-1 est celle utilisée dans notre étude et qui décrit de manière détaillée le mode opératoire concernant cet essai ; ce procédure de malaxage citée dans le tableau suivant concerne uniquement les mortiers de chaux sans adjonction de bois :

Tableau II.18 Différentes étapes de malaxage selon la norme EN 196-1 [46]

Opération	Introduction de l'eau	Introduction de la chaux		Introduction du sable		Raclage de La cuve		
Durée			30s	30s	30s	15s	1min 15s	60s
Etat du malaxeur	Arrêt		Vitesse lente		Vitesse rapide	Arrêt		Vitesse rapide

Pour les bétons de chaux-bois on utilise la bétonnière en suivant les deux étapes ci-dessous :

- Avant l'introduction du bois on laisse un temps de 5mn de malaxage pour le mélange sec des divers constituants dans la bétonnière.
- On introduit les copeaux pleinement saturés en laissant un temps de 2mn de malaxage, puis on arrête et on redémarre la bétonnière pendant 2mn.

Après malaxage les moules seront remplis en introduisant le mortier ou le béton en deux couches et en appliquant au moule 60 chocs en le faisant tomber à une certaine hauteur. Après rasage par une barrette en acier les moules sont entreposés dans le laboratoire, pour être démoulés 24h après

II.3.2 Modes de conservation :

Les éprouvettes sont destinées selon le type d'essai aux différents environnements I ou II tels que :

I : Environnement à l'aire libre ; le laboratoire (T=22°- HR=45%)

II : Environnement humide ; la salle humide, avec un apport continu des plantes fraîches bien arrosées pour accélérer la carbonatation et maintenir constamment une humidité relativement constante.(T=18°- HR=75%)

II.3.3 Masse volumique :

Les éprouvettes 7x7x28cm du béton de chaux -bois sont pesées régulièrement au cours du temps et pour les deux environnements (en salle et dans le laboratoire) et cela à l'aide d'une balance d'une précision de 0.5g.

II.3.4 Porosité :

La porosité est une caractéristique très importante, elle influe sur les caractéristiques physico mécaniques des bétons, comme la masse volumique; la résistance à la compression; le module d'élasticité; la conductivité thermique,...etc. Plus la porosité est faible, plus le béton est dense et plus sa résistance est grande par contre son pouvoir isolant est médiocre.

La porosité du béton provient de celle de la matrice et celle des granulats. Elle est exprimée en pourcentage et représente la fraction du volume des vides dans le matériau par rapport au volume total, elle est donnée par la relation :

$$n = \frac{V_v}{V_T} = n_g + n_m \quad (\text{II.6})$$

V_v : volume des vides ;

V_T : volume total ;

n_g : porosité des granulats,

n_m :porosité de la matrice.

La procédure suivante a été utilisée pour déterminer la porosité des bétons élaborés :

Si on prend une éprouvette 7x7x28 cm, on désigne par V_m le volume de la matrice et par V_g le volume des granulats. Le volume total de l'éprouvette est donc :

$$V_T = V_m + V_g \quad (\text{II.7})$$

Si n_m et n_g désignent respectivement les porosités de la matrice et des granulats alors la porosité totale sera :

$$n_T = n_m + n_g \quad (\text{II.8})$$

Soit :

$$n_T = \frac{V_v}{V_T} = \frac{V_{vm} + V_{vg}}{V_T} \quad n_T = \frac{n_m \times V_m + n_g \times V_g}{V_T} \quad (\text{II.9})$$

Ou encore :

$$n_T = n_m \times \frac{V_m}{V_T} + n_g \times \frac{V_g}{V_T} \quad (\text{II.10})$$

Et puisque : $V_m = V_T - V_g$ alors on peut écrire (II-13) de la manière suivante :

$\varepsilon_m = \frac{V_m}{V_T}$ étant la proportion volumique de la matrice relativement au volume total de l'échantillon.

$\varepsilon_g = \frac{V_g}{V_T}$ étant la proportion volumique des granulats relativement au volume total de l'échantillon. Celle-ci est variable selon le dosage en granulats. Cette proportion se calcule théoriquement par :

$$\varepsilon_g = \frac{V_g}{V_T} = 1 - \frac{V_m}{V_T} \quad (\text{II.11})$$

Si $\rho_a = \frac{M_T}{V_T}$ et $\rho_m = \frac{M_m}{V_m}$ sont respectivement les masses volumiques apparentes de l'échantillon de béton et de la matrice ($\frac{V_g}{V_T} = 0$). Après simplification :

$$\varepsilon_g = \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m - \rho_g} \quad (\text{II.12})$$

D'autre part la proportion volumique de la matrice dans l'échantillon de béton, notée ε_m est donnée par :

$$\varepsilon_m = \frac{V_m}{V_t} = 1 - \varepsilon_g = \frac{\rho_a - \rho_g}{\rho_m - \rho_g} \quad (\text{II.13})$$

En remplaçant les expressions de ε_g et ε_m on obtient :

$$n_T = n_m \left(\frac{\rho_a - \rho_g}{\rho_m - \rho_g} \right) + n_g \left(\frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m - \rho_g} \right) \quad (\text{II.14})$$

Où :

ρ_a est la masse volumique apparente de l'échantillon de béton ;

ρ_m est la masse volumique apparente de la matrice ;

ρ_g est la masse volumique apparente de la matière première des granulats ;

n_g est la porosité des granulats : $n_g = 1 - \frac{\rho_g}{(\rho_g)_s}$

ρ_g : La masse volumique apparente de la matière première des granulats (kg/m^3) ;

$(\rho_g)_s$: La masse volumique absolue ou de la matière solide des granulats (kg/m^3) ;

n_m est la porosité de la matrice : $n_m = 1 - \frac{\rho_m}{(\rho_m)_s}$

ρ_m : La masse volumique apparente de la matrice (kg/m^3) ;

$(\rho_m)_s$: La masse volumique absolue de la matrice (kg/m^3)

II.3.5 Essai d'absorption d'eau par capillarité :

L'essai d'absorption d'eau par capillarité est réalisée conformément à la norme NF P 10-502. Cet essai est effectué sur des éprouvettes ($7 \times 7 \times 28$) cm^3 séchées jusqu'à poids constant, on pose les éprouvettes sur leurs bases $7 \times 7 \text{ cm}^2$, en les séparant du fond du récipient d'eau de 2 cm et en maintenant le niveau d'eau constant. Les éprouvettes sont immergées dans l'eau à une profondeur de 5 mm voir figure II.10. Les surfaces latérales des éprouvettes sont imperméabilisées à l'aide d'un film plastique pour avoir un écoulement uni axial. La base inférieure et la base supérieure ne sont pas imperméabilisées pour permettre la remontée de l'eau par capillarité et l'évacuation de l'air pendant l'essai. Les éprouvettes sont pesées à des intervalles de temps réguliers. L'essai ne s'arrête que si le matériau ne peut plus absorber de l'eau, c'est la capacité maximale du matériau en rétention d'eau.

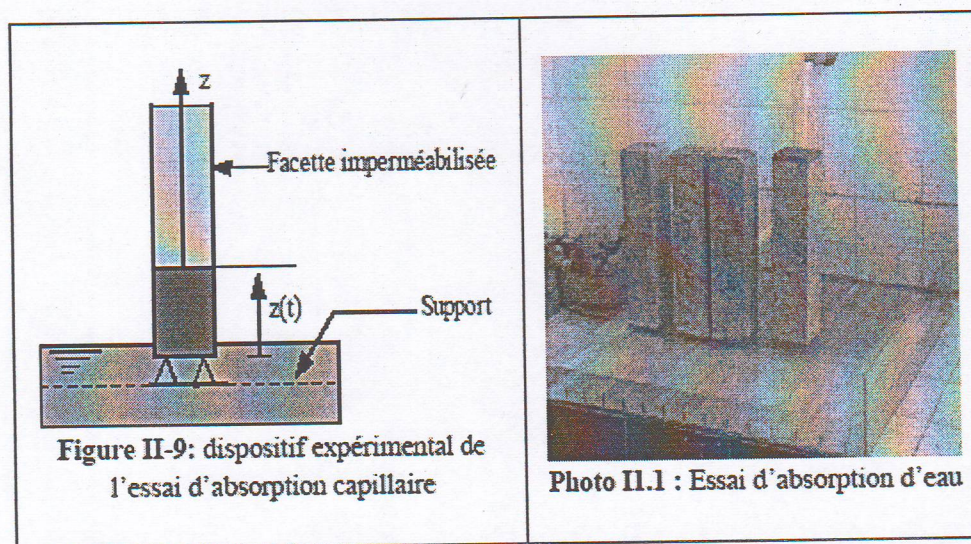


Figure II.10 Description schématique de l'essai d'absorption d'eau par capillarité

II.3.6 Mesure du retrait sur éprouvettes de béton NF P 15-433 :

II.3.6.1 Conduite de l'essai :

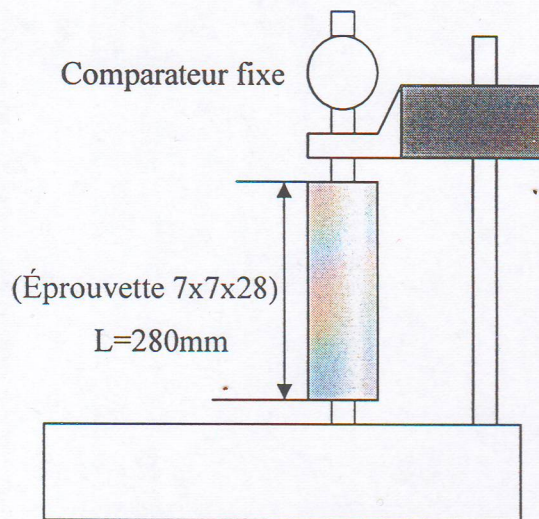


Figure II.11 Dispositif pour la mesure du retrait

Soit $l(t_0)$ la longueur de l'éprouvette au temps t_0 choisi pour origine. En générale cette origine est prise au moment du démoulage, soit 24h après la confection des éprouvettes. La variation de longueur au temps t sera (voir figure II.11) :

$$\Delta l(t) = l(t) - l(t_0) = dl(t) - dl(t_0). \quad (\text{II.15})$$

La variation relative de longueur est généralement désignée par ε et a pour expression :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l(l)}{L} = \frac{dl(t) - dl(t_0)}{L} \quad (\text{II.16})$$

II.3.7 Essai de Résistance à la traction (flexion trois points) :

Les éprouvettes sont soumises à un essai de flexion trois (3) points (voir Figure II-12). Vue que les résistances à la flexion sont généralement faibles et pour plus de précision on a utilisé une machine CBR à anneaux dynamométriques 5 kN et 10 kN et à vitesse réglable voir annexe B. La vitesse choisie pour l'essai de flexion est de 4mm/mn ce qui correspond à 12 kN/s qui est dans la marge définie par la norme relative à l'essai d'écrasement en traction par flexion. Les lectures millimétriques sur l'anneau dynamométrique sont converties en kN grâce au tableau de conversion livré avec la presse. Si F est la charge de rupture de l'éprouvette en traction par flexion, le moment de rupture vaut $FL/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$\sigma_f = \frac{3FL}{2b^3} \quad (\text{II-17})$$

Où σ_f : contrainte à la flexion (en MPa).

F : charge de rupture (en KN).

b : coté de la section carrée (mm^2)

L : distance entre appuis (en mm)

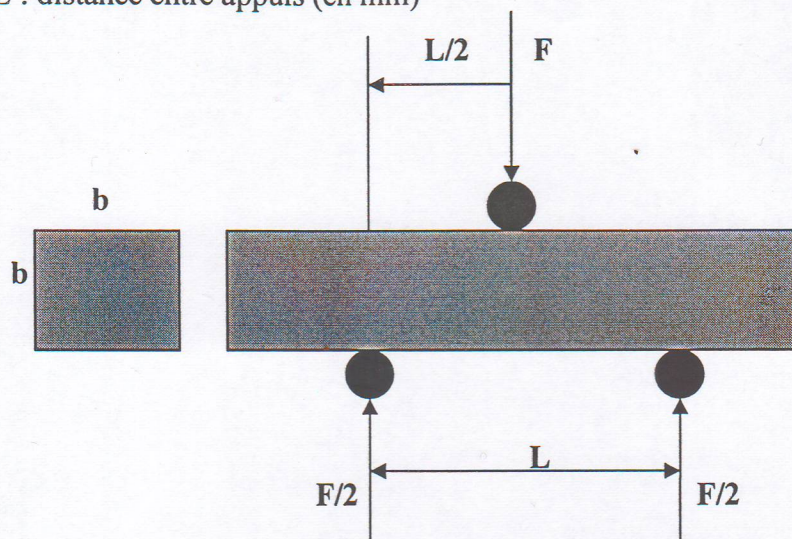


Figure II.12 Schéma mécanique de l'essai de traction par flexion trois points.

II.3.8 Essai de Résistance à la compression :

Les deux parties de l'éprouvette écrasée par l'essai de traction sont soumises l'une après l'autre à l'essai de compression (Figure II.13), toujours sur la machine CBR en utilisant un anneau dynamométrique 60 kN ou 10kN voir annexe B. La valeur de la résistance à la compression est donnée par :

$$R_c = \frac{F_c}{A} \text{ en (MPa)} \quad (\text{II.18})$$

F_c : force de compression qui correspond à la lecture sur anneau en (N).

A : surface transversale de l'éprouvette en mm^2

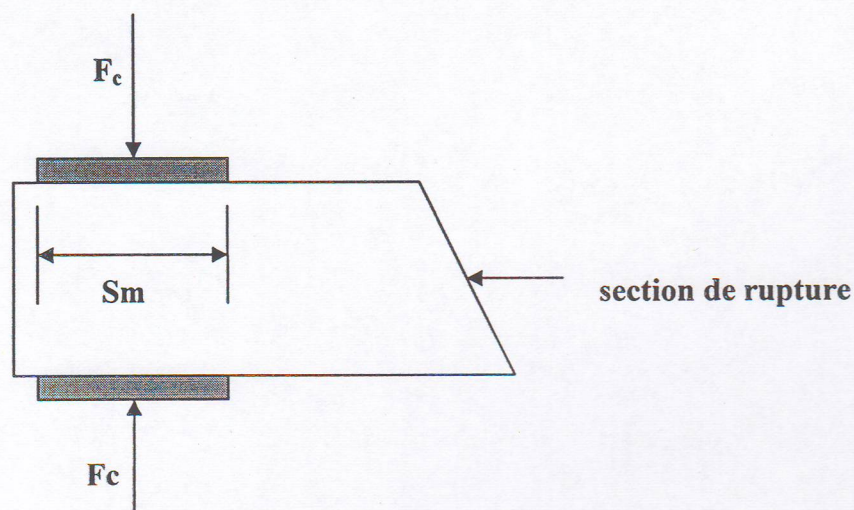


Figure II.13 Schémas mécanique de l'essai de compression

Chapitre III

*Formulation et Caractérisation des
mortiers durcis.*

Chapitre III : Formulation et Caractérisation des mortiers durcis

III.1 Introduction :

L'étude de la composition d'un mortier consiste à définir le mélange optimal des différents constituants dont on dispose ainsi que le dosage en chaux et en eau afin de réaliser un mortier dont les qualités soient celles recherchées pour différentes exigences techniques ; certains matériaux inertes comme les fines de calcaire ou actifs comme les fines de brique ou ciment sont utilisées comme ajouts ou substituants dans la confection des mortiers durcis afin d'améliorer ses performances physico-mécaniques.

III.2 Méthodologie de travail :

La formulation du mortier de chaux est basée sur la recherche de la compacité maximale, étant donné l'importance de cette dernière sur les propriétés rhéologiques et mécaniques ainsi que la durabilité de ce mortier. La formulation durant toute cette étude est passée par différents modes de traitement afin d'aboutir à la meilleure composition qui répond au maximum aux besoins techniques et économiques exigés.

1 -Optimiser le mélange (chaux -sable).

2 -Effet de l'addition des fines calcaires sur les propriétés mécaniques du mélange optimale obtenu en étape 1

3 -Effet de la substitution de la chaux par le ciment sur les propriétés mécaniques du mélange optimale obtenu en étape 1

4 -Effet de la substitution du sable mixte par les fines de brique sur les propriétés mécaniques du mélange optimale obtenu en étape 1

5 -Effet de l'addition des fines calcaires sur les propriétés mécaniques du mélange optimale obtenu en étape 3

6 -Effet de la substitution du sable mixte par les fines de brique sur les propriétés mécaniques du mélange optimale obtenu en étape 3

III.3 Recherche de la composition optimale :

III.3.1 Eprouvettes utilisées :

- Prismes de 4x4x16 cm pour les essais de flexion et de compression

III.3.2 Procédure de préparation et condition de cure :

Nous avons adopté un malaxage normalisé selon la norme européenne EN 196-1 (voir chapitre II) et nous avons fait en sorte qu'avec ce malaxage le mélange soit le plus homogène possible, et que tout mélange durant toute l'étude doit posséder la même consistance (peu plastique). Un premier malaxage est réalisé à sec, puis un deuxième après introduction d'un volume nécessaire d'eau. Enfin on rase et on lisse la surface du mortier à l'aide d'une truelle. Les échantillons sont ensuite entreposés dans le laboratoire jusqu'au démoulage qui sera 24h après la mise en moule, puis dans la cure manifestée par deux ambiances différentes le laboratoire et la salle humide ; ENV(I) = (22°-HR=45%) et ENV(II) = (22°-HR=75%)

III.3.3 Optimisation du mélange (chaux –sable):

Tableau III.1 Différentes compositions des mortiers de chaux pour Ch/S=1/2

Ch/S	Type de sable	E/Ch	Composition
1/2	Sd= sable dunaire (0/0.63)	0.30	D30
		0.35	D35
		0.40	D40
		0.45	D45
		0.50	D50
		0.55	D55
	Sa=sable alluvionnaire (0/5)	0.30	A30
		0.35	A35
		0.40	A40
		0.45	A45
		0.50	A50
		0.55	A55
	S ₁ =sable mixte S ₁ =2/3(Sd) +1/3(Sa)	0.30	S ₁ 30
		0.35	S ₁ 35
		0.40	S ₁ 40
		0.45	S ₁ 45
		0.50	S ₁ 50
		0.55	S ₁ 55
	S ₂ =sable mixte S ₂ =2/3(Sa) +1/3(Sd)	0.30	S ₂ 30
		0.35	S ₂ 35
		0.40	S ₂ 40
		0.45	S ₂ 45
		0.50	S ₂ 50
		0.55	S ₂ 55

Dans cette étape on garde l'environnement sec qui est le laboratoire (22°C ; $\text{HR}=45\%$) en utilisant constamment les matériaux déjà caractérisés dans le chapitre II ; et gardant une consistance comparable pour toutes les compositions citées dans le tableau III.1 (peu plastique). D'après les résultats trouvés expérimentalement regroupés dans les tableaux III.2-3-4-5 en annexe A on remarque une dégression remarquable en propriétés mécaniques dans toutes les proportions utilisées (1/1,1/2,1/3), et qui est du effectivement au faible taux de silice réactive combinée responsable au court durcissement du mélange. Les propriétés mécaniques des mortiers confectionnés avec du sable dunaire s'approchent légèrement à celles des mortiers en sable alluvionnaire voir figure III.1.2.3.4, mais pour les autres compositions en sable mixte S_1 et S_2 les propriétés s'avèrent relativement peu élevées du à l'augmentation de la compacité du mélange et au minimisation de la porosité.

La composition S_{235} ; voir figure III.5.6.7.8 ; a donné les plus grandes valeurs en résistance à la compression et à la flexion $R_t=0.80 \text{ MPa}$ et $R_c=2.88 \text{ MPa}$. pour un rapport $E/Ch=0.35$.

