



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE ou INSTITUT : Génie Civil et Architecture

DEPARTEMENT : Génie Civil

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : FERAHTIA Souhila & AISSI Soumia

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie civil

OPTION : Matériaux En Génie Civil

Thème

Comportement hydro-thermique d'un béton cellulaire à base de sable calcaire

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
BELAIDI Akram Salah Eddine	MCA	Président
DJOUDI Amina	MCB	Examinatrice
FERHAT Ahmida	MAA	Encadreur
GOUAL Idriss	Pr	Co-Encadreur

Promotion : Juin 2019

شكر و عرفان

قال رسول الله ﷺ:

"من لم يشكر الناس لم يشكره الله "
عليه وسلم صدق رسول الله صلى الله

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات نحمد الله عز وجل أن وفقنا بإتمام هذا البحث .
نتوجه بخالص الشكر والعرفان لأستاذنا المشرف د/ أحميده فرحات على كل مجهوداته
المبذولة و الأستاذ المساعد د/ قران إدريس وللأعضاء اللجنة الأستاذ بلعيد أكرم صلاح
الدين والأستاذة جودي أمينة,

وإلى كل الأساتذة الكرام الذين تتلمذنا على أيديهم طيلة مشوارنا الدراسي والجامعي , كما
نشكر مديري و مسؤولي مخبر الهندسة المدنية.

نشكر كل من كانت له يد العون في إخراج هذا البحث إلى النور , سائلين المولى عز وجل أن
يجعل ذلك في ميزان حسناتهم.

فراحتة سهيلة

عيسي سمية

إهداء

إلى أبي و أمي الغاليين.

إلى إخوتي و أخواتي الأعزاء و إلى أولادهم .

إلى الأصدقاء الأعزاء.

إلى الأهل و الأحبة.

إلى مدرسي من معلمين وأساتذة من بداية مشواري دراسي حتى تخرجي الجامعي.

إلى من ساهم من بعيد أو من قريب في هذا النجاح.

فراحتية سهيلة



إهداء

الحمد لله على إحسانه والشكر له على توفيقه وإمتهانه ونشهد أن لا إله إلا الله وحده لا شريك له تعظيماً لشأنه ونشهد أن سيدنا ونبينا محمد عبده ورسوله الداعي إلى رضوانه صلى الله عليه وعلى آله وأصحابه وأتباعه وسلم.

إلى منارة العلم والإمام المصطفى إلى سيد الخلق إلى سيدنا وحبينا محمد الله صلى آله عليه وسلم.

بعد شكر الله سبحانه وتعالى على توفيقه لنا على إتمام هذا البحث المتواضع أتقدم بجزيل الشكر إلى الوالدين العزيزين.

إلى كل من في الوجود بعد الله ورسوله إلى التي وهبت فلذة كبدها كل العطاء والحنان، التي رعتني حق رعاية وكانت سندي في الشدائد، وكانت دعواها لي بالتوفيق تتبعني خطوة خطوة، إلى من ارتحت كلما تذكرت إبتسامتها في وجهي نبع الحنان أُمي الغالية جزاها الله عني خير الجزاء في الدارين حفظها الله وشفافها وأطال في عمرها

إلى سندي الحبيب وملاذي بعد الله من سعي وشقى لأنعم بالراحة والهناء، إلى الذي وهبني كل ما يملك حتى أحقق له آماني، إلى الإنسان الذي امتلك الإنسانية بقوة، إلى مدرستي الأولى في الحياة أبي الغالي على قلبي حفظه الله وشفافه وأطال في عمره

إلى نصف الثاني الساعد والأنيس سندي ومسندي واتكائي إلى من كان لي سراجاً على الطريق ونورا على درب زوجي العزيز أحمد حفظك الله ورعاك وأطال في عمرك

إلى من ألبهم بجري في عروقي ويلهج بذكرهم فؤادي إلى موطن عزي وافتخاري اخوتي توفيق عبد القدر وعبد الجليل حفظهم الله ورعاهم وأدامهم لي

إلى نور البيت وبهجة فؤادي ونبض وجداني أختي حبيبتي رحاب حفظها الله ورعاها وأدامها لي

إلى أختي التي لم تلهها أُمي إلى من تحملت معي عناء إعداد هذه المذكرة سهلية حفظها الله ورعاها وأدامها لي

كما أتوجه بالشكر الجزيل إلى كل من مديد العون لإنارة دربي، أستاذة الهندسة المدنية وعلى رأسهم الأستاذة " فرحات أحميدة" و"قوال إدريس" لئذان أشكرهما لمساهمتهما في إتمام واستكمال مذكرتنا، كما أتوجه بخالص شكري وتقديري إلى كل من ساعدني من قريب أو بعيد على إنجاز وإتمام هذا العمل

"رب أوزعني أن أشكر نعمتك التي أنعمت علي وعلى والدي وأن أعمل صالحاً ترضاه وأدخلني برحمتك في عبادك الصالحين"

عيسى سمية

الملخص

يندرج هذا البحث ضمن إطار عام يتمحور حول تامين واستغلال المواد المحلية لتطوير واستحداث مواد بناء خاصة. تم التركيز على استخدام مخلفات الحجر الكلسي المتبقية من محطات تكسير في منطقة الأغواط و ذلك من أجل محاولة إنتاج خرسانة خلوية خفيفة الوزن.

هذا الاختيار فرضته الظروف المناخية القاسية التي تتسم بها مناطق الجنوب الجزائري، حيث يستجيب لمتطلبات الرفاهية داخل السكنات المتمثلة في معيار العزل الحراري لجدران البنايات إضافة إلى عامل اقتصاد الطاقة.

الهدف الرئيسي لهذا البحث التجريبي يتمثل في دراسة طريقة لتخفيف الوزن الحجمي لعجينة معدنية مشكلة من الرمل الكلسي، رابط هيدروليكي وماء من أجل تشكيل خرسانة رملية خفيفة . عدة عوامل متغيرة تمت مناقشتها في إطار هذه الدراسة التجريبية من تأثير طبيعة الرابط الهيدروليكي (إسمنت و خليط من إسمنت وجير هيدروليكي بنسب متغيرة)، وكذا تأثير نسبة مسحوق الألمنيوم على الأداء الفيزيائي الميكانيكي والحراري لخرسانة الرمل الكلسي الخلوية المشكلة.

خلصت النتائج التجريبية عن إمكانية استعمال رمل الحجر الكلسي المتبقي من محطات تكسير في تطوير خرسانة خلوية، ومع ذلك ، يوصى باستخدام الأسمنت كرابط هيدروليكي كخليط من الإسمنت / الجير. كما بينت النتائج الحرارية المائية أن هذه الخرسانات حساسة لوجود الماء بسبب تركيبها الخلوية ، لذلك يجب توفير وسيلة للحماية من أجل الحفاظ على هذه العروض الحرارية والميكانيكية للخرسانة الرملية الكلسية.

الكلمات المفتاحية: الخرسانة الخلوية ، مسحوق الألمنيوم ، الرمل الكلسي ، الجير ، الإسمنت ، السلوك الهيدروحراري ، المسامية المدجة

Résumé

Ce travail de recherche s'inscrit dans un cadre général dont l'axe principal s'articule sur la valorisation et l'exploitation des ressources locales pour la mise au point de bétons spéciaux. L'accent a été mis sur la valorisation des résidus calcaires des stations de concassage de la région de Laghouat et pour l'élaboration de bétons légers. En effet, les conditions climatiques sévères des régions du sud Algérien exigent le choix de ce type de matériaux afin de satisfaire aux critères d'isolation thermique des habitations dans les zones chaudes et arides et aux objectifs d'économie d'énergie.

L'objectif principal de cette recherche est l'étude d'un procédé d'allégement d'une pâte minérale sable calcaire, liant-eau et ces caractéristiques Hydro-thermique en vue de l'élaboration d'un béton de sable de calcaire léger. Plusieurs paramètres ont été discutés dans cette étude à savoir l'influence du type du liant (ciment et mélange ciment/chaux à différentes proportions), ainsi que la teneur en aluminium sur les performances physico-mécaniques et hydro-thermiques des compositions élaborés.

Les résultats expérimentaux concluent que le sable calcaire des résidus des stations de concassage peut être utilisé dans la fabrication de béton cellulaire. Toutefois, l'utilisation du ciment comme liant hydraulique s'avère recommandé que le mélange ciment/chaux. Les résultats hydro-thermique ont montrés que ces bétons est sensible à la présence de l'eau à cause de sa structure cellulaire, donc il faut prévoir une moyen de protection afin

de maintenir ces performances thermique et mécaniques des bétons de sable calcaire élaborés.

Les mots clés : Béton cellulaire, Poudre d'aluminium, Sable calcaire, Chaux, Ciment, Porosité introduite, Comportement hydro-thermique.

Summary:

This research work is a part of a general thematic area focusing on the valorisation and exploitation of local resources for the development of special concretes. Emphasis is wasplaced on valuing limestone residues from crushing stations in the Laghouat area and in developing light concrete. Indeed. thus, the severe climatic conditions prevailing in the southerne algerian regions require the choice of this type of material in order to satisfy the thermal insulation criteria for homes in hot and arid climates as welle as energy saving purpose.

The main objective of this research is the study of a process focusing on the lightening of a mineral paste formulated from cruching sand, binder and water in order to produce lightweight cruching sand concrete. Several parameters were discussed in this study, specifically the influence of the type of binder (cement and cement/lime mixture in different proportions), as well as the aluminiumon content on the physic-mechanical and thermal performances of the elaborated BSCC.

The experimental results conclude that the tailings sand of crushing stations can be used in the manufacture of cellular concrete. However, the use of cement as a hydraulic link is recommended for cement/lime. Hydrothermal results have shown that these concretes are sensitive to the presence of water because of its cellular structure, so a means of protection is required to maintain these thermal and mechanical performance of the limestone sand concrete developed.

Keywords : Concrete cellular, Aluminium powder, Calcareous sand, Lime, Cement, Porosity introduced, hydro-thermal behavior.

Remerciement**Dédicace****Résumé****Liste des tableaux****Liste des figures****Liste des photos****Liste des symboles utilisés****Introduction Générale..... 1****Chapitre I : Généralités sur les bétons de sable et les bétons légers****I/ Béton de sable 3****I.1/ Introduction 3****I.2/ Définition du béton de sable 4****I.3/ Constituants du béton de sable 4****I.3.1/ Le sable 4****I.3.2/ Le ciment portland 4****I.3.2.1/ Le ciment portland artificiel (CPA-CEM 1) 5****I.3.2.2/Le ciment portland composé (CPA-CEM11) 5****II/ Les bétons légers 6****II.1/Historique 6****II.2/ Définition et classification 7****II.3/Types des bétons légers 10****II.3.1/ Béton a agrégats légers 11****II.3.2/ Le béton caverneux 14****II.3.3/ Les béton cellulaire 14****II.4/ Avantages et Inconvénients Propriétés des bétons de granulats légers 15****o Avantage****o Inconvénients****II.5/ Propriétés mécaniques des bétons légers 17****II.5.1/ Porosité 17****II.5.2/ Légèreté 18****II.6/ Comportement et performances mécaniques 18****II.7/ Sensibilité à l'eau 20**

II.7.1/ L'absorption	21
II.8/ Propriétés thermiques	22
III./ Le béton cellulaire	24
III.1/Historique	24
III.2/ Définition	24
III.3/ Les différents types de béton cellulaire	25
III.3.1/ Béton cellulaire obtenue par réaction chimique : (béton à gaz)	25
III.3.2/ Béton cellulaire obtenue par réaction physique : (béton mousse).....	25
III.3.3/ Béton micro cellulaire	25
III.4/ Avantages du béton cellulaire	25
III.5/ Classification du béton cellulaire	26
III.6/ Propriétés du béton cellulaire	27
III.6.1/ La structure	27
III.6.2/ Densité	27
III.6.3/La résistance à la compression.....	27
III.6.4/ Porosité du béton cellulaire	28
III.6.5/Conductivité thermique	30
III.7/Techniques de mesure des paramètres de transferts	31
III.7.1/ Paramètres de transfert thermique	31
III.7.2/ Paramètres de transfert hydrique	32
 Chapitre II : Matière première et techniques expérimentales	
II.1/ Introduction	34
II.2/ Caractérisation des matières premières	34
II.2.1/ Sable de calcaire	34
II.2.1.1/Analyse granulométrique par tamisage (EN933-1 et EN 933-2)....	35
II.2.1.2/ Module de finesse	35
II.2.1.3/Equivalent de sable (EN 933-8)	36
II.2.1.4/Masses volumiques absolue et apparente (NF P 18-555)	37
II.2.2/Ciment	39
II.2.2.1/ Consistance du ciment (EN 196-3)	39
II.2.2.2/ Prise de ciment (EN 196-3)	39

II.2.2.3/ Mesure de la finesse (EN 196-6)	39
II.2.3/ La chaux	42
II.2.4/ Poudre d'Aluminium	43
II.2.5/ Eau de gâchage	43
II.3/ Essai expérimentaux effectués.....	44
II.3.1/ Essai d'écoulement NF P18-452 (Essai au maniabilimètre B)	44
II.3.2/ Résistances mécaniques en compression	44
II.3.3/ La masse volumique apparente et absolue	45
II.3.4/ La Porosité totale	45
II.3.5/ La porosité accessible à l'eau	45
II.3.6/ Absorption capillaire (Sorptivité)	46
II.3.7 / Essais de Caractérisations thermiques.....	47
II.3.7.1/ Méthode du fil chaud	48
II.3.8 / Essai hydro-thermique.....	50
II.3.8 .1/ Mode opératoire des essais hydro-thermique	52
II.4 / Mode opératoire et préparation des éprouvettes d'essais.....	53
II.4.1 / Dosage en constituants des mortiers élaborés	53
II.4.2 /Procédure de malaxage.....	54
II.4.3 / Mode de conservation.....	54
II.4.4 / Choix des moules.....	54
 Chapitre III : Résultats et discussion Expérimentaux	
III.1/ Introduction	55
III.2/ Etude rhéologique	56
III.3/ La Masse volumique apparente (densité)	57
III.4/ Résistance à la compression.....	58
III.5/ La porosité	61
III.6/ Modélisation de la résistance à la compression.....	63
III.7/ Porosité introduite	64
III.8/ Influence de la porosité accessible sur des bétons élaborées	65
III.9/ Absorptivité des bétons cellulaires élaborés	66
III.10/ Etude du transfert thermique	71

III.11/ Etude du transfert hydro-thermique.....	73
Conclusion générale	77
Références Bibliographiques	79

Tableau I.1 : Les constituants et les additions de ciment	5
Tableau I.2 : Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R	9
Tableau I.3 : Classification des bétons légers selon Kass J.L 1972).....	9
Tableau I.4 : différent classe de porosité	18
Tableau I.5 : Caractéristiques quelques bétons légers	20
Tableau I.6 : Porosité ouverte des grasses et béton cellulaire et proportion capillaire de diamètre $>2\mu\text{m}$	21
Tableau I.7 : Valeurs de la conductivité thermique recommandées Loudonet Stacey	23
Tableau I.8 : Classification de béton cellulaire selon la masse volumique et la résistance à la compression	26
Tableau I.9 : Résistance à la compression du béton cellulaire selon la densité	28
Tableau I.10 : Formules empiriques reliant la résistance à la compression et la porosité	28
Tableau I.11 : Caractéristiques thermique de quelques matériaux	31
Tableau II.1 : Caractérisation physico-chimique de sable calcaires.....	38
Tableau II. 2 : Composition chimique et caractéristiques physiques du ciment.....	40
Tableau II.3 : Composition chimique et caractéristiques physiques de la chaux.....	42
Tableau II .4 : Composition chimique de l'eau de gâchage (mg/l)	43
Tableau III.1 : Composition en pourcentage massique des différents mélanges	56
Tableau III.2 : La variation de la résistance à la compression en fonction de dosage en aluminium.....	58
Tableau III.3 : Valeurs des coefficients des modèles théoriques calculées par régression sur les points expérimentaux	63

Figure I.1 : Représentation schématique des différents types de béton léger	8
Figure I.2 : Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats	10
Figure I.3: Structure des bétons légers	11
Figure I.4: Porosité du béton	18
Figure I.5: la résistance à la compression 28j en fonction de la masse volumique.....	19
Figure I.6: Trois types de porosité présente dans les matériaux	21
Figure I.7 : Conductivité thermique λ en fonction de la teneur en massique du matériau.....	22
Figure I.8 : Distribution porale cumulée de béton cellulaire autoclave	29
Figure I.9 : Exemple d'image binaire taille réelle 17mm x17mm) de béton cellulaire ...	29
Figure I.10 : Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves en fonction du diamètre des pores	29
Figure I.11 : Distribution porale volumique du béton cellulaire autoclave	30
Figure I.12 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche du béton cellulaire	30
Figure I.13 : Evolution de la conductivité thermique du béton cellulaire en fonction de la masse volumique jusqu'au non-expansé	31
Figure II.1. Courbe granulométrique du sable calcaire.....	36
Figure II.2 : Détermination de l'équivalent de sable.....	36
Figure II.3 : Diffractogramme aux rayons X du sable calcaire.....	39
Figure II.4 : Diffractogramme aux rayons X du ciment.....	41
Figure II.5 : Diffractogramme aux rayons X de la chaux.....	43
Figure II.6: Schéma de l'essai de capillarité.....	46
Figure II.7 : Schéma du montage de la méthode du fil chaud	48
Figure II.8: Schéma du montage expérimental.....	49
Figure II.9 : Organigramme et schéma du montage expérimental pour les mesures de l'essai hydro-thermique.....	52
Figure II.10: Variation des résistances à la compression optimums en fonction de la consistance E/C pour le différent dosage en fines calcaires élaborées	54
Figure III.1 : Organigramme de programme expérimental.....	55
Figure III.2 : La variation de rapport E/L en fonction du pourcentage de ciment.....	56
Figure III.3 : La variation de la masse volumique apparente en fonction du dosage en AL	57

Figure III.4 : La variation de la masse volumique apparent on fonction du rapport Ch/L.....	57
Figure III.5 : La variation de la résistance à la compression en fonction de dosage en aluminium.....	58
Figure III.6 : La variation de la résistance à la compression en fonction de dosage en chaux.....	59
Figure III.7 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de la densité apparente pour les différents mélanges.....	60
Figure III.8 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du dosage en aluminium et de rapport de liant (Chaux-Ciment) pour les différents mélanges élaborés.....	60
Figure III.9 : Evolution de la porosité en fonction du dosage en aluminium.....	61
Figure III.10 : Evolution de la porosité en fonction du dosage en aluminium.....	61
Figure III.11 : Evolution de la porosité en fonction de la densité apparent pour les différents mélanges.....	62
Figure III.12 : Résistance en compression à 28 jours en fonction de la porosité totale valeurs expérimentales et modèles théoriques.....	64
Figure III.13 : Evolution de la porosité introduite en fonction du dosage en chaux.....	64
Figure III.14 : Evolution de la porosité totale et la porosité accessible en fonction du dosage en chaux.....	65
Figure III.15 : Evolution du rapport P_t/P_{ac} en fonction de la porosité totale.....	66
Figure III.16 : La variation du volume d'eau absorbée par unité de surface i (g/cm^2) en fonction du temps (s).....	68
Figure III.17 : Variation de la masse d'eau absorbée durant la première heure en fonction de la racine carrée du temps des différentes compositions.....	70
Figure III.18 : La variation sorptivité i en fonction de dosage en chaux Ch/L.....	71
Figure III.19 : Thermogramme pour le calcul de la conductivité thermique à l'état sec.	72
Figure III.20 : Evolution de la conductivité thermique en fonction du taux de saturation en eau et de la température de composition A.....	77
Figure III.21 : Evolution de la conductivité thermique en fonction du taux de saturation en eau et la température de composition B	73
Figure III.22 : Evolution de la conductivité thermique en fonction du taux de saturation en eau et la température de composition C.....	74