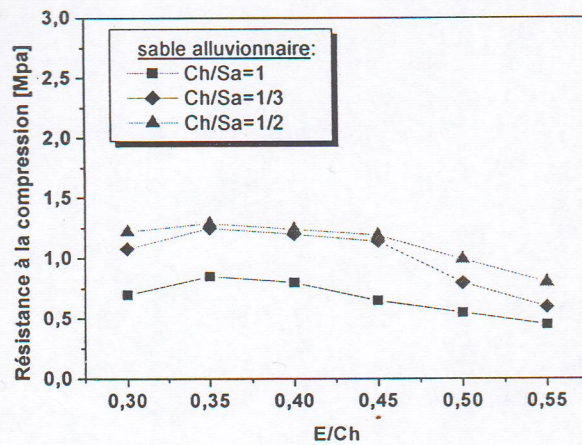
Sable alluvionnaire (S_a)

Figure III.1 : Résistance à la compression en fonction du rapport E/Ch.

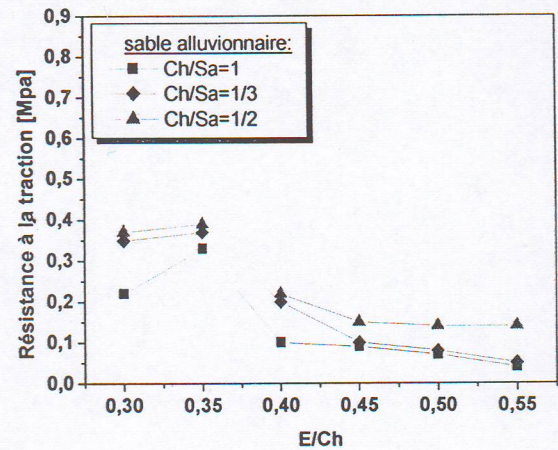


Figure III.2 : Résistance à la flexion en fonction du rapport E/Ch.

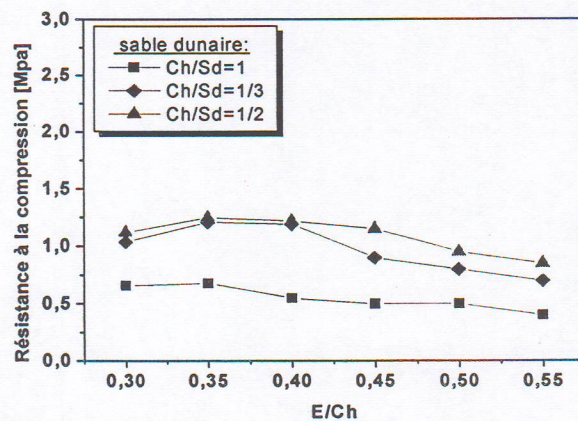
Sable dunaire (S_d)

Figure III.3 : Résistance à la compression en fonction du rapport E/Ch.

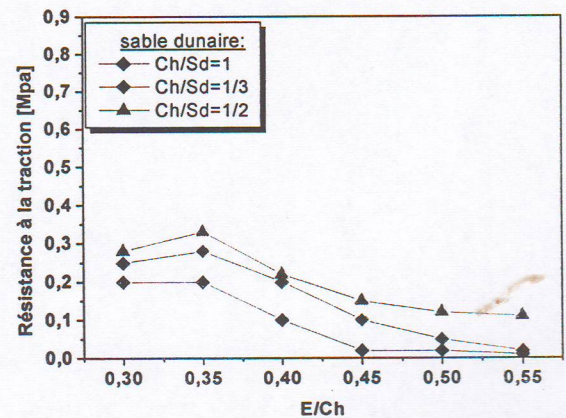


Figure III.4 : Résistance à la flexion en fonction du rapport E/Ch.

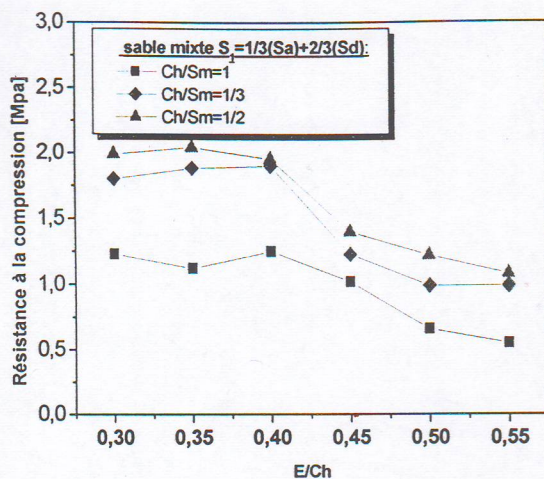
Sable mixte $[S_1 = 1/3(S_a) + 2/3(S_d)]$ 

Figure III.5: Résistance à la compression en fonction du rapport E/Ch

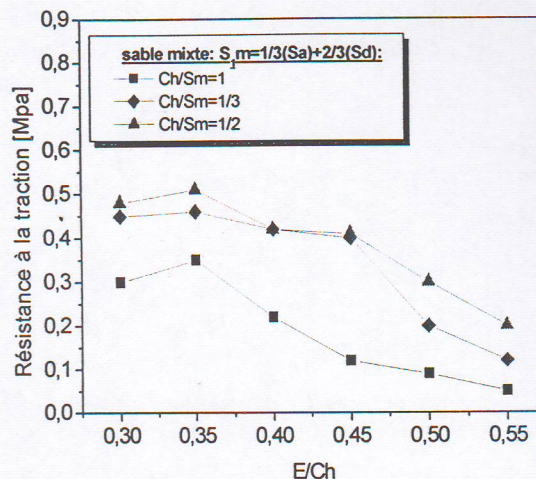


Figure III.6: Résistance à la traction en fonction du rapport E/Ch

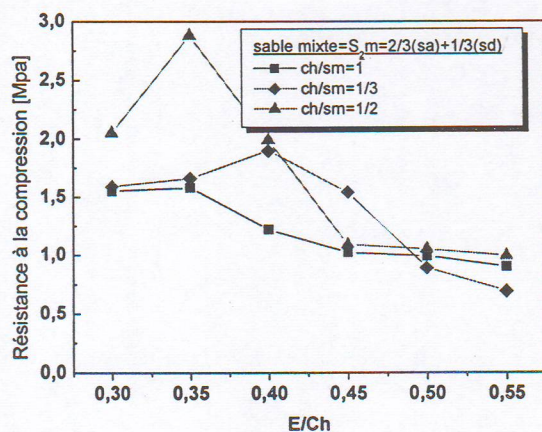
Sable mixte $[S_2 = 2/3(S_a) + 1/3(S_d)]$ 

Figure III.7 : Résistance à la compression en fonction du rapport E/Ch

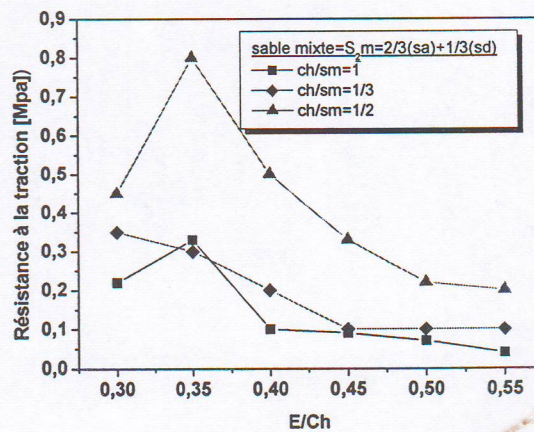


Figure III.8 : Résistance à la flexion en fonction du rapport E/Ch

III.3.4 Effet de l'addition des fines calcaires dans le mélange (S_235)

Dans cette étape on introduit dans le mélange sec de la composition S_235 les fines de calcaire qui sont tamisées à ($80\mu\text{mm}$) en proportions massiques par rapport au ciment (10% ,20%, 30% ,40%), voir tableau.III.6, tout en subissant toutes les compositions aux deux environnements I et II ; Les résultats expérimentaux sont regroupés dans le tableau III.7 en annexe A. Les figures III-9-10 montrent un pic à $F/\text{Ch}=20\%$ pour les deux types de conservation qui signifie une augmentation de la compacité, traduit par une diminution de la porosité de la matrice et par voie de conséquence une amélioration en propriétés mécaniques. Et au-delà de ce pic la matrice perd progressivement ses qualités mécaniques et qui est manifesté par les deux courbes en cloche. En remarquant toujours que la formation de la calcite augmente dans le milieu humide qui se manifeste par l'augmentation de la résistance à la compression et à la flexion de **0.99-3.05 MPa** en ENV (I) à **1.05-3.40 MPa** en ENV (II) la composition optimale est donnée par S_235F_{20} .

Tableau III.6 : Différentes compositions des mortiers de chaux avec addition en pourcentages massiques des fines calcaires dans le mélange. S_235

F/Ch (%)	Ch/ S_2	E/Ch	Composition
0	1/2	0.35	S_235
10		0.35	S_235F_{10}
20		0.35	S_235F_{20}
30		0.35	S_235F_{30}
40		0.35	S_235F_{40}

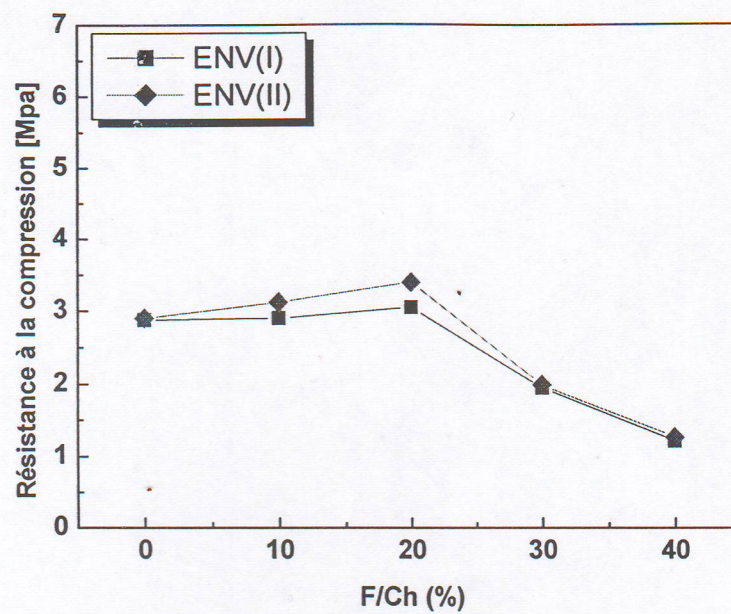


Fig.III.9 : Résistance à la compression en fonction du taux massique de fines de calcaire introduit par rapport à la chaux

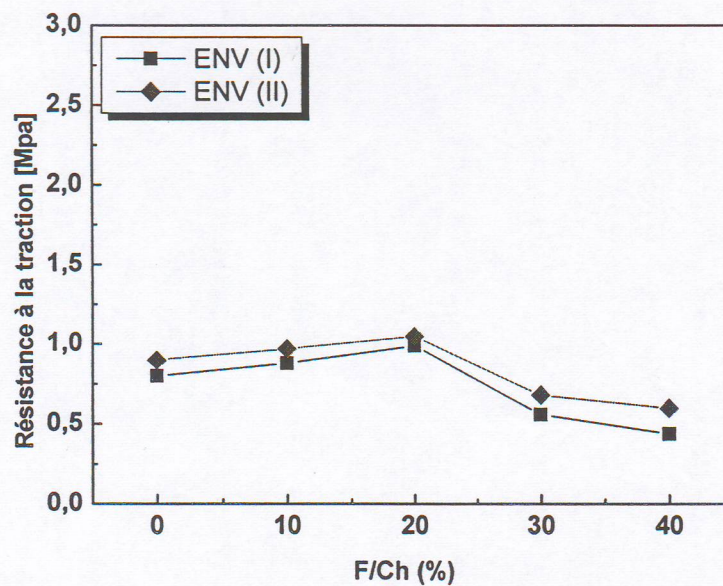


Fig.III.10 : Résistance à la flexion en fonction du taux massique de fines de calcaire introduit par rapport à la chaux

III.3.5 Effet de la substitution partielle de la chaux par le ciment dans le mélange S₂₃₅:

Dans cette étape on essaye d'améliorer les performances mécaniques du mortier par substitution massique de la chaux par un ciment avec des proportions massiques (0% 5% 10% 15% 20%) en prenant comme composition témoin S₂₃₅ et en gardant toujours une consistance équivalente pour tous les mélanges (peu plastique). Le tableau III.8 regroupe toutes les compositions possibles pour cette opération. Et pour accélérer le phénomène de durcissement qui est très long pour les mortiers de chaux, le ciment est parmi les meilleurs substituants à cause de la présence des silicates tricalciques (C₃S) qui procurent généralement aux ciments leur durcissement rapide.

Et avec 20% de ciment substitué à la chaux $L(20)=80\%(\text{chaux})+20\%(\text{ciment})$ (proportion massique) ; les propriétés mécaniques sont élevées à 28 j par rapport au mortier de référence de $R_t=0.80$ à $R_t=1.75$ [MPa] et de $R_c=2.88$ à $R_c=5.24$ [MPa] en milieu sec (laboratoire) ; et de $R_t=0.80$ à $R_t=1.99$ [MPa] et de $R_c=2.88$ à $R_c=5.87$ [MPa] en milieu humide (la salle). on constate également que la quantité de (C₃S) développe à une certaine limite l'hydraulicité de la chaux en augmentant les quantités oxydes par rapport aux quantités basiques.

La conservation en milieu humide favorise toujours une augmentation des propriétés mécaniques à cause de la grande diffusion du dioxyde de carbone qui aide à la carbonatation en formant de la calcite (CaCO₃).

Tableau.III.8 : Différentes compositions des mortiers de chaux avec substitution partielle de la chaux par le ciment en pourcentages massiques.

C/Ch (%)	L/S ₂	E/L	Composition
0	1/2	0.35	S ₂₃₅
5		0.35	S ₂₃₅ (5)
10		0.35	S ₂₃₅ (10)
15		0.35	S ₂₃₅ (15)
20		0.35	S ₂₃₅ (20)

Notation

$L(20)=80\% (\text{chaux}) +20\% (\text{ciment})$ (Proportion massique)

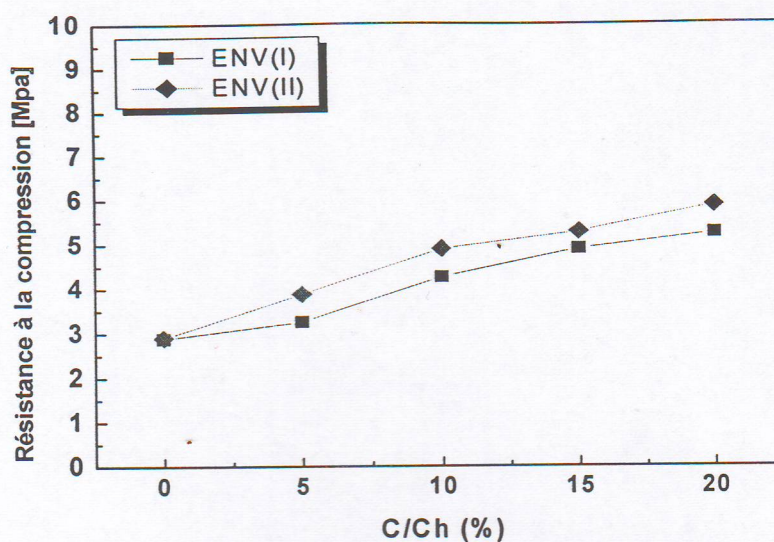


Figure III.11 : Résistance à la compression en fonction du taux massique du ciment substitué à la chaux

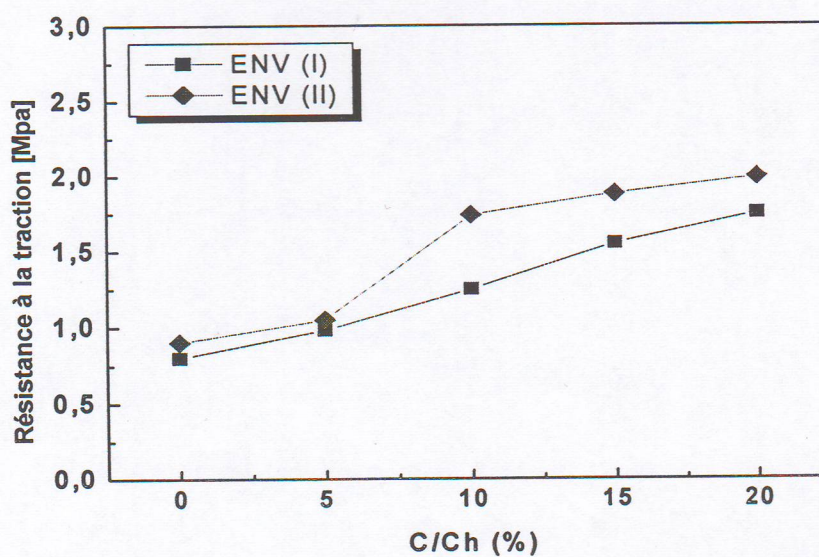


Figure III.12 : Résistance à la traction en fonction du taux massique du ciment substitué à la chaux

III.3.6 Effet de la substitution partielle et complète du sable S_2 par les fines de briques dans le mélange S_{235} :

Tableau.III.10 : Différentes compositions des mortiers de chaux avec substitution partielle et complète du sable mixte S_2 par les fines de brique **Br**.

Ch/ S_{2i}	Série	Sable S_{2i} (en masse)		E/Ch	Composition
		Br (%)	S_2 (%)		
1/2	S_2	0	100	0.35	S_{235}
	S_{21}	10	90	0.37	S_{2137}
	S_{22}	20	80	0.39	S_{2239}
	S_{23}	30	70	0.41	S_{2341}
	S_{24}	40	60	0.43	S_{2443}
	S_{25}	50	50	0.45	S_{2545}
	S_{26}	60	40	0.47	S_{2647}
	S_{27}	70	30	0.49	S_{2749}
	S_{28}	80	20	0.51	S_{2851}
	S_{29}	90	10	0.53	S_{2953}
	S_{210}	100	0	0.55	S_{21055}

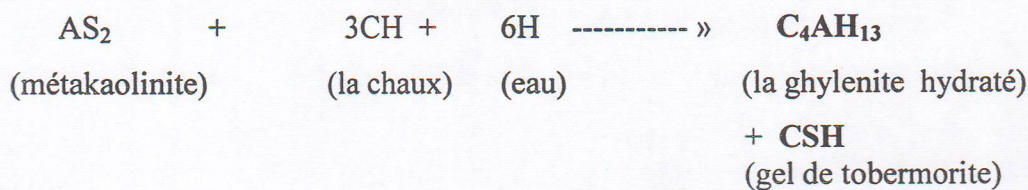
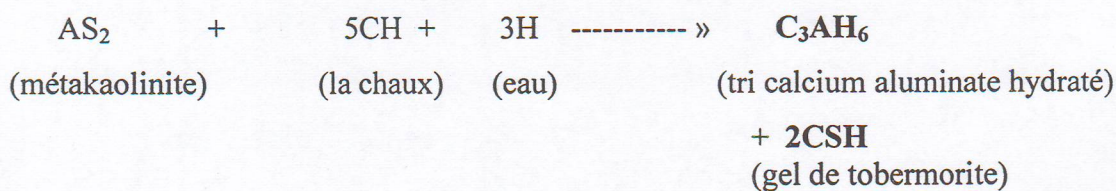
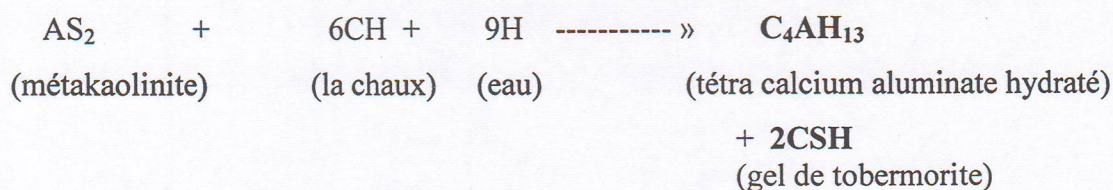
III.3.6.1 Mode de préparation et de malaxage :

Cette étape consiste à substituer le sable mixte S_2 par les fines de briques Br (0/80 μ m) avec des pourcentages massiques. (0% ,10% ,20%,30%,40%,50% ,60%,70%,80% ,90%,100%) on garde constamment une consistance équivalente (peu plastique), en ajoutant pour chaque mélange la quantité d'eau absorbée par les fines de brique ; cependant le module de finesse du sable diminue progressivement avec l'augmentation massique de ces fines, le squelette granulaire développe pour chaque ajout en fines de brique une nouvelle surface spécifique ; demandant ainsi une nouvelle fraction massique d'eau afin de maintenir une consistance comparable à toutes les compositions, et cette eau doit être prise en considération durant le malaxage. On adopte le même rythme de malaxage selon la même norme EN 196-1. Les éprouvettes tirées des deux environnements sont destinées au teste d'écrasement à la compression et à la flexion et qui ont donné les résultats présentés dans les tableaux en annexe A pour les deux types de conservation.