Photo I.1: Différents granulas légers naturels	12
Photo I.2: Différents granulas légers artificiels	14
Photo I.3: Béton normal à gauche et béton léger à droite Ayants le même poids	16
Photo II.1 : Provenance de Sable calcaire.....	34
Photo II.2 : Appareillage de l'essai d'Analyse granulométrique par tamisage.....	35
Photo II.3 : Voluménoètre de Le Chatelier.....	37
Photo II.4 : Perméabilimètre de Blaine.....	40
Photo II.5 : Différents phases de préparation de la chaux éteinte.....	42
Photo II.6 : Maniabilimètre B (180x90x90mm).....	44
Photo II.7 : forme des pores dans la matrice.....	45
Photo II.8 : Dispositif et échantillon utilisés pour l'essai d'accessibilité à l'eau.....	46
Photo II.9. Vue d'une sonde de type fil chaud.....	48
Photo II.10 : Dispositif expérimental pour la mesure de la conductivité thermique (Méthode fil chaud).....	49

S_C : Sable calcaire

F_c : Filler calcaire

C : Ciment

Ch : Chaux

AL : Aluminium

BGL : Béton de granulats légers

ρ : Masse volumique (Kg/m^3)

R_c : Résistance à la compression (MPa)

ϕ_0 : La puissance électrique dissipée (W)

I : Intensité de courant continu(A)

U : Potentiel (V)

E : Module d'élasticité

C : Chaleur spécifique ($J/(Kg.k^\circ)$)

λ : Conductivité thermique ($W.m^{-1}.k^{-1}$).

λ_{sec} : Conductivité thermique du matériau à l'état sec ($W.m^{-1}.k^{-1}$).

λ_{hum} : Conductivité thermique du matériau à l'état humide ($W.m^{-1}.k^{-1}$).

λ_{sat} : Conductivité thermique du matériau à l'état saturé ($W.m^{-1}.k^{-1}$).

E/C : Rapport eau/ ciment

ρ_{app} : Masse volumique apparente (Kg/m^3).

ρ_{abs} : Masse volumique absolue (Kg/m^3).

d_{sec} : Densité sec

M : Masse du matériau

M_t : Masse totale

M_r : Masse du récipient

M_s : Masse des grains solides

V_t : Volume totale (m^3)

V_1 : Volume de liant (m^3)

V_2 : Volume total (grains + solide) (m^3)

V_{vide} : Volume des vides (m^3)

V_e : Volume d'eau

D_{max} : Diamètre maximal

M_f : Module de finesse

C_u : Coefficient d'uniformité

C_c : Coefficient de courbure

ES : Equivalent de Sable

h_1 : Hauteur de sable propre éléments fins (hauteur total des grains solide)

h_2 : Hauteur propre seulement

M_1 : Masse de cellule + benzène)

M_2 : Masse de cellule + benzène + ciment)

SSB: Surface spécifique de Blaine (cm^2/g)

K: Constante de l'appareil

t : Temps mesure en secondes

η : Viscosité de l'air à la température d'essai (en poises)

L : Liant : ciment + chaux

E/L : Rapport eau/liant

C/L : Rapport ciment/liant

P_t : Porosité total

P_{acc} : Porosité accessible

P_i : Porosité introduite

S_r : degré de saturation

T : Température ($^{\circ}\text{C}$)

i : Sorpivité ($\text{mm.mn}^{-1/2}$)

Introduction générale

Introduction générale

Les mortiers et les bétons ont connu un essor important ces dernières années en Algérie; Parce que c'est devenu le problème de l'heure car les chercheurs cherchent à trouver des matériaux appropriés peu coûteux en ligne avec le champ de l'impasse dans de divers domaines à savoir: bâtiments, ouvrages d'arts, constructions spéciales,...etc. Composés essentiellement à partir de liants hydrauliques. Actuellement, le béton est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde. Ce dernier doit répondre à des exigences toujours plus sévères en matière de performances mécaniques, de durabilité, d'ouvrabilité, d'environnement et d'aspect. Dans ce but, Plusieurs types de béton sont apparus ces dernières années, y compris le béton léger (béton cellulaire), ce qui est l'objectif principal de ce travail En étudiant l'effet de la porosité et degré de saturation sur le comportement physique, mécanique et thermique du béton cellulaire sur la base de sable calcaire résidus de station de concassage obtenu par interaction avec de l'aluminium en poudre.

Cet accroissement du nombre de constituants est d'un point de vue pratique, très avantageux car il conduit généralement à l'amélioration très significative des performances mécaniques, physiques et thermiques des bétons.

La tendance actuelle dans la recherche de nouveaux matériaux de construction, est la valorisation des matériaux locaux pour la fabrication des bétons performants et durables avec le moindre coût.

Dans l'optique d'une valorisation des résidus calcaire de station de concassage dont la fraction granulométrique est inférieure à 3mm de la région de Laghouat (Station de Ouezzane d'Oued M'Zi), l'idée de l'exploiter dans la fabrication de bétons légers s'avère très intéressante d'un point de vue économique et environnemental. En effet, l'utilisation de matériaux légers dans la construction, notamment dans les régions du sud algérien permet d'assurer un meilleur confort thermique des locaux et contribue à la diminution de la consommation énergétique des maisons tant en hiver qu'en été.

Dans la mesure où les résistances mécaniques demeurent suffisantes, l'idée de la diminution de la masse volumique d'une pâte minérale entraînant une diminution de la conductivité thermique s'avère intéressante. En effet, l'objectif de la présente recherche est l'étude de l'effet de la porosité sur le comportement physico-mécanique et hydro-thermique d'un béton cellulaire à base de sable calcaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent.

Quant à l'organisation du mémoire il est subdivisé en Trois chapitres :

- Le premier chapitre est divisé en deux parties, la 1^{ère} partie consacrée à des généralités sur le béton de sable, suivie d'une revue sur la documentation relative aux ajouts minéraux et les bétons légers, en particulier le béton cellulaire et ces comportements thermiques.
- Le deuxième chapitre constitue une description des techniques expérimentales utilisées et la caractérisation des matières premières.
- Le troisième chapitre a été consacré à l'analyse et discussion des résultats expérimentaux relatifs au comportement physico-mécanique et hydro-thermique du béton cellulaire à base de liant (ciment/chaux) et sable calcaire.

Enfin, et sur la base des résultats obtenus, une conclusion générale et des perspectives pour les futures de recherches à venir sont présentées.

Chapitre I

Revue sur la documentation

I/ Béton de sable

I.1/Introduction

La plupart des pays, depuis de nombreuses années, poursuit une politique visant à optimiser l'utilisation des matériaux locaux, béton de sable est souvent inclus dans ces matières. En raison de la progressive l'appauvrissement de l'ensemble des dépôts secondaires dans certain régions, il y a un certain intérêt pour un tel matériau. Le cout élevé du transport et des problèmes écologiques créés par l'extraction d'agrégats de rivière sont d'autres facteurs favorables. En France, le national « SABLOCRETE projet» a permis d'établir le dosage mélange de béton de sable et de l'utilisation des lois [1].

La spécification béton de sable a été définie dans la norme NF P 18 500, adaptée en 1995[2]. En Algérie, le calcaire concassé est la principale source de granulats utilisés dans le béton, Toutefois, cette production est associée à des pourcentages élevés qui font que ces agrégats ne sont pas acceptables dans le mélange design en béton.

Plus de mille unités produisent annuellement 68 millions de tonnes de granulats, pour l'essentiel de nature calcaire. Malheureusement, plus de 20% des sables fabriqués sont impropres à 15% (limite normative actuelle). De mêmes, les fillers calcaires, qui résultent aussi du processus de concassage et de broyage des roches calcaires, sont considérés comme des résidus inutilisables et donc inexploités.

Pour améliorer et minimiser cette situation, il est valorisé au mieux tous les granulats et plus particulièrement les sables fileries et les fillers. Ceci intéresse non seulement l'économie du pays mais aussi la préservation de l'environnement.

Dans le domaine de la construction de bâtiments, la valorisation peut passer par l'introduction de fines dans les matrices cimentaires, ces fines pouvant éventuellement remplacer une partie du ciment, comme l'ont montré certains pays tel qu'en Espagne, France, Maroc, Algérie...et d'autre pays sur l'utilisation de sable calcaire contenant des charges dans le mortier et le béton confectionné. Les résultats obtenus à partir de ces études montrent que la limite tolérée de contenu charges varient d'un pays à selon plusieurs facteurs techniques.

Le problème le plus important est de savoir les effets de ces produits très fins sur la pâte de ciment ainsi que sur les propriétés du béton de sable. Les principaux effets de filler calcaire sont la nature physique. Elle provoque un meilleur conditionnement du ciment squelette granulaire et d'une grande dispersion des grains de ciment [3]. En outre filler calcaire, agit comme le noyau de cristallisation pour la précipitation de l'hydratation du ciment [4].

I .2/ Définition du béton de sable

La norme française AFNOR NF P18 500(juin 1995) [1] définit de sable comme suit : « Le béton de sable est un béton fin constitué par un liant hydraulique, un(ou plusieurs) sable(s), des fines et de l'eau ; on utilise habituellement un (ou plusieurs) adjuvant(s) et on peut, éventuellement, admettre une quantité de gravillons. Les ajouts (fibres, colorants,...) utilisées dans le béton traditionnel peuvent également être incorporés au mélange. L'incorporation de gravillons d/D autorise l'appellation « G=gravillon ; S=sable) : »on parle alors de béton de sable chargé »

Le béton de sable a les particularités suivantes :

- Il se distingue des mortiers par son dosage en liant moindre, sa résistance plus élevée et sa destination (essentiellement destiné à l'usage traditionnels du béton) ;
- Il se distingue d'un béton ordinaire par son dosage en sable(s) élevée, par l'absence ou le faible dosage en gros granulats (une rigidification par des gravillons tels que le rapport G/S soit inférieur à l'unité peut être nécessaire), et l'incorporation d'ajout(s) ;
- Il ressemble au béton ordinaire par son dosage en liant et sa résistance similaire et parce qu'il peut être utilisé pour la réalisation des éléments de résistance pour bâtiment et chaussées.