III.3.6.2 Résistance mécanique :

Cette étape consiste à faire activer un autre phénomène de durcissement complètement chimique (action pozzolanique) par un apport d'un nouveau matériau présentant cette qualité (pozzolanicité). On a choisi les fines des déchets de briques qui ne sont que des argiles (kaolinite) calcinés à grande température et qui contiennent de la silice réactive en quantité

primordiale La présence de ces deux formes de matériaux chaux et fine brique explique la cinétique de prise plus ou moins rapide. En effet, une première prise à court terme est assurée par la réaction pozzolanique entre la silice réactive présente dans les fines de brique et la chaux en formant des hydrates insolubles selon l'une des trois équations citées ci-dessous et qui confèrent au matériau une évolution en propriétés mécaniques ; et une deuxième prise à long terme qui est due à la réaction de carbonatation de la chaux aérienne avec le dioxyde de carbone de l'air. à 70% de fines de briques **Br** et 30% de sable mixte **S₂** représenté par la série **S₂₇** voir tableau III.11-12-13-14, en Annexe A. les propriétés mécaniques à 28j sont élevées par rapport au mortier de référence de **Rt=0.80 à Rt= 2.18 [MPa]**; et de **Rc=2.88 à Rc=7.85 [Mpa]** en milieu sec (laboratoire) et de **Rt=0.80 à 2.88 [MPa]**; et de **Rc=2.88 à Rc= 8.04 [Mpa]** en milieu humide (la salle humide) voir figure III.13 ,14,15,16 cela signifie qu'on a diminué la finesse du sable par l'apport progressif des fines de brique ; cette finesse contribue considérablement au colmatage des vides entre les grains de la matrice répercutant positivement sur les propriétés mécaniques. Les fines de brique favorisent à leur tour la création des hydrates stables en s'attachant chimiquement à la chaux (action pozzolanique) ; par la formation des composants stables selon l'une des trois équations chimiques suivantes [49] :



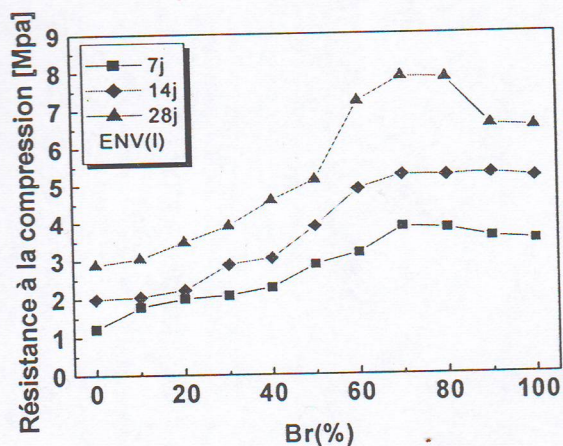


Fig.III.13 : Résistance à la compression en fonction du taux massique de fines de brique Br substituées au sable mixte S_2

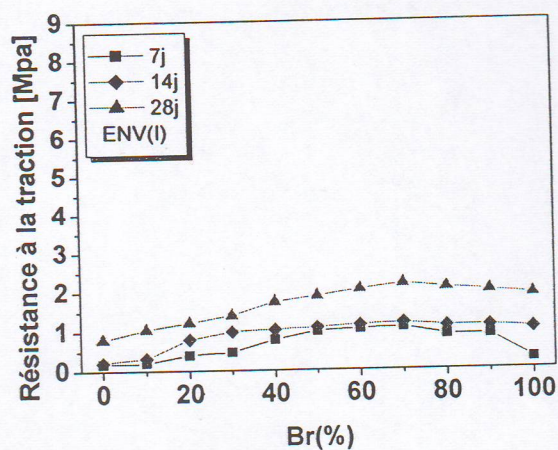


Fig.III.14 : Résistance à la traction en fonction du taux massique de fines de brique Br substituées au sable mixte S_2

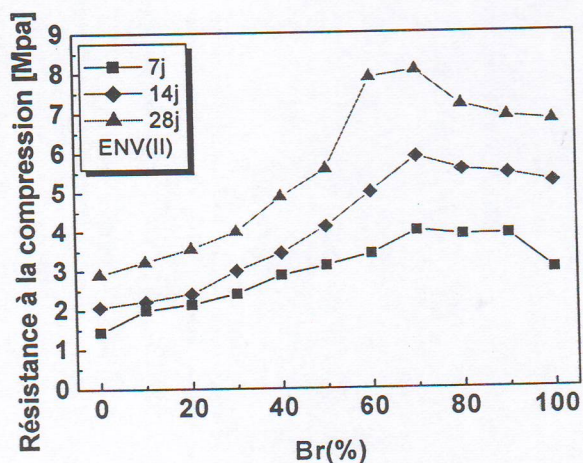


Fig.III.15 : Résistance à la compression en fonction du taux massique de fines de brique Br substituées au sable mixte S_2

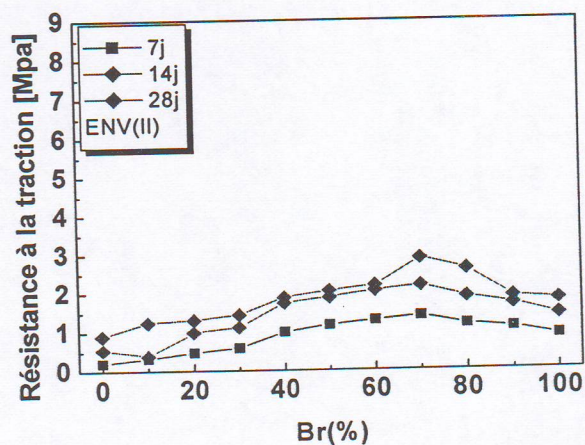


Fig.III.16 : Résistance à la traction en fonction du taux massique de fines de brique Br substituées au sable mixte S_2

III.3.7 Effet de l'addition des fines calcaires dans le mélange S₂35(20)

On garde la composition S₂35(20) obtenue dans le tableau III.8 et on introduit les fines calcaire avec des proportions massiques (0%,10%,20%,30%,40%,) par rapport à **L(20)=80% Chaux+20%Ciment**. Le tableau III.15 regroupe les différentes compositions testées à l'essai de compression et de traction et les résultats de ces différents essais sont présentés au tableau III.16 en Annexe A. Les deux figures III.17.18 montrent nettement un seul pic à F/L=10% pour les deux propriétés (Traction - compression) aux deux environnements sec et humide ; donnant respectivement **R_t=2.04** et **R_c=5.80 [MPa]** en ENV (I) et **R_t= 2.25** et **R_c=6.25 [MPa]** en ENV (II), et au-delà de ce pic le matériau durci à 28j présente une lente dégression en propriétés mécaniques. Les fines de calcaire passe de 20% lorsque le mélange est dépourvu de ciment à 10% avec du ciment ; cela se traduit par la diminution de la porosité crée par les hydrates apportés par le ciment. La conservation en milieu humide favorise toujours une meilleure hydratation qui se manifeste par l'augmentation de la résistance à la compression et à la flexion.

Tableau III.15: Différentes compositions des mortiers de chaux avec addition des fines calcaire en pourcentage massique dans le mélange S₂35(20)

F/L (%)	L/S ₂	E/L	Composition
0	1/2	0.35	S ₂ 35(20)
10		0.35	S₂35(20)F₁₀
20		0.35	S ₂ 35(20)F ₂₀
30		0.35	S ₂ 35(20)F ₃₀
40		0.35	S ₂ 35(20)F ₄₀

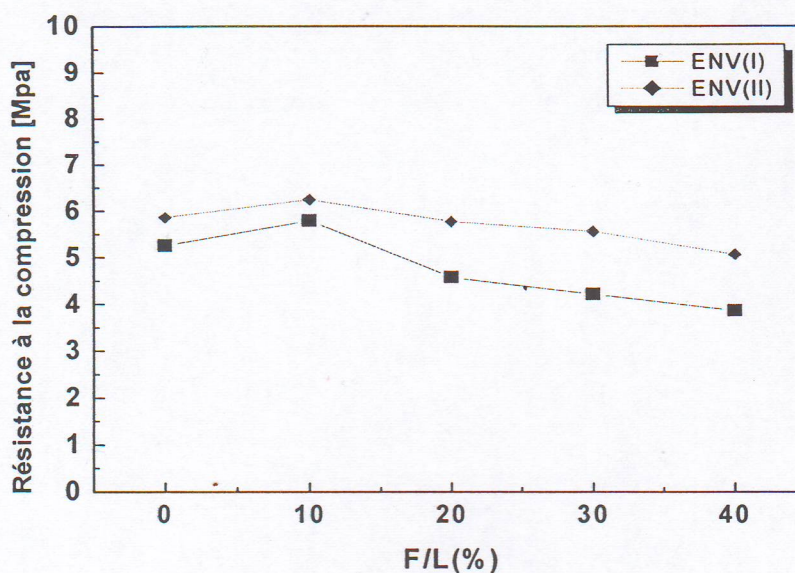


Figure III.17 : Résistance à la compression en fonction du taux massique de fines calcaires introduits par rapport au liant L

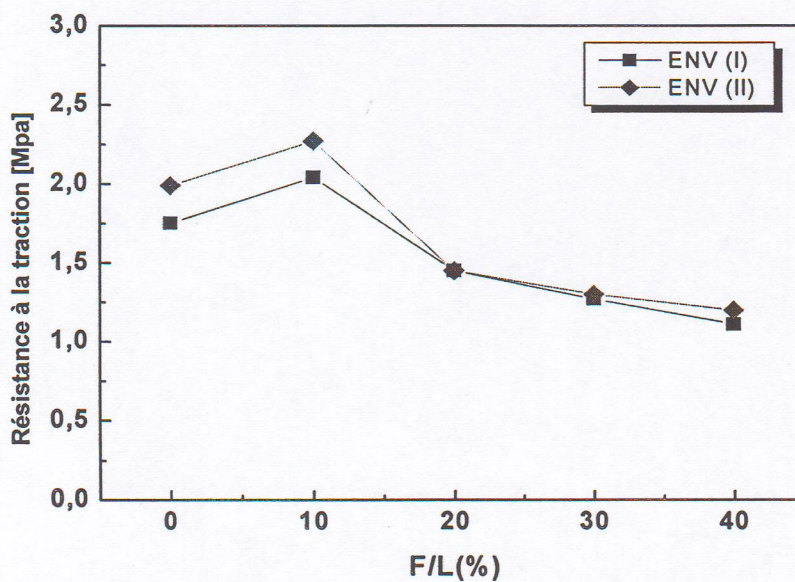


Figure III.18: Résistance à la traction en fonction du taux massique de fines d calcaires introduits par rapport au liant L

III.3.8 Effet de la substitution partielle et complète du sable mixte S_2 par les fines de briques Br dans le mélange $S_235(20)$

Tableau III.17: Différentes compositions des mortiers de chaux avec substitution partielle et complète du sable mixte S_2 par les fines de brique Br.

L(20)/ S_2	Série	Sable S_{2i} (en masse)		E/L(20)	Composition
		Br (%)	S_2 (%)		
1/2	S_2	0	100	0.35	$S_235(20)$
	S_{21}	10	90	0.37	$S_{21}37(20)$
	S_{22}	20	80	0.39	$S_{22}39(20)$
	S_{23}	30	70	0.41	$S_{23}41(20)$
	S_{24}	40	60	0.43	$S_{24}43(20)$
	S_{25}	50	50	0.45	$S_{25}45(20)$
	S_{26}	60	40	0.47	$S_{26}47(20)$
	S_{27}	70	30	0.49	$S_{27}49(20)$
	S_{28}	80	20	0.51	$S_{28}51(20)$
	S_{29}	90	10	0.53	$S_{29}53(20)$
	S_{210}	100	0	0.55	$S_{210}55(20)$

Le mode de préparation des éprouvettes est toujours le même; Les résultats expérimentaux des essais destructifs sont regroupés dans les tableaux.III.18-19-20-21 en annexe A; les propriétés mécaniques à 28j sont élevées respectivement à **2.37 ; 11.24 [Mpa]** en ENV(I) et **2.48 ; 12.24 [Mpa]** en ENV(II) voir fig.III-19-20-21-22 par rapport au mortier de référence noté $S_235(20)$ qui présente des résistances mécaniques en milieu sec $R_t=1.75 ; R_c=5.24$ [MPa] et $R_t=1.99 ; R_c=5.87$ [MPa] en milieu humide on constate d'après les résultats qu'on a amélioré les performances mécaniques du mélange. Le double développement de l'action chimique du métakaolin (fines de brique) sur la fraction cimentaire qui est 20% et sur le 80% de la chaux ont fait progressé les performances mécaniques des mortiers élaborés ; par une consommation intense en hydroxyde de calcium en milieu sec et humide. L'incorporation de métakaolin (Kaolinite calcinée) dans les ciments permet une meilleure hydratation des anhydres du ciment et une meilleur reconsolidation de la calcite. Elle provoque l'apparition d'une porosité fermée favorable à la résistance mécanique et à la durabilité des matrices cimentaire, due à la formation d'une plus grande quantité de C-S-H et à l'absence de connexions des pores. A ce titre, le métakaolin, utilisé en substitution partielle et complète du sable mixte, permet d'améliorer, les performances mécaniques des bétons et mortiers élaborés. En effet, **J. AMBROISE et al. (1994) [50]** obtiennent de bonnes résistances mécaniques à 28 jours sur des mortiers mixtes formulés avec un ciment Portland substitué à

10% ou à 20% avec du métakaolin : elles sont supérieures (107 MPa à 28 jours) à celles obtenues avec un mortier contenant 100% de ciment Portland (100 MPa). Ils observent également que la distribution des diamètres des pores d'un mortier mixte de ciment Portland et de métakaolin est déplacée vers de plus petites valeurs (0,01 μm pour les mortiers mixtes 80/20 contre 0,05 μm pour le mortier normalisé)

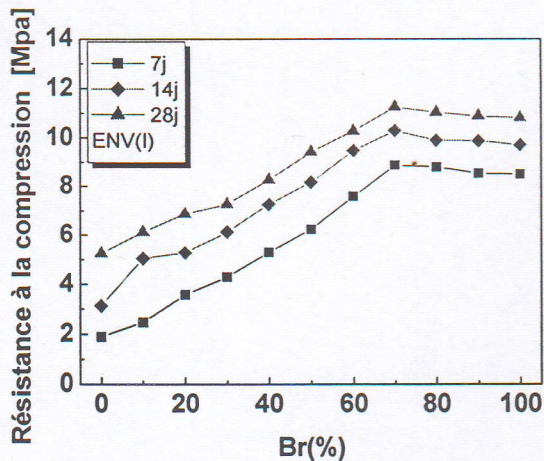


Fig.III-19: Résistance à la compression en fonction du taux massique de fines de briques Br substituées au sable mixte S_2

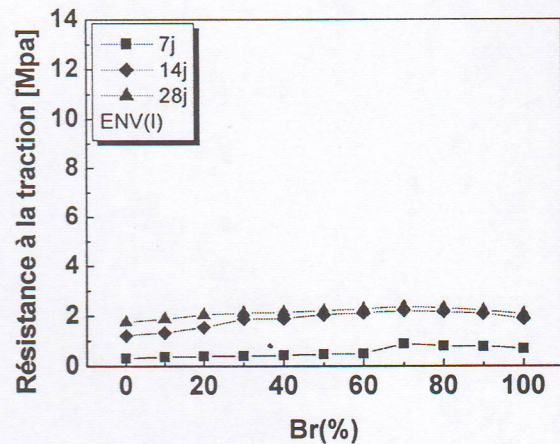


Fig.III-20 : Résistance à la traction en fonction du taux massique de fines de briques substituées Br au sable mixte S_2

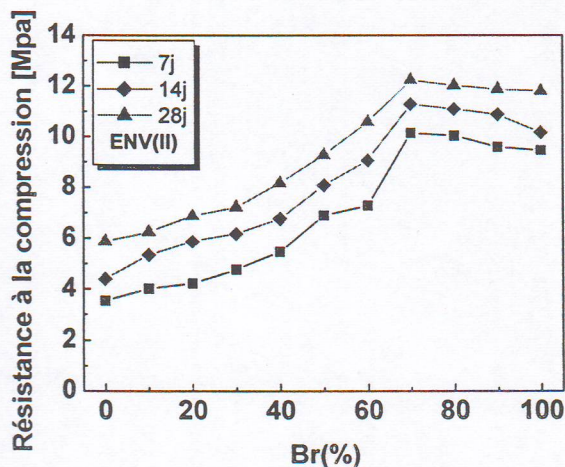


Fig.III-21 : Résistance à la compression en fonction du taux massique de fines de brique Br substituées au sable mixte S_2