I .3/Constituants du béton de sable

I.3.1/ Le sable

Les sables utilisables sont ceux conformes aux définitions des normes NFP18-541[5]. ($ES \geq 75$ si le sable est roulé et $ES \geq 65$ s'il est concassé) [6]. Il peut s'agir d'un sable siliceux (alluvionnaire), de ballastière ou de concassage 0/D. Aucun critère granulométrique n'est exigible à priori, la seule restriction d'emploi réside dans la propreté. Les sables de plage ou des dunes pourraient donc être utilisés [7].

I.3.2/ Le ciment portland

Le ciment est le constituant de base des bétons et mortiers. Ce liant hydraulique permet en effet de coller entre aux les grains de sable et les granulats. Mais au point début du XIX^e siècle, le ciment est aujourd'hui le deuxième produit de consommation courante dans le monde après l'eau, et ne cessent d'augmenter.

En Algérie on utilise comme ajout le laitier de haut fourneau, pouzzolane naturelle ou tuf...etc. Et en faisant varier les pourcentages d'ajouts, on pourrait obtenir en fonction des domaines d'utilisation, différents types de ciment avec des propriétés physico-mécaniques demandées.

I.3.2.1/Le ciment portland artificiel (CPA-CEM II)

C'est le produit résultant de la mouture de clinker, obtenu par la cuisson, dans des conditions de durée et de température suffisantes, d'un mélange soigneusement homogénéisé et dosé, dont les principaux constituants sont : La silice, l'alumine, L'oxyde de fer et la chaux [8].

I.3.2.2/ Le ciment portland composé (CPJ-CEM I-1)

Les ciments portland composés contiennent au moins 65% de clinker, 5% de constituant secondaires, et des ajouts avec 30%. On a, par convection [9] :

$$(\text{Clinker}) + (\text{autre constituants}) + (\text{constituants secondaires}) = 100.$$

Le ciment est le résultat du broyage d'un certain nombre de constituants qui peuvent se répartir en différentes familles (**tableau I-1**) [10].

- Le clinker portland.
- Le régulateur de prise.
- Les additions.
- Les additions hydrauliques.
- Les additions pouzzolaniques.
- Les fillers inertes.

Suivant sa composition chimique il aura des propriétés différentes. Le clinker réagit avec l'eau pour développer son potentiel hydraulique. Ces réactions doivent être tempérées par le régulateur de prise, généralement un sulfate de calcium (gypse ou anhydrite).

Des additions sont parfois utilisées pour des raisons économiques ; pour leur potentiel hydraulique latent, ou pouzzolanique (naturelle ou artificielle).

Tableau. I.1: Les constituants et les additions du ciment [10].

Ciment portland		Les additions			
Clinker	Régulateur de pris	Hydraulique	Pouzzolane	Inerte	Additifs
Clinker	Gypses Anhydrite	Laitier de haut fourneau Cendre volantes de lignite	Cendre volantes Argile calcinée de silice	Filler calcaire ou siliceux	Agent de broyage Adjuvants

II / Les bétons légers

II.1/ Historique

L'idée d'utiliser, pour la confection du béton, des granulats légers en vue d'obtenir un matériau qui possède à la fois un faible poids et une résistance appréciable, et une isolation thermique ou acoustique est assez ancienne.

L'historique de la production des agrégats légers à partir des sources naturelles remonte au temps des Pre-Romaines et continue aujourd'hui avec les roches volcaniques poreuses mais ces ressources sont limitées aux régions d'activité volcanique.

En effet le panthéon de Rome est un exemple de construction ayant nécessité l'emploi de béton léger. Cette structure est remarquable tant du point de vue architectural que structural. Son dôme, d'un diamètre de 43m est une réalisation architecturale majeure pour l'époque (138 avant J.C). A la base de la structure on retrouve un béton ordinaire, alors qu'un béton léger, contenant des pierres ponce, a été utilisé pour la construction de la coupole.

A partir de la fin du 19ème siècle, avec le développement du béton armé, et à cause de la rareté des agrégats naturels poreux et à leur existence dans la plupart des pays développés, des recherches pour la fabrication d'agrégats légers artificiels commencèrent [11].

Avant 1917, S.J.Haydel, par un traitement au four rotatif, parvint à obtenir l'expansion thermique des schistes et des argiles pour fournir un matériau dur servant à la fabrication d'un béton qui possédait à la fois un faible poids et une résistance appréciable. A peu près à la même époque, F.J.Straub1commença à utiliser des cendres de charbon bitumineux comme granulats pour la fabrication des blocs en béton ; leur production devint importante après la première guerre mondiale et ils sont encore fabriqués de nos jours. La production commerciale de laitier expansé a commencé en 1928 ; et, c'est en 1948, que le premier bon granulats légers de structure à base de schiste fritté fut produit à partir d'un schiste carbonifère

L'une des plus anciennes utilisations du béton léger armé fut la construction de bateaux et de péniches pour la flotte improvisée pendant la première guerre mondiale. Le béton dont on exigeait une résistance à la compression de 35 MPa, fut obtenu avec une densité égale ou inférieure à 1760 Kg/m³, en utilisant un granulats de schiste expansé. [73] 1931, sont probablement les premiers investigateurs, qui conduisaient une étude très poussée à l'université d'Illinois en 1930 sur les bétons légers avec de l'argile expansée (haydite). Leur recherche est considérée comme une contribution majeure à la première acceptation du béton léger comme matériau de structure. Pendant la deuxième guerre mondiale, la construction de 105 bateaux en béton léger permit de réserver des tôles d'acier pour d'autres utilisations essentielles.

Un essor considérable fut donné au développement, du béton léger, peu après la deuxième guerre mondiale, lorsqu'une étude sur les possibilités de ce béton pour la construction des habitations fut menée par la National **Housing Agency**, des études furent entreprises simultanément dans les laboratoires du National Bureau Standards4et du l'U.S bureau of réclamation afin de déterminer les propriétés du béton fabriqué avec une gamme très large de

granulats. Ces études et les premiers travaux de [73] attirèrent l'attention et suscitèrent un regain d'intérêt à l'égard de L'allégement des ossatures de bâtiments, des tabliers de pont et des produits préfabriqués.

A partir de 1950, de nombreuses constructions à plusieurs étages furent conçues entièrement en béton léger pour bénéficier de l'avantage d'un faible poids mort.

De telles applications dans la construction stimulèrent la recherche concertée des diverses organisations nationales et internationales sur les propriétés des bétons légers [12].

Grâce aux ajouts minéraux, aux adjuvants et aux granulats légers de grande qualité maintenant disponible, il est aujourd'hui possible de fabriquer des bétons légers à très haute performance dotés d'une très bonne rhéologie et d'une excellente durabilité. Les conditions nécessaires pour développer au maximum leur résistance en compression ne sont toutefois pas encore complètement maîtrisées. En effet, bien que certaines formulations aient pu atteindre une résistance en compression de 70 à 100 MPa à 28 jours, il est encore difficile d'obtenir plus de 60 MPa pour une masse volumique inférieure à 1900 Kg/m³.

Par ailleurs, le faible module élastique des granulats augmente les déformations instantanées du béton mais également les déformations différées. En effet, contrairement aux granulats rigides, les granulats légers ne gênent pas, ou peu, les déformations de la pâte de ciment. Cette propriété peut être particulièrement intéressante dans la mesure où elle permet de soulager les contraintes induites lorsque les déformations du matériau sont empêchées. Les bétons légers sont néanmoins des matériaux fragiles et peu résistants à la traction. L'utilisation de fibres métallique demeure une solution efficace pour en augmenter la résistance à la fissuration [11].

II.2/ Définition et classification

En faisant varier la densité des granulats, on peut arriver à fabriquer différents types de béton qui sont appelés bétons spéciaux qui traitent les différents types de béton susceptible d'être utilisés lorsque l'on désire obtenir certaines propriétés particulières [13]. Le type de béton abordé dans ce chapitre est le béton léger.

On regroupe sous le terme «béton léger » l'ensemble des bétons dont la densité est inférieure celle d'un béton ordinaire (égale à environ 2,4) [14]. Les bétons légers sont des bétons constitués de granulats de faible densité (argile, schiste, bille de polystyrène, particules de bois), Ces matériaux sont obtenus par substitution des gravillons traditionnels, qui peuvent être remplacés :

- par des granulats allégés
- par incorporation de bulles d'air (béton cellulaire) [15].

Ces matériaux font référence à des bétons de masse volumique plus faible ($\rho < 1800 \text{ Kg/m}^3$) ils ont une résistance comparable aux bétons de granulats rigides tout en étant de 25% à 35% plus légers [16]. Ils sont définis comme des bétons à haute porosité dont la masse volumique est inférieure à 1800 Kg/m³ [17]; la commission l'American Concrete Institute [18] limite la

masse volumique apparente des bétons légers à 1800 Kg/m^3 après séchage à l'air pendant 28 jours.

La norme DIN 1024, 1972 en Allemagne limite la masse volumique apparente d'un béton léger à 2000 Kg/m^3 .

On diminue la masse volumique du béton en remplaçant 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), Les bulles d'air sont créés, lors du malaxage, soit par réaction chimique, soit par action physique,
- Entre les gros granulats (béton caverneux ou sans fines, c.-à-d. sans sable),
- Et dans les granulats (béton de granulats légers),

Évidemment, il est possible d'effectuer des combinaisons comme un béton léger de type Caverneux fabriqué en utilisant des granulats légers.