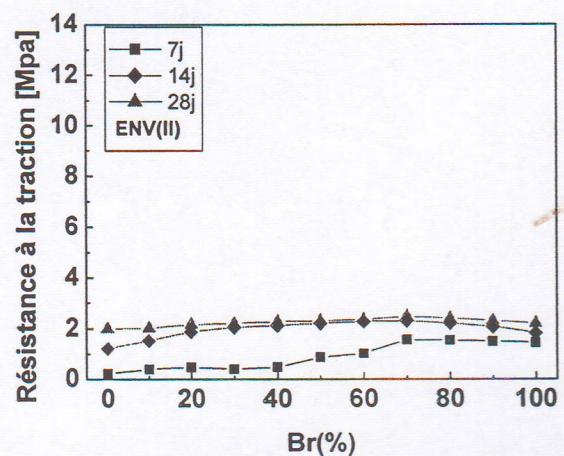
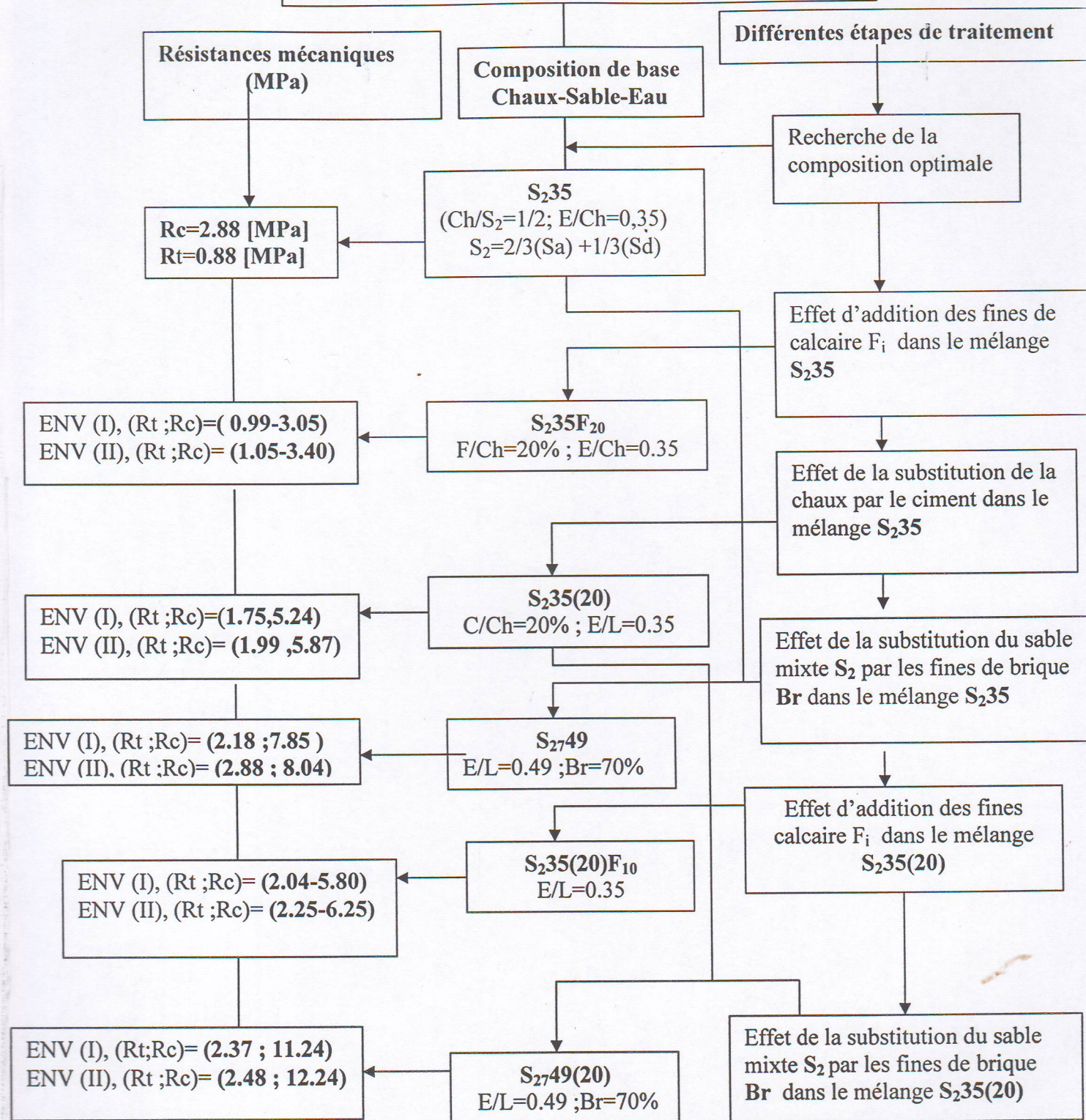


Fig.III-22 : Résistance à la traction en fonction du taux massique de fines de brique Br substituées au sable mixte S_2

Organigramme de la formulation d'un mortier de chaux



Chapitre IV

*Effet d'incorporation des granulats de bois
dans la matrice optimisée.*

Chapitre IV : Effet d'incorporation des granulats de bois dans la matrice optimisée

IV.1 Introduction :

Les copeaux de bois ; déchets industriels en quantités assez importantes pourront être valorisés en les utilisant comme granulats susceptibles de nous procurer des bétons légers présentant des performances thermiques assez bonnes tout en restant en sécurité mécanique. En étudiant la variabilité des propriétés du matériau en fonction de paramètres pré-définis comme le dosage des constituants ou la compacité, il devient possible de trouver des compromis en fonction des aspects que l'on souhaite favoriser, tout en conservant un matériau multi-usages. Ce travail a pour objectif, la valorisation de déchets industriels solides dans la perspective de développement de matériaux de construction légers thermiquement isolants. Ces déchets sont les copeaux de bois. Les résultats obtenus révèlent l'intérêt remarquable du caractère d'allègement des granulats de bois, notamment, dans l'amélioration des performances thermiques des bétons élaborés. Par contre, on enregistre une chute considérable de la résistance mécanique en fonction du dosage en granulats légers. On signale également la grande instabilité dimensionnelle des bétons de bois occasionnée par le caractère amplement absorbant de ces granulats.

IV.2 Mode de malaxage et de préparation :

On prend une classe granulaire (3/8) (voir courbe granulométrique au chapitre II) de copeaux de bois avec des pourcentages pondéraux par rapport au sable mixte S_2 ; copeaux de Bois/Sable mixte(S_2) = 2% ; 4% ; 6% ; 8% ; 10% ; 12% en les introduisant dans le mortier de chaux de la composition optimisée notée $S_{2749(20)}$ (voir organigramme de la formulation du mortier de chaux au chapitre III) , sachant que ces copeaux sont imprégnés dans une solution saline NaCL (100g/L) afin d'arrêter toute action bactériologique pouvant nuire la composition du bois et éviter également tout phénomène de suctions pendant l'hydratation conduisant ainsi à un retard de durcissement. Avant l'introduction du bois on laisse un temps de 5mn de malaxage pour le mélange sec des divers constituants du mortier dans la bétonnière, puis, on redémarre la bétonnière pendant 2mn avec introduction des granulats de bois pleinement saturés. On remplit les moules (7x7x28) en deux couches avec un léger piquage par une barrette en acier, puis ces éprouvettes sont entreposées après démoulage après 24h, dans le laboratoire et dans la salle humide pour être conduits aux divers essais destructifs. Pour la

caractérisation physico-mécaniques des bétons élaborés dans ce travail, le choix du moule de dimensions 7x7x28cm pour le mortier témoin et pour les bétons à granulats légers convient largement pour effectuer les essais de caractérisation physico-mécanique.

- **Différentes compositions des bétons élaborés :**

Tableau.IV.1 Différentes compositions des bétons élaborés pour différents pourcentages massiques en granulats de bois

B/S ₂₇ (%)	L(20)/S ₂₇	E/L(20)	Composition
0	1/2	0.49	S ₂₇ 49(20)
2		0.49	S ₂₇ 49(20)B ₂
4		0.49	S ₂₇ 49(20)B ₄
6		0.49	S ₂₇ 49(20)B ₆
8		0.49	S ₂₇ 49(20)B ₈
10		0.49	S ₂₇ 49(20)B ₁₀
12		0.49	S ₂₇ 49(20)B ₁₂

IV.3 Caractéristiques physiques :

IV.3.1 Masse volumique et Porosité :

Les tableaux IV.2-3 regroupent les résultats expérimentaux des différentes compositions élaborés en différents pourcentages massiques en granulats de bois ; avec différentes valeurs de masse volumique et porosité, et que cette dernière est déterminée en utilisant la relation II-7 du chapitre II, d'une façon générale la porosité est étroitement liée à la masse volumique par le faite que cette dernière diminue avec la légèreté des granulats composant ce béton (copeaux de bois) et vis versa ; toutes choses étant égales par ailleurs ; l'augmentation massique des granulats de bois influe simultanément sur ces deux caractéristiques physiques. À travers les différentes figures IV.1-2-3-4-5-6

On enregistre parallèlement une diminution en masse volumique qui passe de 1636 kg/m³ à 970 kg/m³ soit un taux d'allègement de plus de 40% en milieu sec et de 1646 kg/m³ à 1190 kg/m³ soit un taux d'allègement de plus de 27% cet écart d'allègement explique le mode de séchage qui diffère d'un milieu sec (laboratoire) à un milieu humide comme la salle manifesté par le taux d'évaporation du milieu ambiant. ; Toutes choses étant égales par ailleurs ; la porosité est créée progressivement dans la matrice en incorporant les granulats de bois. En effet la porosité en milieu sec à 28j pour 0% de copeaux de bois est de 19% elle

passé à 48% pour 12% et de 18% pour 0% de bois à 38% pour 12% de bois en milieu humide

Tableau IV.2 Valeurs de masses volumiques et de porosités pour différents bétons élaborés.

B/S ₂₇ (%) ENV (I)	Masse volumique apparente (kg/m ³)				Porosité (%)
	3j	7j	14j	28j	
0	1650	1644	1640	1636	19
2	1600	1579	1569	1555	23
4	1589	1560	1540	1530	24
6	1505	1481	1460	1408	29
8	1445	1400	1380	1340	32
10	1325	1300	1270	1260	35
12	1200	1100	1000	970	48

Tableau IV.3 Valeurs de masses volumique et de porosités pour différents bétons élaborés

B/S ₂₇ (%) ENV(II)	Masse volumique apparente (kg/m ³)				Porosité (%)
	3j	7j	14j	28j	
0	1680	1674	1660	1646	18
2	1640	1589	1579	1565	22
4	1590	1580	1577	1570	23
6	1512	1485	1470	1468	26
8	1455	1420	1400	1380	30
10	1355	1330	1320	1300	33
12	1240	1220	1200	1190	38

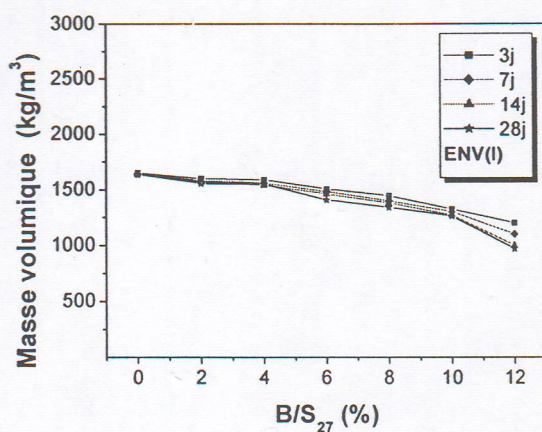


Figure IV.1 Variation de la masse volumique en fonction du pourcentage massique en bois

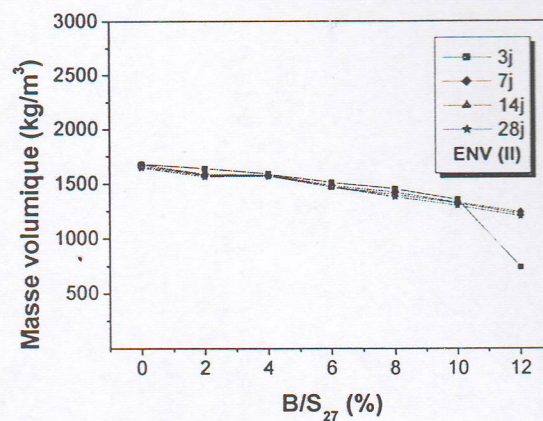


Figure IV.2 Variation de la masse volumique en fonction du pourcentage massique en bois

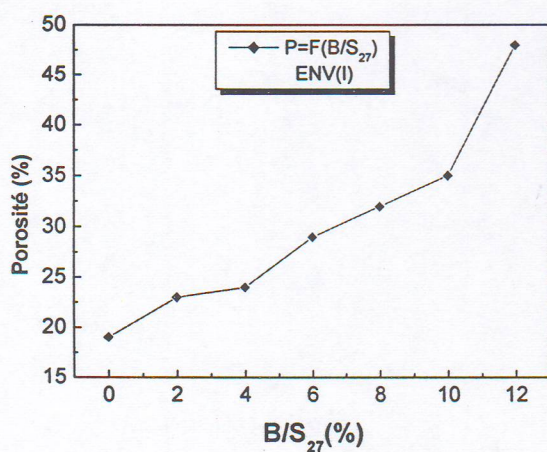


Figure IV.3 Variation de la porosité en fonction du pourcentage massique en bois

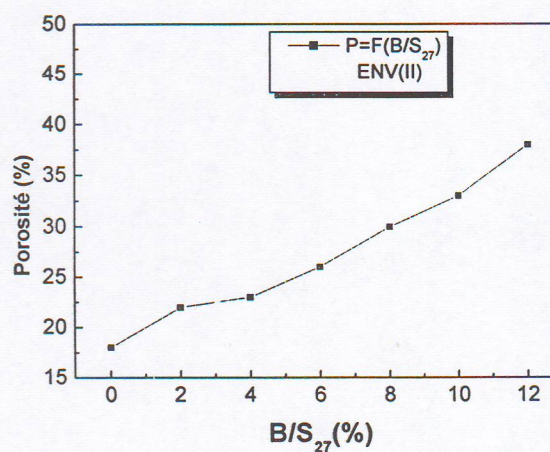


Figure IV.4 Variation de la porosité en fonction du pourcentage massique en bois

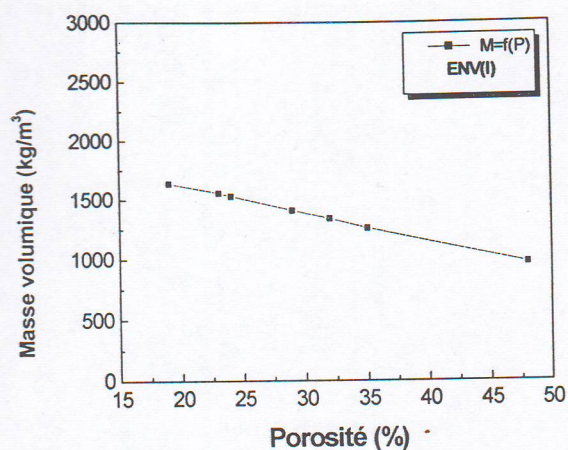


Figure IV.5 Variation de la masse volumique en fonction de la porosité.

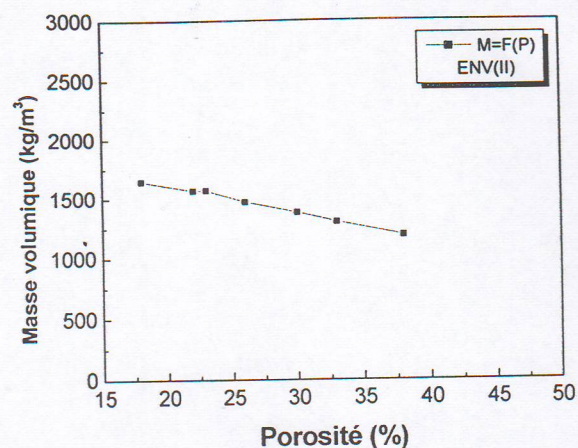


Figure IV.6 Variation de la masse volumique en fonction de la porosité.

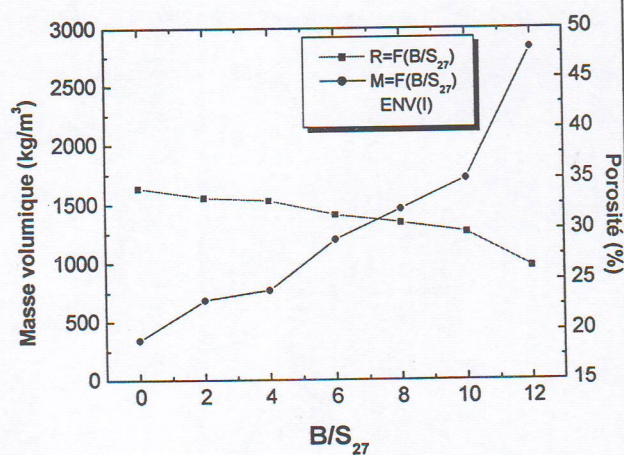


Figure IV.7 Variation de la masse volumique et de la porosité en fonction du pourcentage massique en granulats de bois. ENV (I)

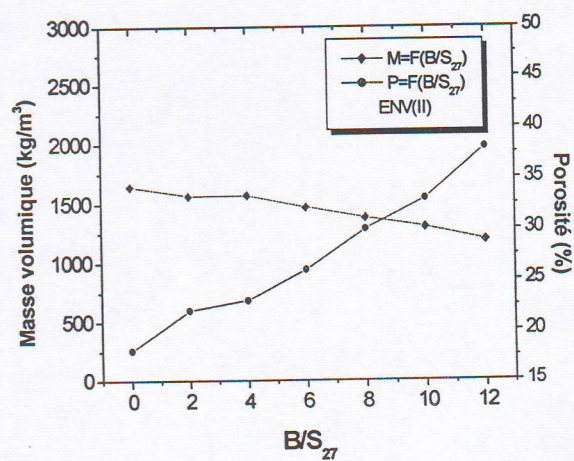


Figure IV.8 Variation de la masse volumique et de la porosité en fonction du pourcentage massique en granulats de bois. ENV (II)

IV.4 Caractéristiques mécaniques :

IV.4.1 Effet d'incorporation des granulats de bois dans la matrice optimisée :

Toutes les compositions élaborées pour teste destructif sont présentées dans le tableau IV.1 dont les résultats expérimentaux sont regroupés dans les tableaux IV.4-5. Les granulats légers entraînent une modification du comportement et des niveaux de performances mécaniques du béton. En effet, le granulat léger (copeaux de bois) est poreux donc moins résistant qu'un granulat usuel. Notre béton-chaux-bois est composé d'une matrice déjà optimisée notée $S_{2749(20)}$ [$S_{27}=70\%Br+30\%S_2$; $L(20)=80\%chaux+20\%ciment$; $E/L(20)=0.49$] et une fraction volumique en granulats de bois souples et déformables notés **B** qui occupe un certain volume dans la matrice. Les résultats regroupés dans les tableaux IV.4-5 schématisés par les figures IV.9-10-11-12 montrent nettement que la résistance à la compression et à la traction diminuent lorsque le pourcentage massique en granulats de bois augmente ; cette chute plus ou moins rapide de la résistance mécanique est constatée en passant du béton témoin pour 0% au béton le moins allégé pour 12%, donc la résistance à la compression passe de **12.24** à **1.88 MPa** soit une chute d'environ **85%** en milieu humide et de **11.24** à **0.88 MPa** soit une chute d'environ **92%** en milieu sec. toutes ces actions sont expliquées par le fait que les contraintes imposées cheminent à travers la pâte **L(20)**, contournant les « points faibles » du matériau. Le mortier subit des niveaux de sollicitation élevés et les déformations de la pâte et des granulats sont importantes. Une fois les granulats écrasés, ils ne participent plus vraiment à la résistance du matériau et le mortier finit par céder. La résistance en traction des granulats pilote donc la résistance en compression du béton de chaux-bois. Ce mode de rupture est possible car les copeaux de bois possèdent une surface poreuse importante qui crée une excellente adhérence entre la pâte et le granulat léger. Ce n'est donc pas la liaison au niveau de la surface de contact qui est détruite comme dans le cas de granulats rigides mais le granulat qui cède.