La Figure I.1 illustre ces trois types

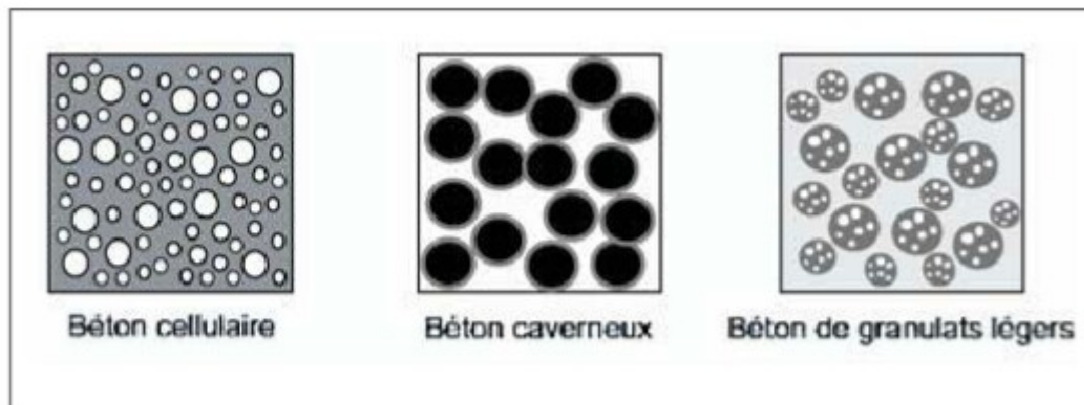


Figure I.1 : Représentation schématisée des différents types de béton léger [19]

L'augmentation du volume d'air, ou des vides, s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau. Le guide ACI 213R87 [20] distingue alors trois catégories de béton léger, classés selon la masse volumique du matériau durci puisque la masse volumique et la résistance sont étroitement liées [13], [16], ce qui explique pourquoi la Norme ACI 213R-87 classifie les bétons en fonction de la masse volumique en trois catégories :

- Le béton de granulats légers (BLS) dont la masse volumique est comprise entre 1350 et 1900 Kg/m^3 , comme son nom l'indique, ce béton est utilisé pour des applications structurales et présente une résistance à la compression minimale de 17 MPa . Étant donné que les densités des bétons de structure de granulats légers sont beaucoup plus grandes que celles des bétons de faible densité, leurs qualités isolantes sont plus faibles.
- Cependant, les valeurs d'isolation thermique des bétons légers de structure sont sensiblement plus élevées que celles des bétons normaux.

- Le béton de résistance moyenne, dont la résistance est comprise entre 7-17 MPa, ils se situent à mi-chemin entre les bétons de structure et les bétons à faible densité. Ils sont quelquefois désignés sous le nom de béton de remplissage. Leur valeur d'isolation est moyenne.
- Le béton léger de faible masse volumique, dont la masse se situe entre 300-800 Kg/m³ utilisé surtout comme isolant thermique.
- L'augmentation du volume d'air, ou des vides, s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau. Le guide ACI213R-87[20]. distingue alors trois catégories de béton léger, classées selon la masse volumique du matériau durci (tableau I.2)

Tableau I.2 : Classification des bétons légers selon le guide ACI213R-87 [20].

Classification	ρ (Kg/m ³)	Rc (MPa)
Bétons légers de structure	1350 - 1900	>17
Bétons légers de résistance modérée	800 – 1350	7 – 17
Bétons de faible densité	300 – 800	<17

Une classification fonctionnelle est recommandée par la RILEM [20], basée sur les travaux de Kass J.L. et Campbell D (1972) [22] qui ont dressé une classification selon l'utilisation des bétons légers d'après leurs propriétés physiques, mécaniques et thermiques (Tableau I.3).

Tableau I.3 : Classification des bétons légers selon Kass J.L. et Campbell D(1972) [22].

Type de béton léger	De construction	De construction et d'isolation	d'isolation
ρ (kg/m ³)	< 1800	Non précise	Non précise
R_c (N/mm ²)	>15,0	> 3,5	> 0,5
λ (W/ (m.K))	-	< 0,75	< 0,30

Selon leur utilisation dans les structures, les bétons légers peuvent être classés en fonction de leurs masses volumiques apparentes comme suit :

- **Des bétons de remplissage :**
Leur masse volumique apparente est comprise entre 300 et 1000 kg/m³, leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes.
- **Des bétons porteurs isolants :**
Leur masse volumique apparente est comprise entre 1000 et 1400 kg/m³, leurs résistances mécaniques sont nettement meilleures que celles des précédents et leurs caractéristiques thermiques sont acceptables. On les utilise généralement pour des éléments préfabriqués.

- **Des bétons de structure :**

Leur masse volumique est comprise entre 1400 et 1800 kg/m³. Ils sont destinés à la constitution des structures grâce à leurs résistances mécaniques qui peuvent être du même ordre que celles des bétons ordinaires. Leur pouvoir isolant est relativement faible.

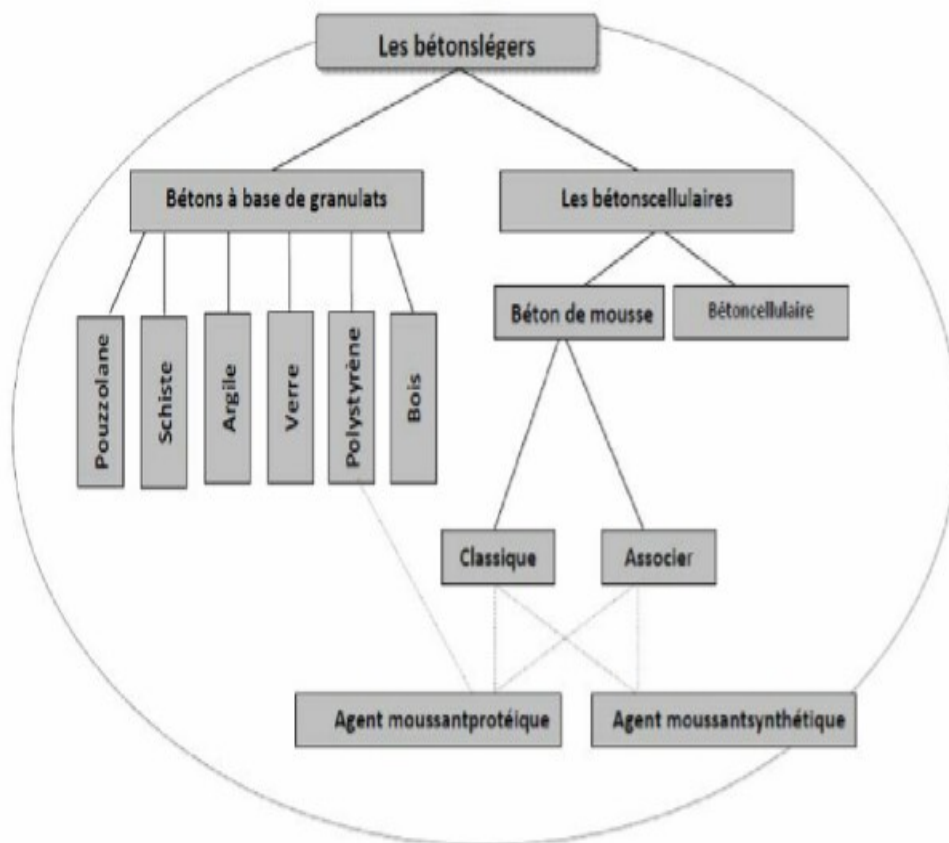


Figure I.2 : Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats [23].

II.3/ Types de bétons légers

Suivant le mode de création de la porosité, artificielle, les bétons légers se subdivisent selon les groupes suivants :

- Béton à agrégats léger. C'est à cette catégorie que nous allons nous intéresser dans ce travail,
- Béton caverneux,
- Béton cellulaire,

II.3.1/ Béton à agrégats léger

La masse volumique du béton peut varier d'un peu plus de 300 à environ 1850 Kg/m^3 et la résistance correspondante de 0.3 à 70 MPa, atteignant parfois même 90 MPa. La grande diversité de composition se retrouve dans la grande variété des propriétés des bétons de granulats légers [13], qui sont des matériaux poreux pulvérulents, naturels ou artificiels [24].

Les bétons légers de structure, utilisés pour la fabrication d'éléments porteurs, sont généralement fabriqués avec des granulats légers manufacturés (argile, schistes et laitiers expansés ou cendres volantes frittées). La résistance à la compression minimale recommandée par l'ACI est alors de 17 MPa à 28 jours. Les bétons légers de faible densité sont fabriqués avec des granulats ultra légers et très poreux (vermiculite exfoliée, perlite expansée) ou avec une matrice cellulaire. Dans ce dernier cas, l'incorporation de bulle d'air peut être faite par génération de gaz dans le matériau à l'état plastique ou par entraînement d'air au cours du malaxage. Ces bétons sont de très bonnes isolations thermiques, mais ils doivent bien souvent être traités à l'autoclave pour atteindre une résistance suffisante. D'autres granulats non absorbants et plus résistants sont aussi Disponibles (verre et polystyrène expansés).

Les bétons de résistance modérée sont dotés de propriétés intermédiaires. Ils peuvent être fabriqués avec des granulats concassés naturels, comme la pierre ponce, les tufs et autres roches d'origine volcanique, ou avec un mortier aéré. La pierre ponce fut par ailleurs le premier granulat léger à être utilisé, notamment pour la construction du dôme du Panthéon et du Colisée à Rome [16].

La figure I.3 montre quelques exemples de structures de bétons légers appartenant aux différentes catégories des bétons légers [25].

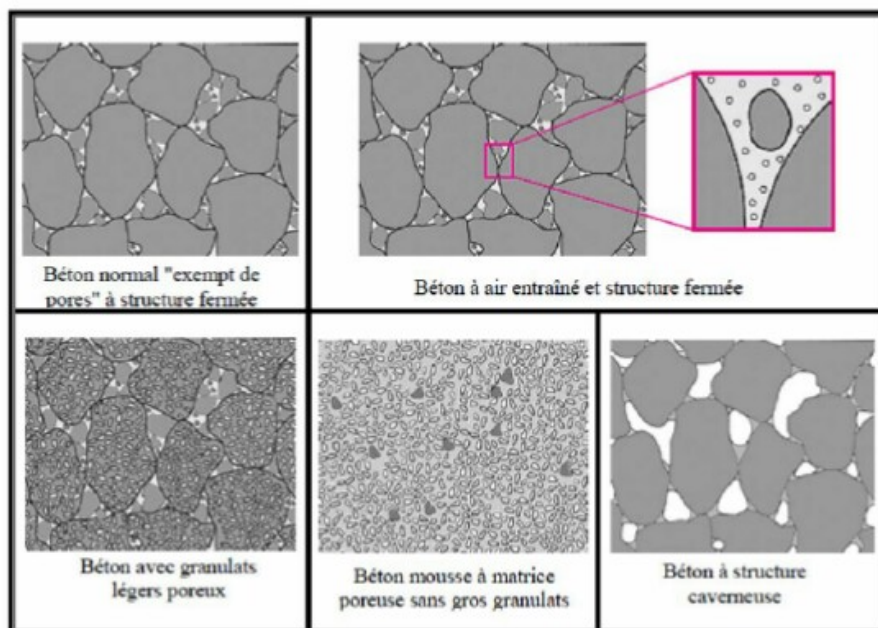


Figure I.3 : Structure des bétons légers [25].

❖ Différentes types de granulats légers

Les granulats légers se différencient des autres granulats par leur faible masse volumique, celles-ci est inférieur à 1200Kg/m^3 selon RIELM [21], tandis que celle de la pierre naturelle est de 2700Kg/m^3 . L'écart de la masse volumique s'explique par la porosité élevée du granulat, ce qui se traduit par une faible densité apparente [13]. C'est-à-dire une importante proportion volumique de vides d'air contenus dans le granulat.

Nous pouvons distinguer les granulats légers selon leur origine naturelle ou artificielle :

a) Matériaux naturels

Les principaux granulats de cette catégorie sont les diatomées, la pierre ponce, les scories, les cendre volcanique et le tuf. A l'exception des diatomées, tous sont d'origine volcanique [13]; en les concassant, on obtient donc des granulats légers [26]. Les granulats légers naturels ne sont pas très utilisés même si leur emploi permet de confectionner des bétons de résistance moyenne [12], [13]. Ce sont des matériaux minéraux naturels non préparé qui n'ont subi que de traitement mécaniques tels que lavage, broyage et tamisage [27],[28].

La figure I.4 : présente quelques exemples de granulats naturels : OPS (oïl Palm Shell), la diatomite et le laitier volcanique.



Photo I.1 : Différents granulats légers naturels [26].

b) Matériaux artificiels

Des granulats légers peuvent être également produits artificiellement, soit à partir de matières premières naturelles comme l'argile, le schiste, l'ardoise, ou des matières spéciales dans certains régions, comme la vase à Taiwan et NYT (Neapolitan Yellow Tuff) en Italie; soit à partir de sous produits industriels comme les laitiers, les cendres volantes frittées ou conséquent encore l'EPS (Polystyrène Expandé) [26], soit végétal (copeaux de bois) et fibre cellulosique (cas de l'Alfa). Ces granulats sont souvent désignés par une variété de noms commerciaux, mais sont mieux classés en fonction des matières premières utilisées et du procédé de fabrication conduisant à l'expansion et, par, à une diminution de la densité apparente. On distingue :

- **Matériaux naturels ayant subi un traitement thermique**

Ces matériaux sont des minéraux naturels préparés [19]. Ils sont mieux classés en fonction des matières premières utilisées et du procédé de fabrication conduisant à l'expansion et, par conséquent, à une diminution de la densité apparente [13]. Cette catégorie de granulats est la plus importante et on y trouve en particulier : l'argile, le schiste et l'ardoise expansées ou frittées, la perlite expansées et la vermiculite exfoliée.

- **Matériaux artificiels ne subissant pas de traitement thermique** : comme le Mâchefer
- **Matériaux artificiels obtenus par divers traitement spéciaux** : comme le laitier expansé et les cendres volantes frittées [17].

C) Matériaux organiques

Produits organique, naturels ou artificiel, tels que liège, copeaux de bois, balle de riz, polystyrène expansé, matériaux dont l'utilisation rentre dans le cadre de valorisation des déchets qui a un effet positif sur l'aspect environnement et l'apport économique de ce type de granulats. Le polystyrène expansé (PSE) élément utilisés dans la composition du béton sujet de notre travail est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et l'emballage des produits industriels ou alimentaire.

Le PSE est obtenu à partir d'un polystyrène cristal auquel on a ajouté en cours de polymérisation, un agent d'expansion (le pentane, C_5H_{12}) [29].

Le béton léger est obtenu dans cette catégorie de matériaux en remplaçant totalement ou partiellement les agrégats standards par un composé de faible poids (léger) pour atteindre des densités plus faible, leur masse volumique varie suivant la classe granulométrique de 400 à 1300 Kg/m^3 en diminuant le pourcentage de billes de polystyrène constituant les gros granulats par rapport au mortier [30].

La Photo I.2 présente quelques de granulats artificiels.



Photo I.2 : Différents granulats légers artificiels [26].

II.3.2/ Le béton caverneux

Ces Bétons sont composés d'un mélange de granulats normaux ou légers, enrobés de pâte de ciment les collant entre eux. La pâte de ciment ne remplit pas la totalité des vides interstitiels, et l'air reste contenu entre les granulats. En fait, il s'agit de béton dont on a supprimé tout donc une porosité élevée ; ils sont drainant [31] .Buts recherché : béton économiques, gains de poids, bonne isolation thermique [32].

II.3.3/ Le bétons cellulaires

Les bétons cellulaires sont des matériaux légers d'aspect très poreux et de couleur généralement blanchâtre ou grise. Leur dénomination provient de leur structure

Alvéolaire. Ils contiennent en effet une multitude de petites cavités sphériques ne communiquant pas entre elles dont la taille est de l'ordre du millimètre. On peut classer les bétons cellulaires en deux catégories selon leur mode de fabrication :

- **Le béton gaz** (obtenue par réaction chimique) : ou les alvéoles sont obtenus par l'adjonction d'un produit chimique générateur de gaz jouant le rôle d'une levure (poudre d'aluminium ou de zinc, eau oxygène, ou carbures de calcium par exemple) [17].
- **Le béton mousse** (obtenue par réaction physique) : ou les cavités résultent de l'adjonction de substance qui moussent sous l'action d'un malaxage (détergents, savons, résines spéciales).

Le béton cellulaire peut être obtenu avec des densités variant de 0.200 à 1.800 et des conductivités thermiques de 0.116 à 0.700 W/m.K° en fonction des domaines d'utilisation [22].

II.4/ Avantages et Inconvénients des bétons légers

- **Avantages**

- ✓ Un matériau plus légers : ces bétons permettent ainsi une plus grande souplesse quant à la conception des ouvrages et induisent plusieurs économies.

En effet, la réduction de la charge morte sur les structures permet entre d'utiliser des portées plus longues ou de diminuer les éléments porteurs, de réduire la quantité d'acier d'armature et même les dimensions des fondations.

- ✓ Meilleure isolation thermique, qualité appréciable du point de vue de la consommation d'énergie dans le bâtiment,
- ✓ Meilleure tenue aux conditions extrêmes de température : gel et feu,
- ✓ Large choix de masses volumique,
- ✓ Mise en œuvre simple et traditionnelle, sans vibration,
- ✓ Amélioration des conditions de manutentions dans le cas de la préfabrication,
- ✓ Utilisés en préfabrication, les bétons légers permettent aussi de diminuer les couts de transport et d'installation,
- ✓ Capables de jouer un rôle en tant qu'isolants thermiques et acoustiques tenu du volume d'air qu'ils contiennent, tout en conservant des niveaux de performances suffisants,
- ✓ Le choix des performances selon l'utilisation dans la construction simultanément sur deux aspects : mécanique/thermique, mécanique acoustique ou à la fois les aspects thermique et acoustique d'un matériau de construction (matériau multi-usager),
- ✓ Prise de conscience environnementale permettant de réaliser des économies d'énergie substantielle [15], [33].
- ✓ Possibilité d'utilisation dans les zones sismiques à cause du gain de poids,

- **Inconvénients**

- ✓ Le faible module élastique des granulats légers augmente les déformations instantanées du béton mais également les déformations différées. (Déformabilités instantanées et différée plus grandes),
- ✓ Les bétons légers sont néanmoins fragiles et peu résistants à la traction. L'utilisation de fibres métalliques demeure une solution efficace pour en augmenter la résistance à la fissuration,
- ✓ Résistance mécanique plus faible en général, dans le domaine de valeurs élevées,
- ✓ Sensibilité aux variations hygrothermiques plus grandes,
- ✓ Un dosage en ciment plus élevé, ce qui explique un surcout.

Bien que dans certains cas les bétons légers puissent revenir plus cher par mètre cube qu'un béton ordinaire, la construction peut être moins onéreuse vu la réduction du poids mort.

Une juste comparaison ne doit pas se limiter uniquement au prix.

L'économie réside alors dans une recherche d'équilibre entre le prix du mètre cube du béton sa densité et ses qualités mécaniques.