Tableau IV.4: Résistance à la flexion et à la compression aux différents ages (7, 14, 28) j des différents bétons élaborés

ENV (I)

B/S ₂₇ (%)	Rt [MPa]			Rc [MPa]		
	7j	14j	28j	7j	14j	28j
0	0.87	1.63	2.37	7.14	9.27	11.24
2	0.74	0.80	1.02	5.22	6.12	9.11
4	0.56	0.67	0.80	3.16	4.02	7.20
6	0.37	0.54	0.60	1.98	3.17	5.26
8	0.24	0.47	0.57	0.57	1.09	3.17
10	0.17	0.21	0.32	0.42	0.70	1.47
12	0.14	0.08	0.21	0.26	0.50	0.88

Tableau.IV.5: Résistance à la flexion et à la compression aux différents ages (7, 14, 28) j des différents bétons élaborés

ENV (II)

B/S ₂₇ (%)	Rt [MPa]			Rc [MPa]		
	7j	14j	28j	7j	14j	28j
0	0.89	1.66	2.48	8.14	10.27	12.24
2	0.77	0.88	1.42	6.22	8.12	10.11
4	0.59	0.77	0.90	4.16	5.02	8.20
6	0.47	0.64	0.67	2.98	3.88	6.26
8	0.30	0.49	0.58	1.57	1.83	4.17
10	0.19	0.23	0.33	1.42	0.88	3.47
12	0.14	0.17	0.26	0.77	0.60	1.88

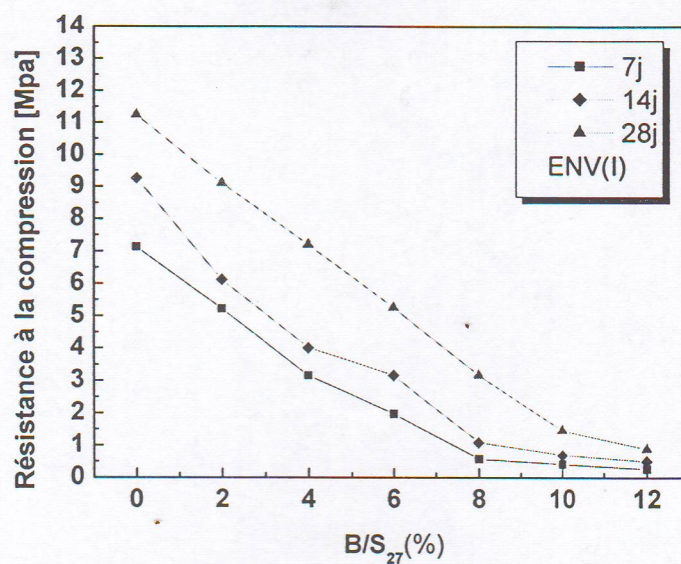


Figure IV.9 : Résistance à la compression en fonction du taux massique en granulats de bois B introduits par rapport à S_{27} . ENV (I)

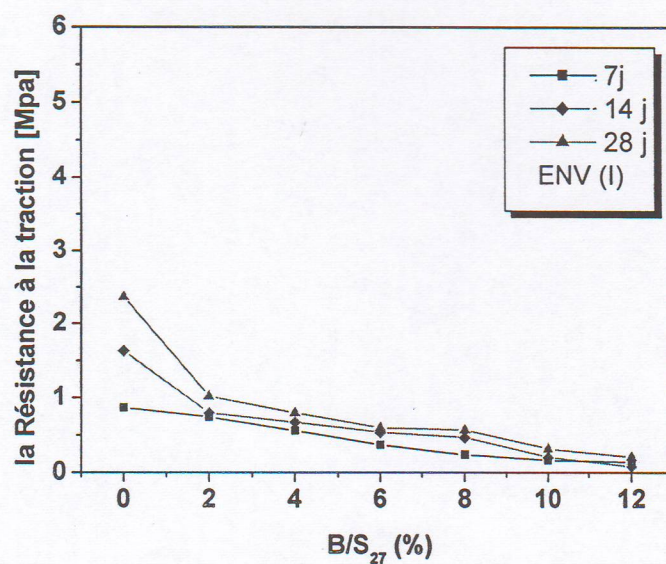


Figure IV.10: Résistance à la traction en fonction du taux du massique en granulats de bois B introduits par rapport à S_{27} . ENV(I)

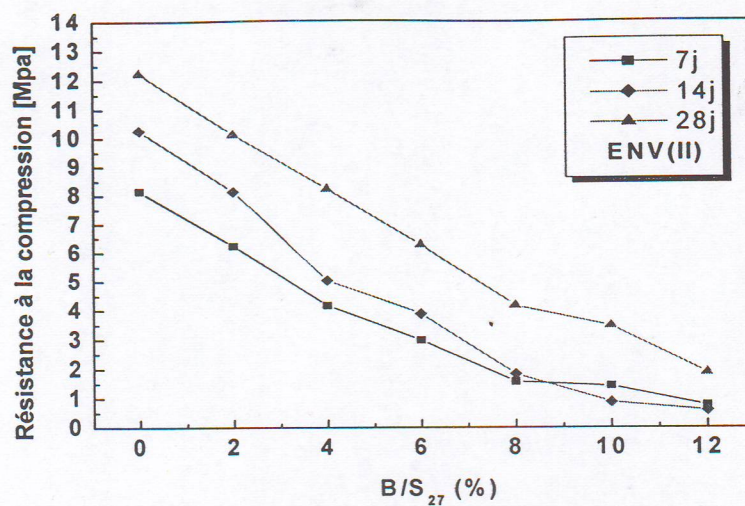


Figure IV.11: Résistance à la compression en fonction du taux massique en granulats de bois B introduits par rapport à S_{27} . ENV(II)

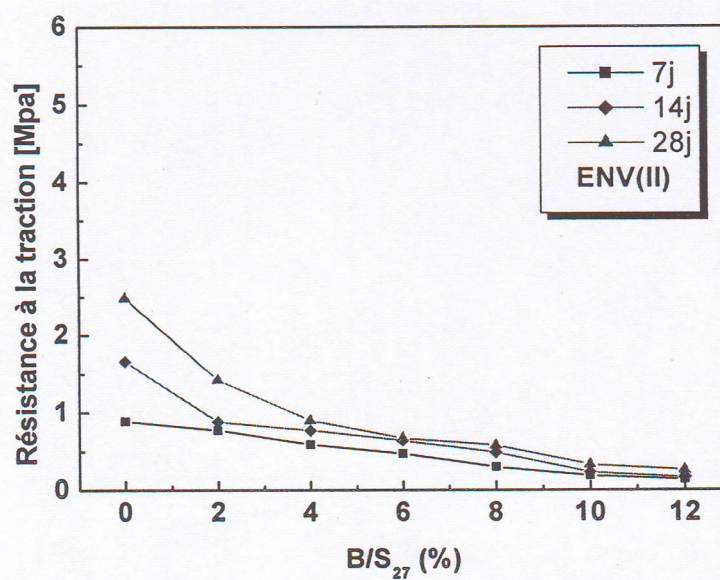


Figure IV.12 : Résistance à la traction en fonction du taux massique en granulats de bois B introduits par rapport à S_{27} . ENV(II)

IV.4.2 Résistance à la compression et porosité

La résistance à la compression et la porosité sont deux caractéristiques étroitement liées l'une à l'autre par le fait que la porosité est composée par la fraction volumique vide (air et eau) et qui a tendance à fragiliser le matériau soumis au chargement. Nous avons pris les mêmes éprouvettes du tableau IV.4-5 à 28j en déterminant leurs porosités en utilisant la relation (II-17 du chapitre II) pour différents pourcentages de bois et qui sont donnés dans le tableau IV.6 en prenant comme témoin la composition optimisée notée $S_{27}49(20)$.

D'après les résultats schématisés dans les figures IV.13-14-15-16 on remarque que la résistance à la compression diminue avec l'augmentation de la porosité et que cette dernière augmente également avec l'évolution massique des granulats de bois ; cela est expliqué nettement par le fait que la porosité est composée par la fraction volumique vide V_v (air-eau) qui tend à fragiliser le matériau.

Tableau IV.6 Valeurs de la résistance à la compression et de la porosité à 28j en fonction du pourcentage en bois aux deux environnements I et II

B/S ₂₇ (%)	ENV (I)		ENV (II)	
	Rc(MPa)	Porosité (%)	Rc(MPa)	Porosité (%)
0	11.24	19	12.24	18
2	9.11	23	10.11	22
4	7.20	24	8.20	23
6	5.26	29	6.26	26
8	3.17	32	4.17	30
10	1.47	35	3.47	33
12	0.88	48	1.88	38

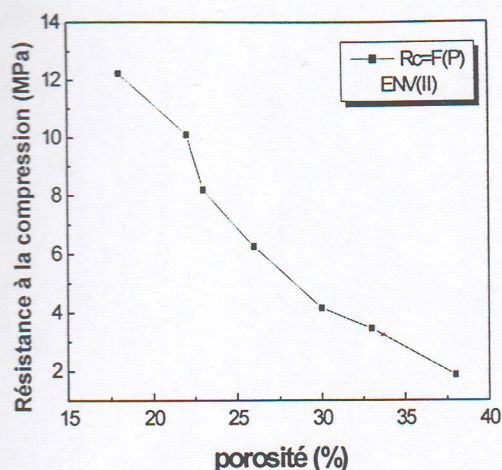


Figure IV.13 Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité ENV (II)

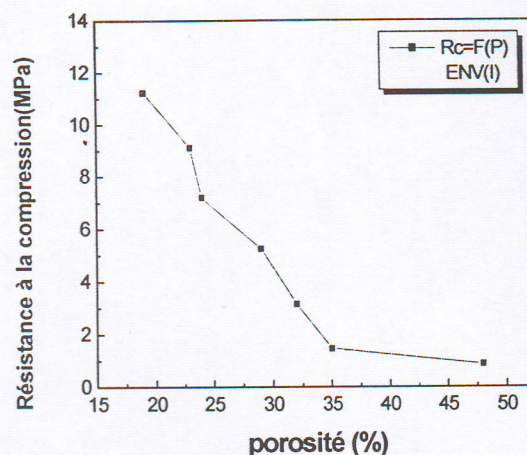


Figure IV.14 Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité. ENV (I)

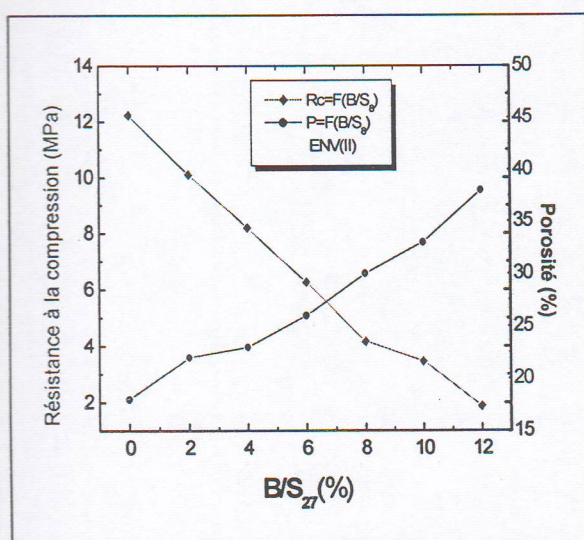


Figure IV.15 Variation de la résistance à la compression et de la porosité en fonction du taux massique de granulats de bois. ENV (II)

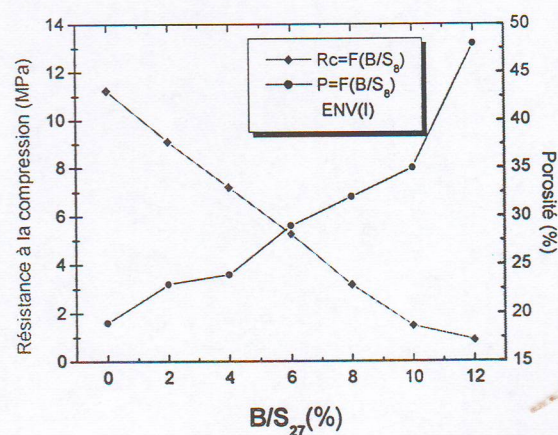


Figure IV.16 Variation de la résistance à la compression et de la porosité en fonction du taux massique de bois. ENV (I)



IV.4.3 Ajustement de la relation (résistance à la compression -porosité) aux différents modèles :

Nous avons procédé à un ajustement de la résistance à la compression en fonction de la porosité aux trois modèles cités ci-dessous. Il s'agit des modèles de Balshin, Ryshkewich et Schiller dont les expressions mathématiques sont données par [51] :

Modèle de Balshin : $R_c = R_0 \cdot (1 - n)^\alpha \dots\dots\dots (IV.1)$

Modèle de Ryshkewich : $R_c = R_0 \cdot e^{-\beta n} \dots\dots\dots (IV.2)$

Modèle de Schiller : $R_c = \gamma \cdot \ln\left(\frac{n_{cr}}{n}\right) \dots\dots\dots (IV.3).$

Où α , β et γ sont les coefficients des modèles, R_0 est la résistance en compression à porosité nulle et n_{cr} la porosité critique correspondant à une résistance nulle.

On a regroupé dans le tableau IV.7 les expressions théoriques des différents modèles. Les coefficients sont calculés par régression sur la courbe expérimentale $R_c = f(P)$.

Les résultats expérimentaux en comparaison avec les modèles théoriques sont représentés dans les figures IV.17-18. Nous constatons d'après les résultats trouvés qu'il y'a une très bonne concordance avec les trois modèles notamment avec les deux modèles Balshin et Ryshkewich en milieu humide et qui présentent une corrélation $R^2=0.99$, et avec le modèle de Ryshkewich en milieu sec présentant une corrélation $R^2=0.93$

Tableau IV.7 Relation entre la résistance à la compression et la porosité des bétons de chaux bois selon les trois modèles théoriques.

Modèles	ENV-I		ENV-II	
	Type d'équation	corrélation	Type d'équation	corrélation
Balshin	$R_c = 38,11 \cdot (1-p)^{6,1774}$	0.91	$R_c = 49,432 \cdot (1-p)^{6,7917}$	0.99
Ryshkewich	$R_c = 70,54 \cdot e^{-9,5807 \cdot p}$	0.93	$R_c = 73,45 \cdot e^{-9,4825p}$	0.99
Schiller	$R_c = 12,17 \cdot \ln\left(\frac{0,45}{p}\right)$	0.91	$R_c = 14,43 \cdot \ln\left(\frac{0,42}{p}\right)$	0.98

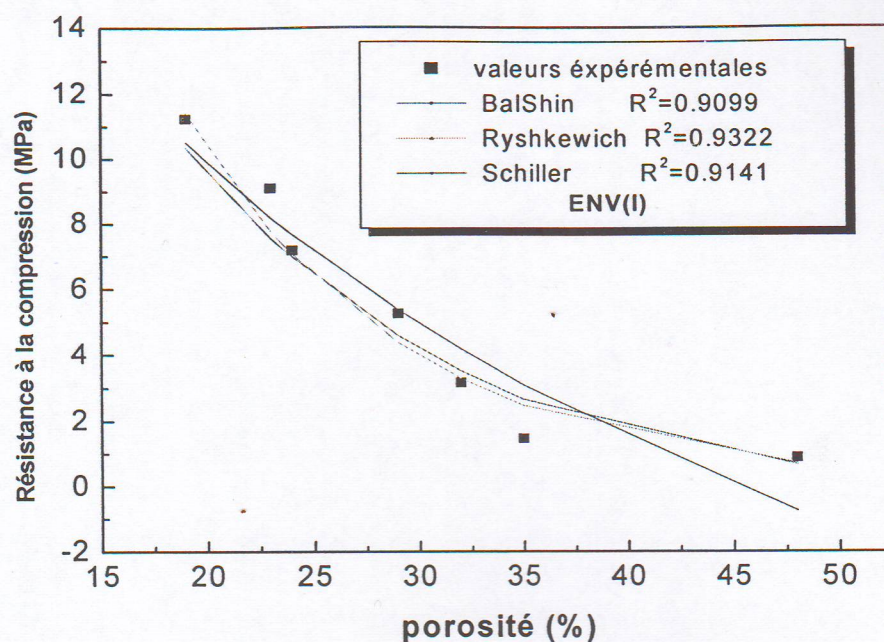


Figure IV.17 Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité et différents ajustements aux trois modèles. ENV (I)

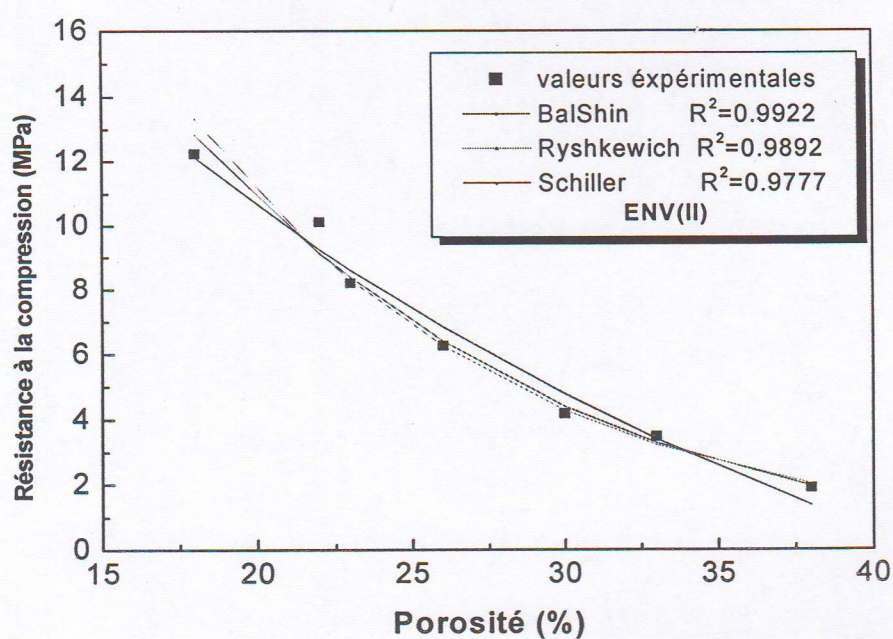


Figure IV.18 Variation de la résistance à la compression en fonction de la porosité et différents ajustements aux trois modèles. ENV (II)

IV.5 Retrait et mécanisme de séchage :

Lors de l'étude du séchage deux aspects doivent être pris en compte : l'état final du matériau et la cinétique du phénomène. L'état final du matériau, c'est-à-dire lorsqu'il est en équilibre avec le milieu extérieur, dépend principalement des conditions thermodynamiques extérieures et de la microstructure du matériau. La cinétique de séchage dépend quant à elle non seulement des conditions extérieures mais également de la géométrie du matériau, de la surface de séchage, de la porosité.

En pratique, la démarche la plus simple pour étudier le séchage est de suivre l'évolution de la masse ou de la masse volumique des échantillons dans le temps ; voir figure IV.21-24 qui montrent les deux fonctions $\rho = F(t)$ pour deux types de conservation. On constate d'après les résultats trouvés que l'augmentation progressive de copeaux de bois provoque une contraction volumique causée par un départ d'eau vers le milieu extérieur schématisée dans les figures IV.19-20-22-23 suivie par une diminution en masse volumique. Si on compare d'après les résultats trouvés les caractéristiques de séchage du matériau témoin avec 0 % de bois et ceux les plus allégés jusqu'à 12 % de bois :

$$\text{Perte de masse \%} = \text{perte de masse \%} = \frac{\Delta \rho}{\rho_0} = \frac{\rho_0 - \rho(t)}{\rho_0} 100 \quad 100 = \frac{\rho_0 - \rho(t)}{\rho_0} 100$$

Avec ρ_0 : Masse volumique initiale de l'échantillon (kg/m^3)

$\rho(t)$: Masse volumique de l'échantillon au temps t (kg/m^3)

La vitesse d'évaporation est définie comme la quantité d'eau qui disparaît, rapportée à surface de séchage et au temps écoulé.

$$V_{\text{évapor}} = \frac{\Delta \rho}{\Delta t S_{\text{séchage}}} \quad (\text{kg/m}^5 \cdot \text{j})$$

$\Delta \rho$: Masse volumique d'eau perdue entre t_1 et t_2 (kg/m^3)

$\Delta t = t_2 - t_1$ = temps entre deux pesées en jours (j)

$S_{\text{séchage}} = 0.0833 \text{ m}^2$ (éprouvette 7x7x28) surface de séchage (en m^2)

D'après les résultats obtenus on conclue :

Le retrait augmente à 28j avec l'augmentation de copeaux de bois en passant de **1.17mm/m** pour 0% de bois à **2.3 mm/m** pour 12 % de bois en milieu sec ENV (I) et de **1.1mm/m** à **2.2 mm/m** dans la salle humide ENV (II). Voir figures IV.20-23 en remarquant les deux figures IV-19-22 présentent en quelque sorte une stabilité au delà de 28j cette stabilité est traduit par un arrêt d'évaporation ; il est dû à l'effet combiné de plusieurs phénomènes d'origine physique couplés entre eux (transferts de masse, changements de phases). Initialement, le matériau contient une quantité d'eau homogène dans toute la géométrie de l'échantillon. Deux zones

peuvent être définies dans le matériau : une zone diffusionnelle et une zone à teneur en eau initiale. La zone diffusionnelle, située à la surface du matériau, permet la remontée d'eau liquide par capillarité, sa vaporisation et son évacuation vers le milieu extérieur. La zone à teneur en eau initiale se situe, quant à elle, dans la partie la plus éloignée de la surface elle alimente la zone diffusionnelle par effets capillaires, jouant le rôle de réservoir. [WHITAKER, 77] [DERDOUR, 98]. Lorsque le matériau sèche, il se produit une migration de l'eau vers la « zone diffusionnelle ». Cette eau s'évapore et il est nécessaire d'alimenter la surface pour maintenir l'équilibre hydrique. Tant que le matériau contient suffisamment pour alimenter la zone diffusionnelle, la vitesse de séchage reste constante. A partir d'une teneur en eau dite critique, l'eau liquide ne peut plus rejoindre la surface. Un gradient de teneur en eau se développe et la vitesse de séchage décroît. Cette dernière est gouvernée par la diffusion de vapeur. Une zone sèche apparaît en surface du matériau, la zone diffusionnelle s'éloigne de la surface en gardant quasiment la même épaisseur et la zone à teneur en eau initiale décroît, jusqu'à disparaître à la fin du séchage et on aura la stabilité dimensionnelle de l'échantillon. On constate également une vitesse de séchage plus remarquable en milieu sec qu'en milieu humide à cause de la force d'évaporation que développe le milieu sec voir figures IV.21-24 la masse volumique à 28j diminue avec l'augmentation de copeaux de bois en passant de 1636 kg/m³ pour 0% de bois à 970 kg/m³ pour 12% de bois en milieu sec ENV (I) et de 1646 kg/m³ pour 0% de bois à 1190 kg/m³ pour 12% de bois en milieu humide ENV (II) voir figures IV. 21-24

Tableau.IV.8 Résultats de la perte de masse et de la vitesse d'évaporation aux différentes cures

B/S ₂₇ ENV (I)	Perte de masse %				vitesse d'évaporation (kg/m ⁵ .j)		
	3j	7j	14j	28j	3j-7j	7j-14j	14j-28j
0	0	0,36	0,24	0,24	18,00	6,85	3,42
2	0	1,31	0,63	0,89	63,02	17,14	12,00
4	0	1,83	1,28	0,65	87,03	34,29	8,57
6	0	1,60	1,42	3,56	72,02	36,01	44,58
8	0	3,11	1,43	2,89	135,05	34,29	34,29
10	0	1,88	2,31	0,78	75,03	51,44	8,57
12	0	8,33	9,09	3	300,12	171,49	25,72

Tableau.IV.9 Résultats de la perte de masse et de la vitesse d'évaporation aux différentes cures

B/S ₂₇ ENV (II)	Perte de masse %				vitesse d'évaporation (kg/m ³ .j)		
	3j	7j	14j	28j	3j-7j	7j-14j	14j-28j
0	0	0,36	0,84	0,84	18,01	24,00	12,00
2	0	3,11	0,63	0,88	153,06	17,15	12,00
4	0	0,63	0,19	0,44	30,01	5,14	6,00
6	0	1,78	1,01	0,14	81,03	25,72	1,715
8	0	2,40	1,41	1,43	105,04	34,30	17,15
10	0	1,84	0,75	1,51	75,03	17,15	17,15
12	0	1,61	1,64	0,83	60,02	34,30	8,57

Tableau.IV.10: Retrait et masse volumique en fonction du dosage du bois et de l'âge de cure

B/S ₂₇ ENV (I)	Retrait (μmm/m)				Masse volumique apparente (kg/m ³)			
	3j	7j	14j	28j	3j	7j	14j	28j
0	690	820	990	1170	1650	1644	1640	1636
2	680	890	1000	1300	1600	1579	1569	1555
4	780	944	1150	1340	1589	1560	1540	1530
6	1000	1190	1199	1390	1505	1481	1460	1408
8	1080	1450	1600	1900	1445	1400	1380	1340
10	1180	1600	1670	2100	1325	1300	1270	1260
12	1200	1680	1690	2300	1200	1100	1000	970

Tableau.IV.11: Retrait et masse volumique en fonction du dosage du bois et de l'âge de cure

B/S ₂₇ ENV (II)	Retrait (μmm/m)				Masse volumique apparente (kg/m ³)			
	3j	7j	14j	28j	3j	7j	14j	28j
0	590	790	980	1100	1680	1674	1660	1646
2	650	880	990	1200	1640	1589	1579	1565
4	740	920	1105	1310	1590	1580	1577	1570
6	990	1100	1214	1380	1512	1485	1470	1468
8	1042	1400	1580	1600	1455	1420	1400	1380
10	1150	1500	1590	1800	1355	1330	1320	1300
12	1180	1640	1780	2200	1240	1220	1200	1190

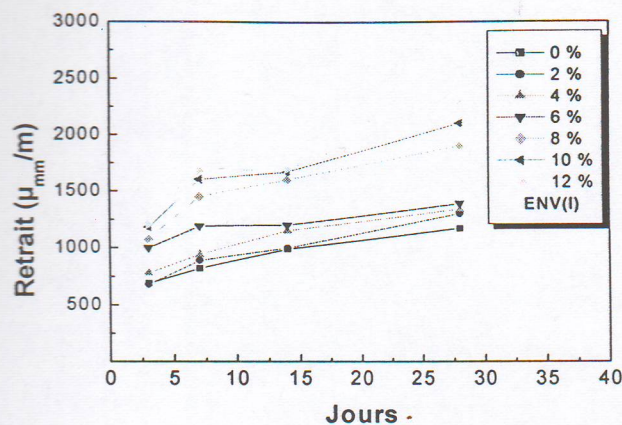


Figure IV.19: Variation du Retrait en fonction du temps

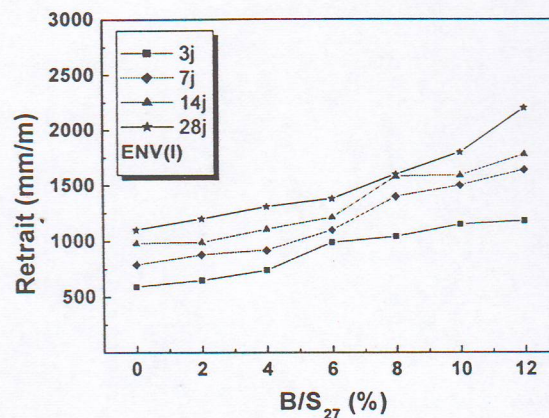


Figure IV.20: Variation du Retrait en fonction du taux massique de copeaux de bois B par rapport à S_{27}

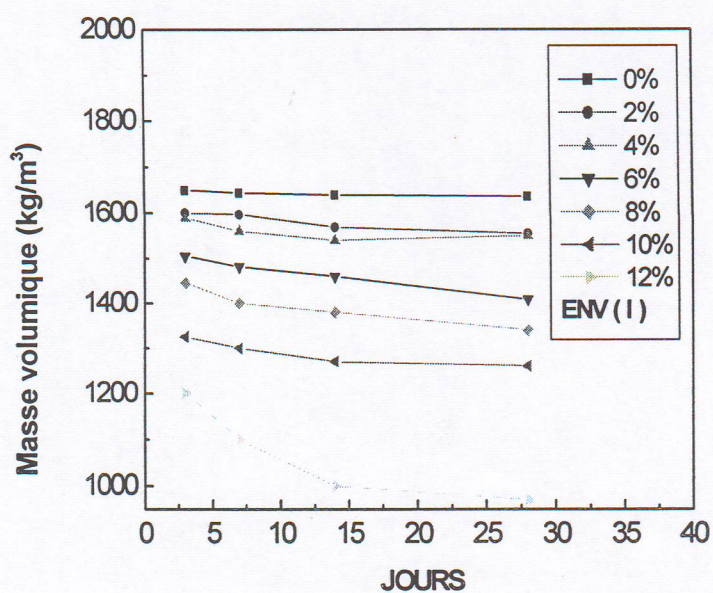


Figure IV.21: Variation de la masse volumique en fonction du temps

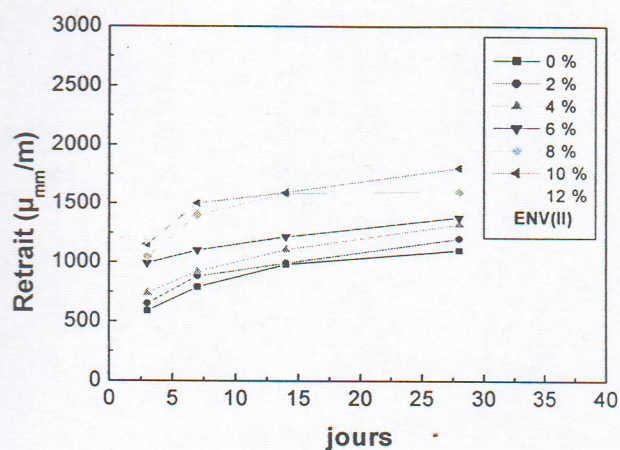


Figure IV.22: Variation du Retrait en fonction du temps

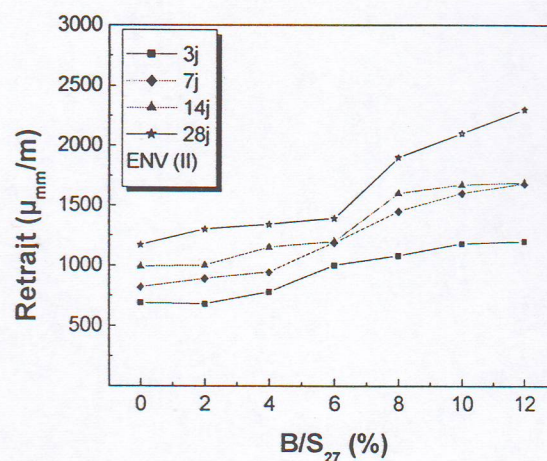


Figure IV.23: Variation du Retrait en fonction du taux massique de copeaux du bois

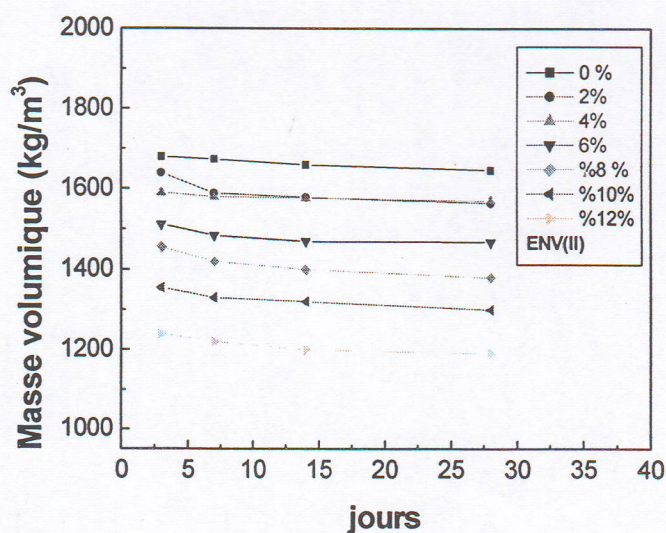


Figure IV.24: Variation de la masse volumique en fonction du temps

V.6 Absorption capillaire :

Les différentes compositions présentées dans le tableau IV.1 élaborés aux différents pourcentages massiques de bois (0% 2% 4% 6% 8% 10 % 12 %) sont soumis au phénomène de capillarité cité dont la procédure expérimentale est cité dans le chapitre II. et dont les résultats sont présentés dans le tableau IV.12 en Annexe A

On conclut d'après les résultats trouvés que:

La cinétique de capillarité est accélérée en augmentant le pourcentage massique de copeaux de bois. Cela à cause de la force de succion que disposent ces copeaux en permettant à l'eau de s'écouler au travers de leurs volumes poreux. Voir figure IV.25. En effet la sorptivité évolue avec l'évolution du taux massique des copeaux en passant de $0.08 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ pour 0% de bois à $0.46 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^{0.5}$ pour 12% de bois en remarquant parallèlement l'augmentation de la vitesse de l'écoulement unidimensionnelle des différents bétons élaborés manifesté par la différence de temps de stabilité hydrique en passant de 0% de granulats de bois à 12%. La stabilité hydrique est atteinte lorsque l'échantillon ne peut plus absorber de l'eau, qui se schématise dans la figure IV.26 par une asymptote pour chaque pourcentage massique de granulats de bois.

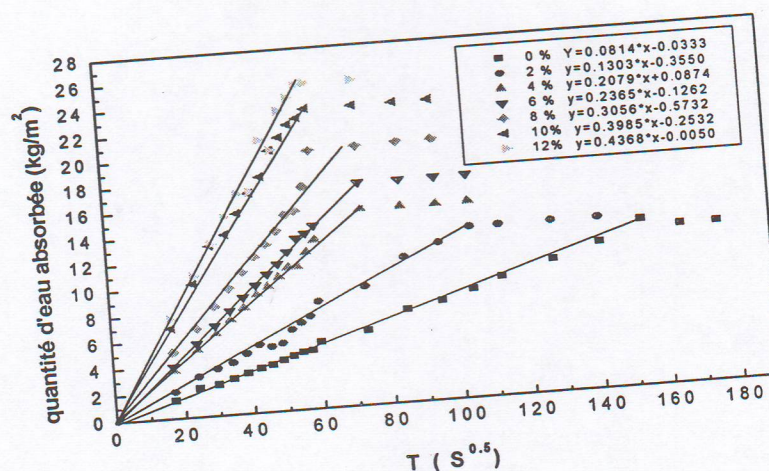


Figure IV.25 Courbe d'absorption capillaire des différents bétons élaborés

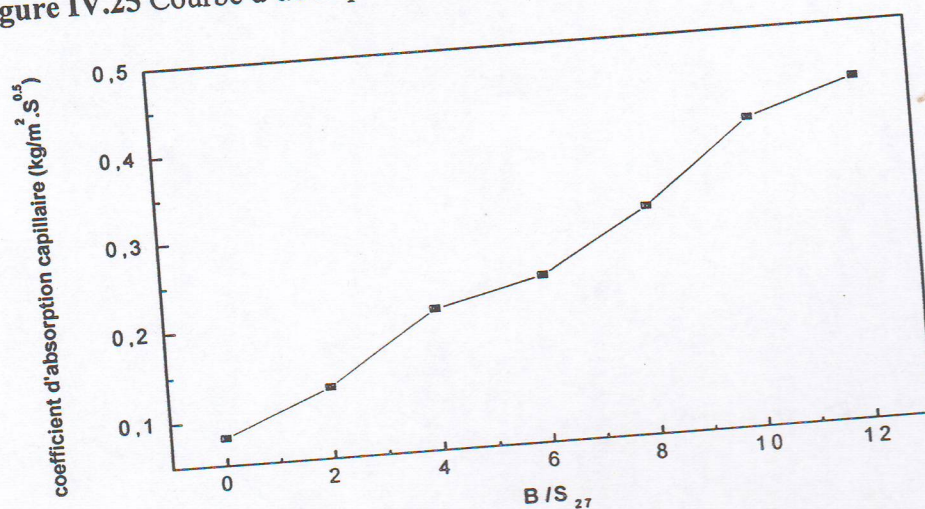


Figure IV.26 Variation du coefficient d'absorption capillaire en fonction du taux massique de copeaux de bois introduits

*Conclusion générale et
recommandations*

Conclusion générale et recommandations

L'objectif principal de ce travail est la formulation et la caractérisation d'un béton de bois en utilisant la chaux comme liant hydraulique. Malheureusement, la chaux utilisée de l'usine de Saida présente un caractère hydraulique assez faible qui se traduit par l'insuffisance de la quantité de silice réactive. Ceci nous a conduit à la recherche de techniques de formulations susceptibles d'améliorer les performances mécaniques du mortier de chaux, celui-ci représente la matrice liante du béton de bois objet de cette étude. Sur ce, le travail a été orienté en premier à l'étude de l'influence de l'ajout de fines minérales sur les propriétés physicomécaniques du mortier de chaux. Cette partie a permis d'optimiser la composition de la matrice du béton de chaux. Dans une seconde étape, on a abordé le volet formulation et caractérisation d'un béton de chaux léger obtenu par l'incorporation de différentes proportions de copeaux de bois dans la matrice optimisée.

L'étude expérimentale entreprise en première partie a été axée sur l'augmentation de la compacité de la matrice par l'addition progressive des fines calcaire dans le mélange (chaux-sable mixte) ou d'améliorer l'hydraulicité du liant (chaux) par substitution partielle du sable par des fines de briques ou la substitution d'une certaine quantité de chaux par du ciment ou par l'action simultanée du ciment et de fines de brique. Cette étude a été finalisée par l'optimisation de la composition du mortier de chaux qui forme la matrice liante du béton de bois. En effet, la substitution de 70% de sable mixte S_2 ($2/3 Sa + 1/3 Sd$) par des fines de briques Br (granulométrie $< 80\mu m$) et la substitution de 20% de chaux par du ciment ($L=80\%$ Chaux+20% Ciment), le mélange obtenu noté $S_{27}49(20)$ mélangé avec 49% d'eau par rapport à la masse du liant L(20) a permis d'élaborer un mortier possédant des caractéristiques mécaniques optimales. En effet, la résistance à la compression a atteint la valeur **12.24 MPa**, soit un gain de résistance de plus de **325%** par rapport au mortier témoin dont la résistance n'est que de **2.88 MPa**. Ce résultat témoigne sur l'effet bénéfique de l'utilisation des fines de briques issues des déchets de briqueterie dans l'amélioration de l'activité pouzzolanique de la chaux. A signaler que sans l'ajout de ciment, les fines de briques ont permis d'augmenter la résistance à la compression de **2.88 MPa** à **8.04 MPa**, soit un gain de résistance de plus de **179%**. Ce résultat nous permet également de voir effectivement l'intérêt bénéfique de ce type de matériaux sur le plan économique, technique et écologique. En comparaison avec les produits industriels comme les briques silico-calcaire dont la résistance à la compression est de l'ordre de **15 MPa** contre une masse volumique de **1700 kg/m³** et qui demandent pour leur fabrication des énergies de compactage et de durcissement à l'autoclave assez importantes.

Afin de cibler le deuxième objectif et dans la mesure où les caractéristiques mécaniques restent suffisantes, l'idée d'utiliser des granulats de bois comme facteurs d'allègement est une proposition aussi intéressante non seulement d'un point de vue économique, mais également environnemental. En effet, la recherche d'un compromis entre résistances mécaniques et performances thermiques des matériaux élaborés est l'objectif principal de l'idée de l'allègement.

Le procédé d'allègement utilisé est l'incorporation d'une certaine proportion de copeaux de bois comme substituant d'une fraction de la matrice dense. Le pourcentage de copeaux de bois est limité conformément aux caractéristiques réglementaires cibles des bétons légers. En particulier, la résistance à la compression qui ne doit pas descendre en dessous de 0.5MPa. A cet effet, différentes formulations de bétons de bois ont été élaborées en faisant varier le pourcentage de copeaux de bois de 0 à 12% avec un pas de 2% par rapport à la quantité du sable S_{27} (30% du sable mixte S_2 + 70% de fines de briques Br). A chaque formulation, il faut corriger la quantité d'eau de gâchage en tenant compte du taux d'absorption des copeaux de bois. Les résultats de caractérisation ont montrés l'intérêt du procédé adopté. En effet, la masse volumique mesurée après séchage à l'air libre pendant 28 jours passe de 1636 kg/m^3 à 970 kg/m^3 en incorporant 12% de copeaux de bois, soit un taux d'allègement de plus de 40%. Quant à la résistance à la compression elle passe de **12.24 MPa** à **1.88 MPa**, soit une chute de résistance d'environ 85%.