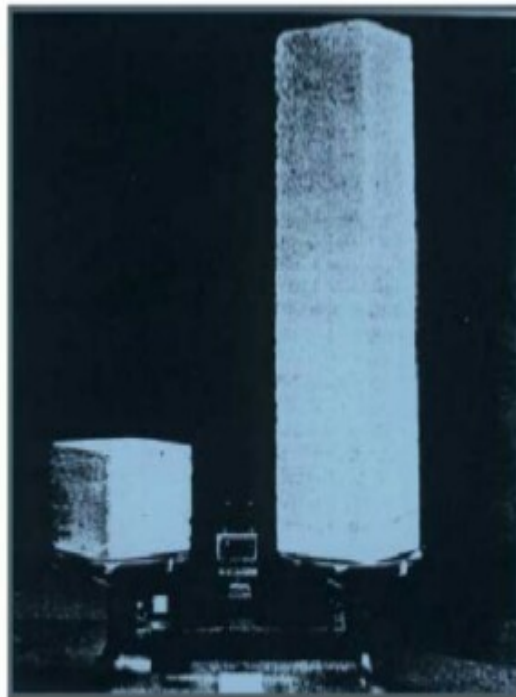


Photo I.3 : Béton normal à gauche et béton léger à droite Ayants le même poids [11].

II.5/ Propriétés mécaniques des bétons légers

II.5.1/ Porosité

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulats, liant) et de plusieurs familles de vides dont la taille varie de quelques dizaines d'Angstrom ($\text{\AA}$) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités.

Les granulats possèdent une porosité intrinsèque, due à la présence de l'air intra-particule. Compte tenu de la taille caractéristique des capillaires (de l'ordre de la dizaine de μm), la porosité du granulats sera qualifiée de porosité microscopique.

La matrice de liant contient également des vides d'air qui apparaissent au moment de la prise des hydrates et du séchage du matériau. On parle d'air intra-liant qui permet de définir la porosité intrinsèque du liant P_1 . La taille caractéristique des pores présents entre les hydrates de Ca(OH)_2 ou de C-S-H, varie entre $0,01 \mu\text{m}$ et $5 \mu\text{m}$ et la taille des pores générés par un entraîneur d'air varie entre $5 \mu\text{m}$ et 1mm [20].

L'air intra-liant sera également considéré comme de l'air microscopique.

$$P_1 = \frac{V_{\text{vide}}}{V_{\text{liant}}}$$

V_{vide} : Volume des vides contenus dans la matrice de liants (m^3).

V_{liant} : Volume totale occupé par la pâte de liants (m^3).

Enfin, l'arrangement plus ou moins compact des différents constituants entre eux (empilement de granulats et du liant) crée des vides supplémentaires, à l'origine de la porosité mésoscopique du matériau.

$$P_{\text{méos}} = \frac{V_{\text{vide}}}{V_t}$$

Avec V_{vide} : volume des vides contenus dans le matériau autres que l'air intra-liant et intra-particule (m^3).

V_t : volume totale occupé par le matériau (m^3).

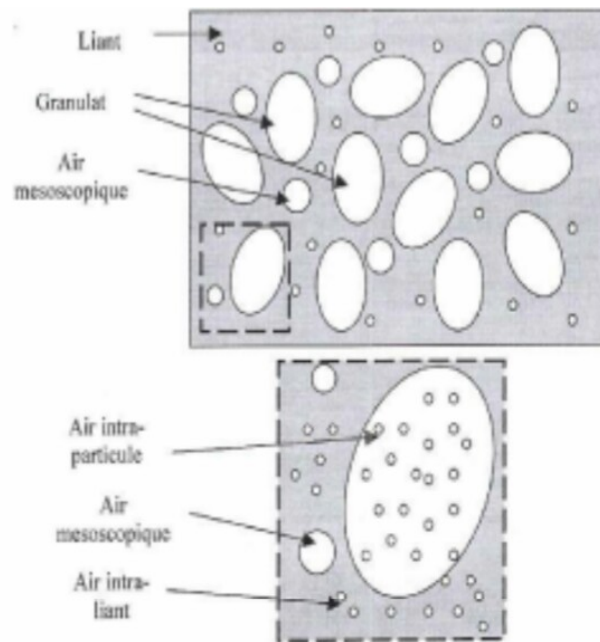


Figure I.4 : Porosité du béton.

Tableau 1.4 : différent classe de porosité [21].

Rayon des pores	Classe	État de l'eau
<0,0001mm	Microporosité	Eau de rétention exclusivement
0,0001 à 2,5mm	Porosité capillaire	Eau capillaire et eau gravitaire
>2,5mm	Macroporosité	Eau gravitaire dominante

II.5.2 / Légèreté

L'emploi des bétons Légers a pour première conséquence une diminution de 20 à 30% de la masse volumique des bétons. La masse volumique d'un béton hydraulique est de l'ordre de 2300 kg/m³ alors qu'elle se situe autour de 1600 kg/m³ pour un béton d'argile expansée, entre 600 et 900 kg/m³ pour un béton de bois et elle varie entre 350 et 650 kg/m³ 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.

II.6/ Comportement et performances mécaniques

Les bétons à granulats légers et cellulaires entraînent une modification du comportement et des niveaux de performance mécanique du béton. En effet, le béton léger est poreux donc moins résistant qu'un béton usuel. Le fonctionnement mécanique et le mode de rupture des bétons légers sont donc modifiés par rapport à ceux d'un matériau contenant des granulats

rigides. Dans le cas du béton léger contournant des granulats de faible résistance, les contraintes cheminent à travers la pâte, 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 léger. Ce mode de rupture est possible car les granulats légers possèdent une surface poreuse importante qui crée une excellente adhérence entre la pâte et le grain. 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.

Une nuance existe cependant dans le cas de granulats très déformables même si leur résistance reste modérée. En effet, sous l'effet des contraintes le mortier vont se déformer et le granulat va faire de même par contact-mortier.

Les niveaux des 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 diminue. Des compagnes expérimentales ont mis en relation performances mécanique et la masse volumique des bétons légers. Dans le cas de granulats d'argile expansée de type Laipor, [22] a obtenu une relation Linéaire entre la résistance à la compression et la masse volumique (**figure I.5**).

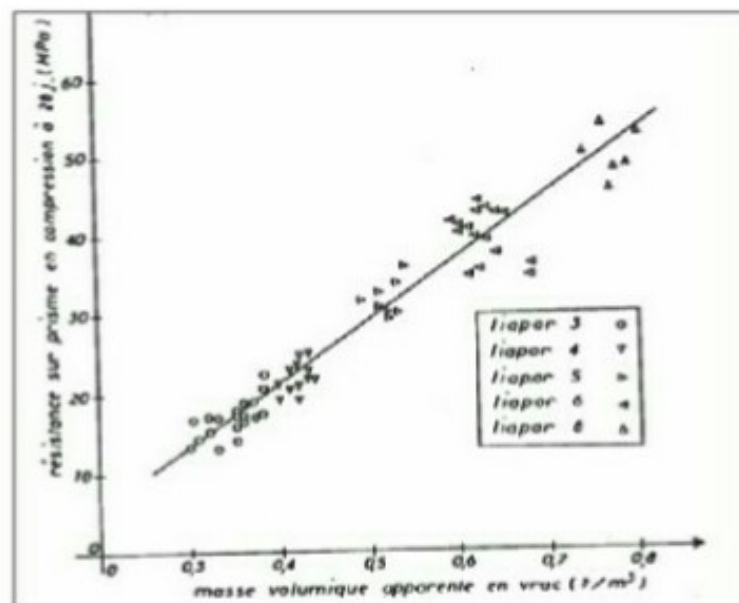


Figure I.5 : La résistance à la compression 28j en fonction de la masse volumique [22].

Tableau I.5 : Caractéristiques de quelques bétons légers.

	Constituants			ρ (kg/m ³)	Porosité ε	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	-	
	Copeau de bois en vrac			275	75 %	-	10 à 12	
	Granulat bois Agresta			600	60%	-	10 à 12	
Béton hydraulique	Granulat	755	0.285	2330	9%	30	36	1.10 ⁻⁴
	Sable	925	0.350					
	Ciment	440	0.140					
	Eau	210	0.215					
	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 + Air			350-650	75 à 82%	5	2 à 3	2.10 ⁻³
Béton de bois	Copeaux de bois	170	0.212	600-900	52 %	3,5à4	-	-
	Ciment	350	0,113					
	Eau	200	0,200					
	Air	-	0.379					
	Sable*	250	0.096					
	Filler*	-	-					

II.7/ Sensibilité à l'eau

Les granulats, poreux et perméables et parfois très perméables, permettent les transferts hydriques sous forme liquide et sous forme vapeur. Dans le cas d'eau liquide, on parle d'absorption et dans le cas d'eau vapeur, on parle de sorption et désorption. La perméabilité représente la faculté qu'à un matériau de laisser un fluide s'écouler en son sein, sous l'effet de

gradient de pression. Cette propriété de perméabilité n'existe donc si le matériau possède une porosité non négligeable et que celle-ci est connectée. En revanche, un matériau peut être très poreux (Le béton cellulaire) et peu perméable car les pores, non reliés entre eux, ne constituent pas des chemins continus, dans lesquels le fluide peut s'écouler. Porosité et perméabilité sont donc liées mais le premier n'implique pas forcément le deuxième.

II.7.1/ L'absorption

L'absorption est un phénomène physique par lequel un liquide migre de l'extérieur vers l'intérieur d'un milieu poreux grâce à un phénomène de remontées capillaires. L'absorption entraîne un gain de masse du matériau. L'absorption n'est possible que si les capillaires du réseau poreux communiquent pour permettre le transfert de l'eau : on parle alors de porosité ouverte ou connectée. Lorsque le matériau contient des pores emprisonnés comme dans le cas du béton cellulaire, on parle de pores occlus. Ces pores ne participent pas au phénomène d'absorption.

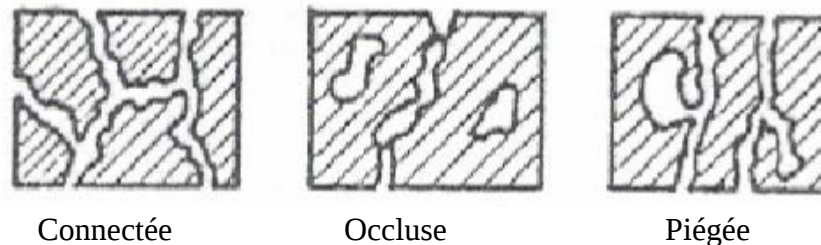


Figure 1.6 : Trois types de porosité présente dans les matériaux.