On conclut également que les bétons élaborés présentent une instabilité dimensionnelle manifestée par la contraction volumique de la matrice et particulièrement celle des granulats de bois, qui dégagent leur eau libre lors du séchage. En effet le retrait passe de **1.17 mm/m** pour 0% de copeaux de bois à **2.3 mm/m** pour 12%. Ces valeurs restent malheureusement en dehors des valeurs ciblées par la commission (Aliment 2002) ce qui nécessite la recherche d'autres modes de traitement visant à minimiser les variations dimensionnelles des bétons de bois élaborés.

De plus, les essais d'imbibition capillaire ont montré l'avidité à l'eau des bétons élaborés. En effet, la porosité capillaire des copeaux de bois a participé à l'augmentation de la porosité du composite chaux-sable-bois ce qui explique l'augmentation de la sorptivité (absorption capillaire) qui passe de $0.08 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-0.5}$ pour la matrice (0% bois) à $0.436 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-0.5}$ pour le composite le plus léger (12% de bois). A cet effet, et lors de la mise en œuvre de tel matériau, des dispositions préliminaires doivent être prises en considération afin d'immuniser les parois contre l'infiltration de l'eau et d'assurer la longévité du bâti.

Enfin, et pour une caractérisation complète des matériaux élaborés, l'étude de leur comportement thermique est nécessaire afin de montrer leur intérêt dans l'amélioration du confort thermique dans les bâtiments. De plus, la recherche d'autres techniques de traitement de la chaux ainsi que des copeaux de bois est à poursuivre afin d'arriver à une technologie de fabrication facile, économique et satisfaisant aux exigences des normes en vigueur.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] **J. CHIAVERINI.** Développement d'un mortier à base de chaux avec des propriétés améliorées pour une application élargie. Département de Géosciences, Minéralogie et Pétrographie, Université de Fribourg, (2004), projet n° 4613,2
- [2]. **J. M. TEUTONICO GIBBONS.P, J. ASHURST D JOHNSTON** Pure and natural hydraulic lime, tests and research Lime Mortar; Tests (24 months) .Conforms to European Norm (EN 459) and French Norm NFP 15.311. (2000)
- [3] **A. DESSAINT.** Techniques et pratique de la chaux, Édition 1990, Paris , EYROLLES.
- [4] **F. DAVIDOVITS.** Les Mortiers de pouzzolanes artificielles chez Vitruve évolution et historique architecturale. D.E.A. Université Paris X- Nanterre (1992-1993).
- [5] **R. DUVAL.** La durabilité des armatures et du béton d'enrobage. Presses ENPC. Paris, 1992, pp.173-225.
- [6] **VALSARAJ, K.T.** Elements of environmental Engineering — thermodynamics and kinetics. New York: Lewis Publishers, 1995, 649 p.
- [7] **MASSAZA F.** chimie des additions pouzzolaniques et des ciments mélangés. Il cemento, 1976, 73, vol. 1, p3-38.
- [8] **MAJUNDAR A. J., LARNER L.J.** the measurement of pozzolanic activity. cement and Concrete Research, 1977, vol.7, p209-210.
- [9] **DRON R.** activité pouzzolanique. BULL. liaison Labo. Pont et chaussées .vol.1978, p66-69.
- [10] **DRON R.** les différents liants hydrauliques et pozzolaniques. Obtention et mode d'activation. BULL. liaison Labo. Pont et chaussées. 1978, vol. 94, p73-83.
- [11] **BARRET.P, MIENETRIER.D., COTTIN.B.** Study of silicate-lime solution reaction. .Cement and Concrete Research, 1977, N°7, p61-67.
- [12] **KONDO, R OHSAWA, S.** Réactivités of variious silicates with calcium hydroxyde and water. Journal of American Ceramic Society, 1979, vol. 62, n°9-10, p311-324.
- [13] **BLOMBLED, JP.** Liant à bas coût pour les pays en développement. Lyon : INSA. 1985, 123p. Rapport de fin de contrat REXCOOP.
- [14] **J.I. DAVISON.** CBD-123-F. Comportement mécanique des mortiers de maçonnerie. CNRC. Publié 1974

- [15] U.CHINIE MELO, et N.BIILLONG. Activation pouzolanique des déchets de briques et tuiles cuites. African Journal of science and Technologie (AJST).science and Engineering Series, 2004, Vol. 5, No. 1, pp.92-100.
- [16] P. RODRIGUES, F.HENRIQUES. The effect of hydraulic components on lime mortars. Coimbra: Universidade de Coimbra, 2002. XXX IAHS World Congress on Housing Construction, Coimbra, Portugal, Setembro 2002, Ural, Abrantes, Tadeu (eds.), p.1711-1718.
- [17] FERNANDO.M.A. HENRIQUES, AND. A.E CHAROLA, Comparative study of standard test procedures for mortars. Berlin: Moller Druck, 1996. In "8th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone", Josef Riederer (ed.), p.1521-1528.
- [18] BS 4551. British Standards Institution BSI (1980): Methods of testing mortars, screeds and plasters. BSI, London.:1980.
- [19] EN 1961. Comité Européene de Normalisation CEN (1987): Methods of testing cement; determination of strength. CEN, Brussels.
- [20] CSTB. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (1982): Modalités d'essais des enduits extérieurs d'imperméabilisation de mur à base de liants hydrauliques. Cahiers du CSTB, Paris, (230), cahier 1779.
- [21] CSTB. Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (1993): Certification CSTB des enduits monocouches d'imperméabilisation. Cahiers du CSTB, Paris, (341), cahier 2669-4.
- [22] RILEM. Recommended tests to measure the deterioration of stone and to assess the effectiveness of treatment methods. II.6 Water absorption (capillarity). In Matériaux et Constructions ,Commission 25-PEM (1980);, vol. 13, n° 75.
- [23] NORMAL (1985). Assorbimento d'acqua per capillarità. Coeficiente di assorbimento capillare. CNR - ICR, Rome, 11/85.
- [24] J. LANAS, J.L. Pérez Bernal, M.A. Bello, J.I. Alvarez Galindo. Hydraulique Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars .Cement and Concrete Research 34 (2004), p 2191-2201
- [25] A.KOMAR. Matériaux et élément de construction –Edition Mir, 2Pervi Rijski péréoubk, Moscou – I110, GSP, URSS.
- [26] M.MOUSSA JALEL. Produits silico-calcaire, CNERIB (Centre Nationale d'Etude et de Recherche Intégrées du bâtiment) .1992.

Bibliographie

- [27] BUTSCHI, P.-Y. DESCHENAUX, B. MIAO, N. K. SRIVASTAVA Utilisation du chanvre pour la préfabrication d'éléments de construction. Dans Bâtir notre civilisation. Comptes rendus, 31^{em} Congrès annuel de la société canadienne de génie civil, Moncton Société canadienne de génie civil, Montréal (Qué.).2003 pp. 336-1 – 336-6.
- [28] A. SHORT, W. KINNIBURGH, Lightweight Concrete, CR Books Ltd., 1968.
- [29] ACI 213R-87, Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part I: Materials and General Properties of Concrete, Detroit, Michigan, 1994.
- [30] M.-H. ZHANG, O.E. GJ_RV, Characteristics of lightweight aggregates for high strength concrete, ACI Materials Journal, 1990, 88(2):150-158,
- [31] G. FAGERLUND, Frost resistance of concrete with porous aggregate, Report of cement and concrete institute in Sweden, 1978.
- [32] M.-H. ZHANG, O.E. GJORV, Microstructure of interfacial zone betweenLight weight aggregate and cement paste, Cement and Concrete Research, 1990. 20(4):610-618,
- [33] J. PUNKKI, O.E. GJ_RV, P.J.M MONTEIRO, Microstructure of high-strength Light weight aggregate concrete, 4th International Symposium on utilization of high-strength/high-performance concrete, Paris, 1996 ,pp1281-1287,.
- [34] A. BENTUR, S.-i IGARASHI, K. KOVLER, Prevention of autogenous shrinkage in high-strength concrete by internal curing using wet lightweight aggregates, Cement and Concrete Research, 2001 31:1587-1591,.
- [35] D.P. BENTZ, K.A. SNYDER, Protected paste volume in concrete; Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate, Cement and Concrete Research, 1999 29(11):1863-1867,.
- [36] K. KOHNO, T. OKAMOTO, Y. ISIKAWA, T. SIBATA, H. MORI, Effects of Artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete, Cement and Concrete Research, 1999. 29(4):611-614,
- [37] BESSET .J. Bois et matériaux dérivés, Techniques de l'Ingénieur, C 925, INIST-CNRS, Paris, (1986)
- [38] GOVIN, A. Aspects physico- chimique de l'interaction bois- ciment. Modification de l'hydratation du ciment par le bois. Thèse INSMSE, Institut National de Science de la Matériau de Saint- Etienne2003, 198 p.

- [39] WIENHAUS, O. Influence des substances sur la prise du ciment. *Holztechnologie*, 1979, vol. 20, n°4. pp. 207-215.
- [40] LANGE, H., SOMATUPANGM, H. and NEUBANUER, A. Influence of latent hydraulic binders on the properties of wood cement composite. *Proceeding of the International Conference on fiber and particle boards bonded with Inorganic Binders*, University of Idaho, 1988
- [41] BURMESTER, A. Stability dimensionnel of Wood, *Holz als Roh Werkstoff*, 1975, vol.33, pp.333-335.
- [42] YOUNGQUIST, K. KRZYSIK, M. and ROWELL, R.M. Dimensional stability of acetylated aspen flakeboard. *Wood and Fiber Science Journal*, 1986, vol. 18 (1), pp. 90-98.
- [43] P. PIMIENTA, J. CHANDELLIER, M. RUBAUD, F. DUTRUEL, H. NICOLE, Etude de faisabilité des procédés de construction à base de Béton de Bois, *Cahier du CSTB*, Livraison 346, N°2703, 1994.
- [44] M. S. GOUAL. Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation de co-produits argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent. Caractérisation et comportement thermo hydrique, Thèse de doctorat d'état de l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Février 2001.
- [45] K. ALRIM, A. LEDHEM, O. DOUZANE, R.M. DHEILLY, M. QUENEUDEC Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood Composites *Cement & Concrete Composites* 21 (1999) 269-276
- [46] R. DUPAN, R. LANCHON, J.C. SAINT ARROMAN, « Granulats, Sols, Ciments, et Bétons ». (PARIS) (2000). Edition CASTEILLA
- [47] M. VENUAT -Le traitement des sols à la chaux et au ciment-, édition CERILH, Paris 1^{ère} édition, 1980
- [48] DREUX.G., FESTA. J., Nouveau guide du béton et de ces constituants, 1998 Eyrolles,
- [49] GIULIA .B and LUIGIA.B; Study of the pozzolanicity of some bricks and clays *Construction and building Materials*, 1997, Vol.11, N°1, pp.41-46,
- [50] AMBROISE J., MAXIMILIEN S., PERA J. Properties of metakaolin blended cements. *Advanced Cement Based Materials*, 1994, vol1, pp.161-168.
- [51] A. BOUGUERRA, F. DE BARQUIN, A. LEDHEM, R. DHEILLY, M. QUENEUDEC Etude de la porosité des Bétons de Bois à matrice argileuse : relation avec les propriétés mécaniques et thermiques, Soumis à *Materials and Structure/Matériaux et Construction*.

Annexe. A

Tableau II.8 Résultats de l'analyse granulométrique du sable dunaire

(T=20°±2°C et HR=45±10%)

Masse du sable =250g					
Module AFNOR	Dimension des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
29	0.63	3	3	1.312	98.688
28	0.50	6	9	3.938	96.062
27	0.40	9.5	18.5	8.096	91.804
26	0.315	49.5	68	29.76	70.24
25	0.250	39.5	107.5	47.04	52.56
24	0.20	36	143.5	62.80	37.2
23	0.16	44.5	188	82.275	17.72
22	0.125	17	205	89.71	10.29
21	0.10	11	216	94.53	5.47
20	0.08	6	222	97.155	2.845
19	0.063	3.5	225.15	98.69	1.31
18	0.05	1	226.5	55.124	0.876
17	0.04	1	227.5	99.582	0.438
fond	< 0.04	1	228.5	100	0.00

Tableau I.9 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable alluvionnaire

(T=20°±2°C et HR=45±10%)

Masse du sable =250g					
Module AFNOR	Dimension des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
38	5	286.6	286.6	14.33	85.67
37	4	37.2	232.8	16.19	83.81
36	3.15	52.2	376	18.8	81.2
35	2.5	37.8	413.8	20.69	79.31
34	2.0	42.2	456	22.8	77.2
33	1.6	30.5	486.5	24.32	75.68
32	1.25	77.5	564	28.2	71.8
31	1.0	56.4	620.4	31.02	68.98
30	0.80	64.7	685.1	34.25	65.75
29	0.63	350.7	1035.8	51.79	48.21
28	0.5	204.9	1240.7	62.03	37.97
27	0.4	89.5	1330.2	66.51	33.49
26	0.315	242.3	1572.5	78.62	21.38
25	0.250	165	1737.5	86.87	13.13
24	0.20	92.7	1830.2	91.51	8.49
23	0.16	103.6	1933.8	96.69	3.31
22	0.125	23.5	1957.3	97.86	2.14
21	0.1	6.8	1964.1	98.2	1.8
20	0.08	12.4	1976.1	98.82	1.18
19	0.063	3.6	1980.1	99.00	1
18	0.05	0.3	1980.4	99.02	0.98
17	0.04	1.2	1981.6	99.02	0.92
	< 0.04	1.2	1982.8	100	0.00

Tableau II.15 Résultats de l'analyse granulométrique des granulats de bois

Masse du bois =250g					
Module AFNOR	Tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulés (g)	Refus cumulés (%)	Tamisât (%)
41	10	0	0	0	100
40	8	0.2	0.2	0.08	99.92
39	6.3	45.3	45.5	17.5	82.6
37	4	13.2	48.1	22.5	77.5
36	3.15	47.5	106.2	40.84	59.16
35	2.5	39.7	145.9	56.11	43.89
34	2.0	33.2	179.1	68.88	31.12
32	1.25	52.9	232	89.23	10.77
31	1	6.8	238.8	91.84	8.16
28	0.5	15.7	254.5	97.88	2.12
27	0.4	4	258.5	99.42	0.58
-	<0.4	0.2	258.7	100	0.00

Tableau III.2 : Résistance à la traction et la compression à 28j [Sd=Sable dunaire]

E/Ch	Proportions massiques des constituants du mortier (chaux+sable dunaire)					
	Ch/S=1		Ch/S=1/3		Ch/S=1/2	
	Rt	Rc	Rt	Rc	Rt	Rc
0.30	0.20	0.66	0.25	1.04	0.28	1.12
0.35	0.20	0.68	0.28	1.21	0.33	1.25
0.40	0.10	0.55	0.20	1.19	0.22	1.22
0.45	0.02	0.50	0.10	0.90	0.15	1.15
0.50	0.02	0.50	0.05	0.80	0.12	0.95
0.55	0.01	0.40	0.02	0.70	0.11	0.85

Tableau III.3 : Résistance à la traction et à la compression à 28j [Sa =sable alluvionnaire].

E/Ch	Proportions massiques des constituants du mortier (chaux+sable alluvionnaire)					
	Ch/S=1		Ch/S=1/3		Ch/S=1/2	
	Rt	Rc	Rt	Rc	Rt	Rc
0.30	0.22	0.70	0.35	1.08	0.37	1.22
0.35	0.33	0.85	0.37	1.25	0.39	1.29
0.40	0.10	0.80	0.20	1.20	0.22	1.24
0.45	0.09	0.65	0.10	1.14	0.15	1.19
0.50	0.07	0.55	0.08	0.80	0.14	0.99
0.55	0.04	0.45	0.05	0.60	0.14	0.80

Tableau III.4 : Résistance à la traction et à la compression à 28j [$S_1 = 1/3(S_a) + 2/3(S_d)$]

E/Ch	Proportions massiques des constituants du mortier (chaux+sable mixte)					
	Ch/S=1		Ch/S=1/3		Ch/S=1/2	
	Rt	Rc	Rt	Rc	Rt	Rc
0.30	0.30	1.23	0.45	1.80	0.48	1.99
0.35	0.35	1.12	0.46	1.88	0.51	2.04
0.40	0.22	1.25	0.42	1.90	0.42	1.95
0.45	0.12	1.02	0.40	1.23	0.41	1.40
0.50	0.09	0.66	0.20	0.99	0.30	1.22
0.55	0.05	0.55	0.12	0.99	0.20	1.08

Tableau III.5 : Résistance à la traction et à la compression à 28j [$S_2 = 2/3(S_a) + 1/3(S_d)$]

E/Ch	Proportions massiques des constituants du mortier (chaux+sable mixte)					
	Ch/S=1		Ch/S=1/3		Ch/S=1/2	
	Rt	Rc	Rt	Rc	Rt	Rc
0.30	0.22	1.55	0.35	1.59	0.45	2.05
0.35	0.33	1.58	0.30	1.66	0.80	2.88
0.40	0.10	1.22	0.20	1.90	0.50	1.99
0.45	0.09	1.02	0.10	1.54	0.33	1.09
0.50	0.07	0.99	0.10	0.89	0.22	1.05
0.55	0.04	0.90	0.10	0.69	0.20	0.99

Tableau.III.7: Propriétés mécaniques à 28j aux divers environnements.

ENV	F/Ch (%)	Ch/S ₂	E/Ch	R _t [Mpa]	R _c [Mpa]
I	0	½	0.35	0.80	2.88
	10	½	0.35	0.88	2.90
	20	½	0.35	0.99	3.05
	30	½	0.35	0.56	1.95
	40	½	0.35	0.44	1.22
II	0	½	0.35	0.90	2.90
	10	½	0.35	0.97	3.12
	20	½	0.35	1.05	3.40
	30	½	0.35	0.68	1.99
	40	½	0.35	0.60	1.27

Tableau.III.9: Propriétés mécaniques à 28j aux divers environnements

ENV	L=chaux+ciment			E/L	R _t [Mpa]	R _c [Mpa]
	Ch(%)	C(%)				
I	L ₀	100	0	0.35	0.80	2.88
	L(5)	95	5	0.35	0.98	3.25
	L(10)	90	10	0.35	1.25	4.25
	L(15)	85	15	0.35	1.55	4.89
	L(20)	80	20	0.35	1.75	5.24
II	L ₀	100	0	0.35	0.90	2.90
	L(5)	95	5	0.35	1.05	3.87
	L(10)	90	10	0.35	1.74	4.89
	L(15)	85	15	0.35	1.88	5.27
	L(20)	80	20	0.35	1.99	5.87

Conservation à l'aire libre ENV(I):

Tableau III.11 : Résistance à la traction R_t [Mpa]

Ch/S _{2i}	Série	Sable S _{2i} (en masse)		E/Ch	R _t		
		Br (%)	S ₂ (%)		7j	14j	28j
1/2	S ₂₀	0	100	0.35	0.18	0.22	0.80
	S ₂₁	10	90	0.37	0.20	0.32	1.05
	S ₂₂	20	80	0.39	0.40	0.80	1.22
	S ₂₃	30	70	0.41	0.47	0.99	1.40
	S ₂₄	40	60	0.43	0.78	1.04	1.74
	S ₂₅	50	50	0.45	0.99	1.08	1.88
	S ₂₆	60	40	0.47	1.04	1.14	2.04
	S ₂₇	70	30	0.49	1.08	1.19	2.18
	S ₂₈	80	20	0.51	0.88	1.10	2.07
	S ₂₉	90	10	0.53	0.88	1.10	1.99
	S ₂₁₀	100	0	0.55	0.27	1.04	1.89

Tableau III.12 : Résistance à la compression R_c [Mpa]

Ch/S _{2i}	Série	Sable S _{2i} (en masse)		E/Ch	R _c		
		Br %	S ₂ %		7j	14j	28j
1/2	S ₂₀	0	100	0.35	1.22	1.99	2.88
	S ₂₁	10	90	0.37	1.78	2.04	3.04
	S ₂₂	20	80	0.39	1.99	2.22	3.47
	S ₂₃	30	70	0.41	2.07	2.88	3.90
	S ₂₄	40	60	0.43	2.27	3.04	4.58
	S ₂₅	50	50	0.45	2.87	3.88	5.12
	S ₂₆	60	40	0.47	3.17	4.87	7.20
	S ₂₇	70	30	0.49	3.85	5.24	7.85
	S ₂₈	80	20	0.51	3.80	5.22	7.80
	S ₂₉	90	10	0.53	3.57	5.27	6.57
	S ₂₁₀	100	0	0.55	3.48	5.17	6.50

Conservation dans la salle humide ENV (II) :

Tableau III.13 : Résistance à la traction R_t [Mpa]

Ch/S _{2i}	Série	Sable S _{2i} (en masse)		E/Ch	R _t		
		Br %	S ₂ %		7j	14j	28j
1/2	S ₂₀	0	100	0.35	0.20	0.54	0.90
	S ₂₁	10	90	0.37	0.32	0.39	1.25
	S ₂₂	20	80	0.39	0.47	0.99	1.31
	S ₂₃	30	70	0.41	0.58	1.12	1.44
	S ₂₄	40	60	0.43	0.99	1.74	1.88
	S ₂₅	50	50	0.45	1.16	1.88	2.04
	S ₂₆	60	40	0.47	1.28	2.04	2.18
	S ₂₇	70	30	0.49	1.39	2.17	2.88
	S ₂₈	80	20	0.51	1.17	1.88	2.60
	S ₂₉	90	10	0.53	1.08	1.70	1.88
	S ₂₁₀	100	0	0.55	0.88	1.41	1.80

Tableau III.14: Résistance à la compression R_c [Mpa]

Ch/S _{2i}	Série	Sable S _{2i} (en masse)		E/Ch	R _c		
		Br %	S ₂ %		7j	14j	28j
1/2	S ₂₀	0	100	0.35	1.44	2.07	2.90
	S ₂₁	10	90	0.37	1.99	2.22	3.22
	S ₂₂	20	80	0.39	2.14	2.41	3.55
	S ₂₃	30	70	0.41	2.41	2.99	3.99
	S ₂₄	40	60	0.43	2.87	3.44	4.87
	S ₂₅	50	50	0.45	3.12	4.12	5.57
	S ₂₆	60	40	0.47	3.41	4.99	7.87
	S ₂₇	70	30	0.49	3.99	5.87	8.04
	S ₂₈	80	20	0.51	3.88	5.54	7.17
	S ₂₉	90	10	0.53	3.90	5.44	6.88
	S ₂₁₀	100	0	0.55	3.	5.22	6.77

Tableau III.16 : Propriétés mécaniques à 28j aux divers environnements

ENV	F/L(20)	L(20)/S ₂	E/L(20)	R _t [Mpa]	R _c [Mpa]
I	0	½	0.35	1.75	5.26
	10	½	0.35	2.04	5.80
	20	½	0.35	1.45	4.58
	30	½	0.35	1.27	4.22
	40	½	0.35	1.11	3.87
II	0	½	0.35	1.99	5.87
	10	½	0.35	2.27	6.25
	20	½	0.35	1.45	5.78
	30	½	0.35	1.30	5.57
	40	½	0.35	1.20	5.07

Tableau III.18: Résistance à la traction R_t [Mpa]

L(20)/S _{2i}	Série	Sable S _{2i} (en poids)		E/L(20)	R _t		
		Br %	S ₂ %		7j	14j	28j
1/2	S 20	0	100	0.35	0.32	1.22	1.75
	S 21	10	90	0.37	0.37	1.34	1.88
	S 22	20	80	0.39	0.40	1.54	2.04
	S 23	30	70	0.41	0.41	1.88	2.12
	S 24	40	60	0.43	0.44	1.90	2.15
	S 25	50	50	0.45	0.48	2.04	2.20
	S 26	60	40	0.47	0.50	2.12	2.28
	S 27	70	30	0.49	0.89	2.20	2.37
	S 28	80	20	0.51	0.80	2.16	2.32
	S 29	90	10	0.53	0.78	2.09	2.21
	S 210	100	0	0.55	0.70	1.89	2.07

Tableau III.19: Résistance à la compression R_c [Mpa]

L(20)/S _{2i}	Série	Sable S _{2i} (en poids)		E/L(20)	R _c		
		Br (%)	S ₂ (%)		7j	14j	28j
1/2	S 20	0	100	0.35	1.89	3.14	5.24
	S 21	10	90	0.37	2.47	5.05	6.12
	S 22	20	80	0.39	3.58	5.28	6.87
	S 23	30	70	0.41	4.29	6.12	7.26
	S 24	40	60	0.43	5.29	7.26	8.27
	S 25	50	50	0.45	6.23	8.17	9.41
	S 26	60	40	0.47	7.58	9.47	10.27
	S 27	70	30	0.49	8.87	10.28	11.24
	S 28	80	20	0.51	8.80	9.89	11.02
	S 29	90	10	0.53	8.54	9.87	10.88
	S 210	100	0	0.55	8.50	9.70	10.80

Conservation dans la salle humide ENV (II) :

Tableau III.20 : Résistance à la traction R_t (Mpa)

L/S _{2i}	Série	Sable S _{2i} (en poids)		E/L(20)	R _t		
		Br (%)	S ₂ (%)		7j	14j	28j
1/2	S ₂	0	100	0.35	0.21	1.22	1.99
	S ₂₁	10	90	0.37	0.40	1.54	2.02
	S ₂₂	20	80	0.39	0.47	1.88	2.15
	S ₂₃	30	70	0.41	0.40	2.04	2.20
	S ₂₄	40	60	0.43	0.48	2.12	2.27
	S ₂₅	50	50	0.45	0.87	2.20	2.30
	S ₂₆	60	40	0.47	1.02	2.28	2.35
	S ₂₇	70	30	0.49	1.57	2.30	2.48
	S ₂₈	80	20	0.51	1.54	2.21	2.40
	S ₂₉	90	10	0.53	1.50	2.07	2.31
	S ₂₁₀	100	0	0.55	1.45	1.84	2.20

Tableau III.21 : Résistance à la compression R_c [Mpa]

L/S _{2i}	Série	Sable S _{2i} (en poids)		E/L ₄	R _c		
		Br (%)	S ₂ (%)		7j	14j	28j
1/2	S ₂	0	100	0.35	3.54	4.40	5.87
	S ₂₁	10	90	0.37	4.02	5.35	6.24
	S ₂₂	20	80	0.39	4.22	5.88	6.88
	S ₂₃	30	70	0.41	4.78	6.18	7.22
	S ₂₄	40	60	0.43	5.47	6.77	8.17
	S ₂₅	50	50	0.45	6.89	8.07	9.27
	S ₂₆	60	40	0.47	7.28	9.06	10.58
	S ₂₇	70	30	0.49	10.14	11.29	12.24
	S ₂₈	80	20	0.51	10.02	11.08	12.02
	S ₂₉	90	10	0.53	9.58	10.87	11.88
	S ₂₁₀	100	0	0.55	9.45	10.15	11.80

Tableau IV.12 : Résultats du teste d'absorption par capillarité des bétons avec différents pourcentages de bois.

Quantité D'eau absorbée (kg/m ²) en fonction du pourcentage de déchets du bois (3/8)								
T(min)	T (S ^{0.5})	Témoin (0%)	2%	4%	6%	8%	10%	12%
0,00	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5,00	17,32	1,38	2,04	3,70	3,99	5,10	6,93	7,62
10,00	24,49	2,20	3,10	5,18	5,64	6,80	10,22	10,80
15,00	30	2,40	3,61	6,30	6,92	8,40	13,10	13,22
20,00	34,64	2,77	4,00	7,28	7,99	9,70	13,90	15,27
25,00	38,73	3,12	4,60	8,14	8,95	10,90	15,48	17,00
30,00	42,43	3,41	5,22	9,10	9,80	12,00	17,00	17,10
35,00	45,83	3,60	5,00	9,63	10,58	12,90	18,22	21,10
40,00	48,99	3,90	5,20	10,29	11,30	13,90	20,23	20,25
45,00	51,96	4,17	6,20	10,99	12,20	15,10	21,20	23,25
50,00	54,77	4,40	6,66	11,00	13,22	15,34	22,13	24,23
55,00	57,45	4,50	7,10	12,08	13,54	17,22	22,58	25,17
60,00	60	5,10	8,20	13,00	14,10	20,00	23,27	25,28
90,00	73,48	5,70	9,10	15,12	17,20	20,10	23,28	25,30
120,	84,85	7,10	11,17	15,13	17,22	20,22	23,30	25,31
150,0	94,87	7,60	12,10	15,14	17,23	20,23	23,32	25,33
180,0	103,92	8,32	13,17	15,15	17,24	20,24	23,33	25,37
210,0	112,25	9,10	13,18	15,16	17,33	20,25	23,34	25,37
270,0	127,28	10,17	13,19	15,17	17,34	20,26	23,35	25,37
330,0	140,71	11,27	13,19	15,18	17,40	20,26	23,36	25,37
390,0	152,97	12,80	13,20	15,18	17,42	20,26	23,37	25,37
450,0	164,32	12,25	13,21	15,19	17,43	20,27	23,39	25,37
510,0	174,93	12,26	13,22	15,19	17,44	20,28	23,39	25,37
690,0	203,47	12,26	13,23	15,20	17,45	20,29	23,40	25,37
870,0	228,47	12,30	13,24	15,21	17,50	20,30	23,42	25,37
1050,	251	12,31	13,25	15,21	17,50	20,31	23,42	25,37
1290,	278,21	12,32	13,25	15,22	17,50	20,32	23,43	25,37
1530,	302,99	12,33	13,25	15,22	17,51	20,32	23,44	25,37

Tableau.A-1 les Caractéristiques mécaniques de quelques bétons légers

	Constituants			ρ (kg/m ³)	porosité ϕ	Rc (MPa)	E (GPa)	ϵ (m/m)
	nom	masse (kg)	volume (m ³)					
Granulats	granulat minéral (grés, granite...)			2600	< 1%	-	60	
	argile expansée			850	60 à 70%	6 à 9	-	
	copeaux de bois en vrac			275	75%	-	10 à 12	
	granulat bois Agresta			600	60%	-		

Béton hydraulique	granulat	755	0,285	2330	9%	30	36	1.10^{-4}
	sable	925	0,350					
	ciment	440	0,140					
	eau	210	0,210					
	air	-	0,015					
Béton argile expansé	granulat	351	0,414	1600	36%	25	14	-
	sable	602	0,230					
	ciment	400	0,127					
	eau	193	0,193					
	air	-	0,025					
Béton cellulaire	mortier ciment			350 - 650	75 à 82%	5	2 à 3	2.10^{-3}
	air							
Béton de bois	copeaux de bois	170	0,212	600 - 900	52%	3,5 à 4	-	-
	ciment	350	0,113					
	eau	200	0,200					
	air	-	0,379					
	sable *	250	0,096					
	filler *	-	-					

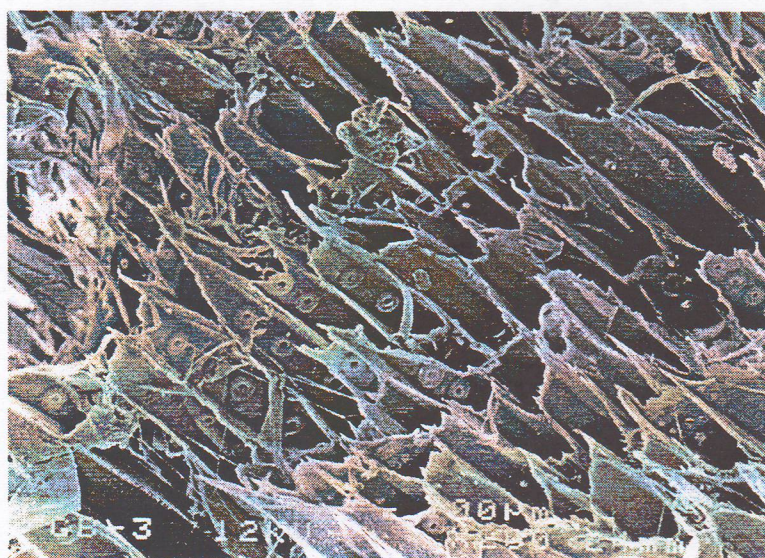


Figure.A-1. Image au MEB de la structure du bois

Tableau A.2 Différentes propriétés physico- chimiques du sable dunaire de certaines régions.

Région		Laghouat	Hassi Bahbah	Ouargla	El Golea	Djelfa	Ghardaïa
Granulométrie		Continue 1,63 % de fines	Continue 3% de fines	-	-	Continue 3% de fines	Continue 3% de fines
Granularité (0/d) (mm)		0/0,63	0/0,425	0/0,425	0/0,50	0/0,63	0/0,425
Module de finesse		0,91	1,13	0,93	1,47	1,11	1,10
Densité apparente (kg/m ³)		1483	1459	1644	1774	1540	1520
Densité absolue (kg/m ³)		2710	2549	2627	2570	2655	2764
Porosité (%)		45	42	42	34	42	45
Compacité (%)		55	58	58	66	58	55
Propreté	Es à vue	88	92	94	93	94	88
	Es à piston	87	81	84	88	89	80
Eléments Nocifs (%)	Matières organiques	néant	néant	néant	néant	1,44	Néant
	Sulfates et sulfures		néant	néant	néant	0,55	0,69
	chlorures		-	-	-	0,00035	0,00053

Annexe. B

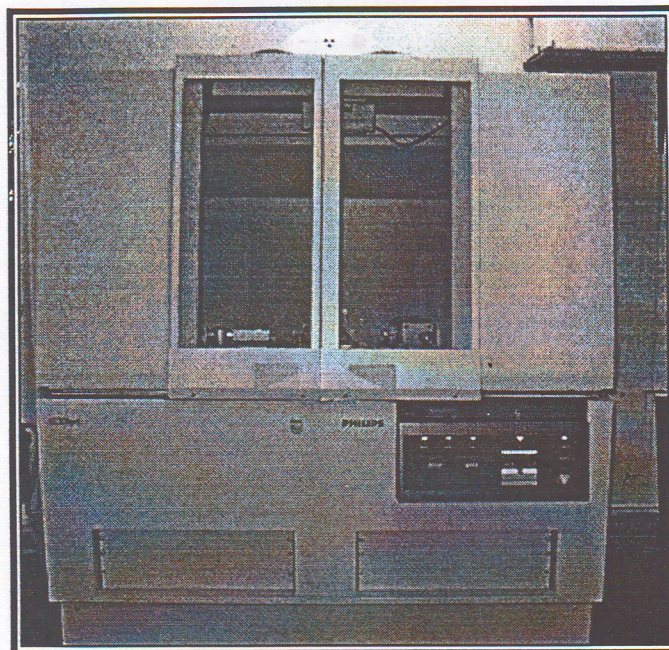


Figure.B-1. Diffractomètre de rayons X de l'UATL

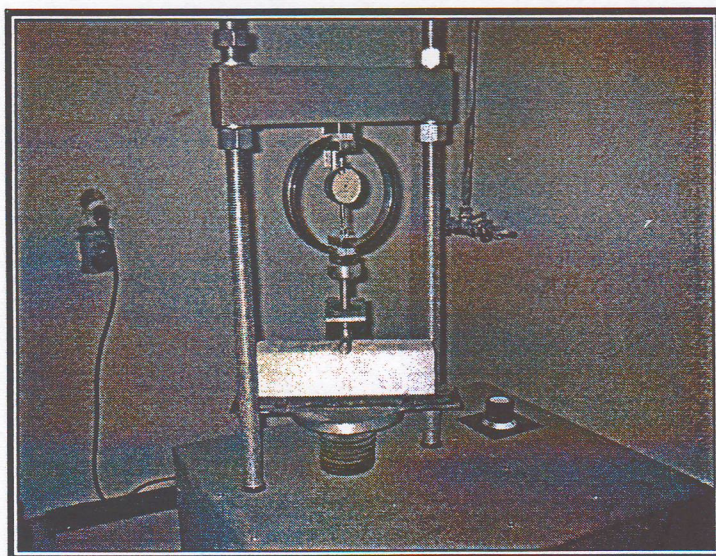


Figure B-2. Photo de la presse CBR avec dispositif de flexion

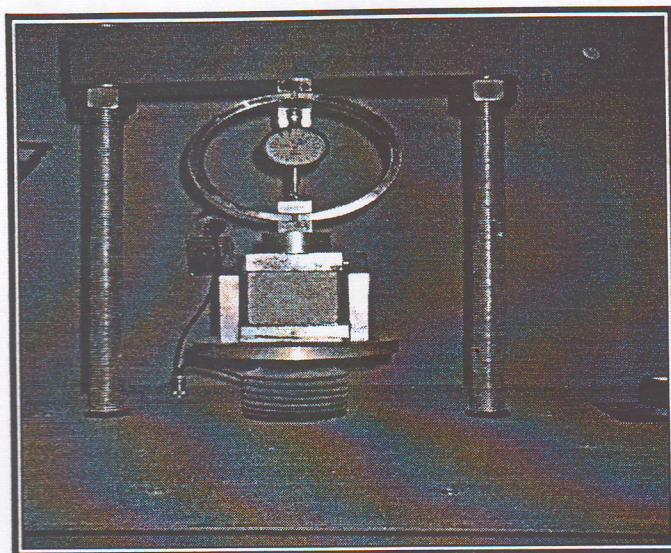


Figure B-3 Photo de la presse CBR avec dispositif de compression

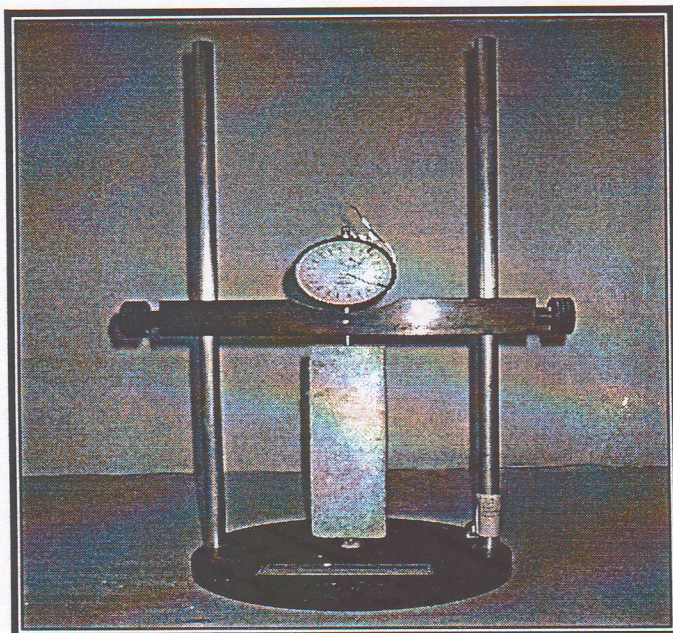


Figure B-4. Photo de l'appareil de retrait