Une étude expérimentale menée par Vaquier dans [15] a mis en évidence le rôle de la microstructure dans l'absorption en comparant le type et la distribution par taille des pores de quatre granulats Légers et en analysant les conséquences sur l'absorption,

Tableau I.6 : Porosité ouverte des granulats et béton cellulaire et proportion capillaire de diamètre > 2 μm .

	Porosité ouverte (%)	% Pores diamètres > 2 μm
Ponce	55,0	68,0
Argile expansée	53,9	11,7
Schiste expansé	37,0	34,7
Cendre frittée	37,0	17,6
Béton cellulaire	30 à 60	40 à 85

Il constate que la plus grande partie de l'eau est absorbée en quelques minutes et que la quantité d'eau absorbée n'est pas corrélée à la porosité ouverte mais à la porosité ouverte de diamètre supérieur à 2 microns. Ceci est confirmé par la comparaison entre le volume de

liquide maximal absorbé par les granulats et le volume total des capillaires de diamètre supérieur à 2 microns qui sont quasiment identiques.

I1.8/ Propriétés thermiques

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. La conductivité thermique λ est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure.

Un béton usuel à base de granulats rigides, contient de l'air, dû à l'arrangement de la phase solide (squelette granulaire) et à la prise de liant. Or, l'air immobile conduit faiblement la chaleur. Les bétons à base de granulats Légers ont donc été développés, car ils permettent d'augmenter la proportion volumique d'air dans le matériau, en ajoutant l'air intra-particule. A titre comparatif, un béton hydraulique ($\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de $2,0 \text{ W/(m.K)}$ tandis qu'un béton d'argile expansé ($\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de $0,60 \text{ W/(m.K)}$. Un deuxième élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la chaleur massique ou chaleur spécifique C en J/(kg.K) . Cette grandeur caractérise la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de 1°C . Plus la chaleur massique sera élevée, plus le matériau aura besoin d'énergie pour que sa température augmente. Il sera donc moins sensible aux variations de températures du milieu extérieur. Un coefficient C élevé traduit une forte inertie thermique donc une tendance du matériau à peu évoluer lorsque les conditions extérieures changent. Il sert ainsi de régulateur de la température à l'intérieur de la structure [24].

Des études similaires à celles réalisées sur les bétons de granulats Légers, montrent les variations de conductivité λ en fonction de la teneur en eau,

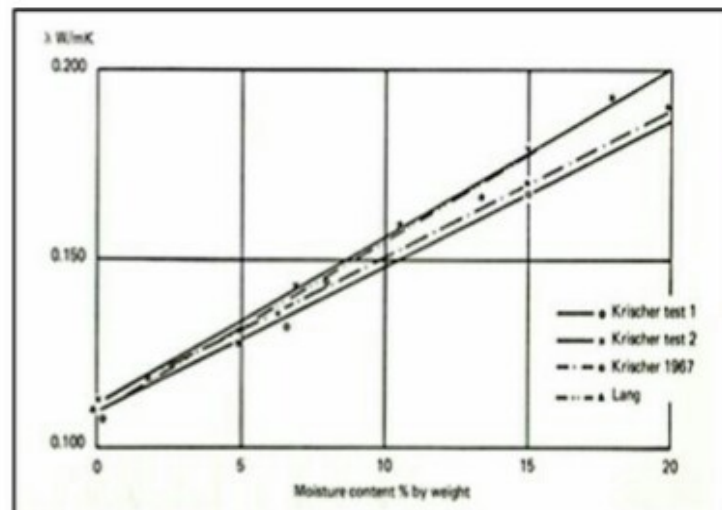


Figure I.7: Conductivité thermique λ en fonction de la teneur en eau massique ω du matériau [13].

Tableau I.7 : Valeurs de la conductivité thermique recommandées par London et Stacey [35].

	Conductivité ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)							
	Pour un béton protégé des intempéries				Pour un béton exposé aux intempéries			
W (%)	5	5	5	2,5	8	8	8	5
Masse Volumique ρ (kg/m^3)	Béton Cellulaire	Béton Léger avec Laitier expansé	Béton Léger avec argile expansé ou cendres volantes frittées	Béton ordinaire	Béton Cellulaire	Béton Léger avec Laitier expansé	Béton Léger avec argile expansé ou cendres volantes frittées	Béton ordinaire
320	0,109	0,087	0,130		0,123	0,100	0,145	
480	0,145	0,116	0,173		0,166	0,130	0,187	
640	0,203	0,159	0,230		0,223	0,173	0,260	
800	0,260	0,203	0,303		0,273	0,230	0,332	
960	0,315	0,260	0,376		0,360	0,289	0,433	
1120	0,389	0,315	0,462		0,433	0,360	0,519	
1280	0,476	0,89	0,562		0,533	0,433	0,635	
1440		0,462	0,678					
1600		0,549	0,749	0,706				0,808
1760		0,649	0,952	0,838				0,952
1920				1,056				1,194
2080				1,315				1,488
2240				1,396				1,904
2400				2,267				2,561

III / Le béton cellulaire

III .1/ Historique

La première invention, qui date de **1830**, est attribuée à W. **Michaelis**. Ce dernier mis en Contact un mélange de chaux, de sable et d'eau avec de la vapeur d'eau saturée sous haute pression et est ainsi parvenue à donner naissance à des silicates de calcium hydratés hydrorésistants

La seconde invention concerne l'expansion des mortiers. En 1889, cette invention a été octroyée à E. **Hoffmann**. En 1924, le Suédois **J-A. Eriksson** débute la production et la commercialisation de béton cellulaire, composé d'un mélange de sable fin, de chaux d'eau, auquel il ajoute une petite quantité de poudre de métal. Trois ans plus tard, il combine ce processus à l'autoclave, tel que décrit dans le brevet de **Michaelis**.

Enfin, une troisième a permis de parvenir au béton cellulaire d'aujourd'hui : la Fabrication en série d'éléments de petits et de grands formats, ainsi que celle d'éléments armés (des armatures métalliques protégées contre la corrosion sont déposées dans le moule avant la coulée). Pour ce faire, une méthode de production a été développée après 1945. Les produits sont coulés aux dimensions souhaitées au moyen de fins fils d'acier très tendus, ce qui permet d'obtenir des produits finis de grande précision.

Les usines implantées en France fabriquent un produit répondant aux normes actuelles de la construction. Elles sont en outre certifiées ISO 9001[36].

III.2/ Définition

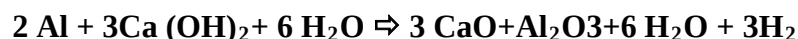
Le béton cellulaire est un matériau de construction à base de matières minérales présentes en abondance dans la nature, ses constituants sont : du sable fin, du ciment, de la chaux et d'un agent expansif tels que :

- poudre d'aluminium
- agent moussant
- Entraîneur d'air.

Ses propriétés physiques (légèreté & solidité, isolation thermo acoustique, ininflammabilité) en font un matériau d'exception.

Dans le béton cellulaire la chaux réagit en présence d'eau avec la silice du sable pour former des silicates de calcium hydratés (tobermorite). La chaux et le ciment servent de liants.

L'agent expansif sert de levain, en cours de fabrication, pour faire lever la pâte et créer les cellules. En milieu alcalin, la poudre d'aluminium par exemple réagit comme suit :



L'hydrogène libéré crée des cellules. En cours de durcissement de la pâte, celui-ci se libère et les cellules se remplissent d'air.

C'est la présence de nombreuses cellules minuscules qui détermine la structure du béton cellulaire. Il est fabriqué en différentes masses volumiques pouvant varier entre 300 et 800 kg/m³ (béton ordinaire : 2400 kg/m³).

III.3/ Les différents types de béton cellulaire

III.3.1/ Béton cellulaire obtenue par réaction chimique : (béton à gaz)

Béton léger dont la légèreté résulte de la formulation de bulles de gaz, principalement par réaction chimique dans la masse dans sa phase liquide ou plastique. Les bulles sont uniformément réparties et retenues dans le mortier d'enrobage lors de sa prise et sont durcies, ce qui produit une structure cellulaire.

III.3.2/ Béton cellulaire obtenue par réaction physique : (béton mousse)

Béton léger dont la légèreté est obtenue par introduction de bulles d'air macroscopique soit par addition au mélange, dans le malaxeur, d'une mousse stable, soit par incorporation d'air durant le malaxage, à l'aide d'un agent moussant. Les bulles d'air sont uniformément réparties et retenues dans le mortier d'enrobage lors de sa prise et sont durcies, ce qui produit une structure cellulaire.

III.3.3/ Béton micro cellulaire :

Béton léger dont la légèreté résulte de la simple évaporation de gouttelettes d'eau microscopique consécutive à un traitement thermique

III.4/ Avantages du béton cellulaire

- C'est un produit que l'on classe dans la catégorie des matériaux de construction dits «propres», dans la mesure où 100 kg de matière suffisent à produire 1 m² de maçonnerie de 25 cm d'épaisseur conforme aux réglementations en vigueur pour la construction de maisons individuelles.
- La fabrication de 1 m³ de béton cellulaire ne nécessite que 250 kWh.
- C'est un matériau non polluant : la fabrication du béton cellulaire ne libère aucun produit polluant, que ce soit dans l'air, dans l'eau ou dans la terre. De plus, grâce à un recyclage à chaque phase de la fabrication, il n'y a pas de gaspillage de ressources (matières premières, eau, énergie).
- C'est un matériau moderne : la fabrication du béton cellulaire est industrialisée et permet la production d'un matériau de construction fini aux dimensions précises, aisé à mettre en œuvre.
- C'est un matériau léger, solide et isolant : le béton cellulaire est rempli d'une multitude de bulles d'air emprisonnées dans des cellules qui lui confèrent légèreté, pouvoir d'isolation thermique et acoustique, ainsi qu'une solidité permettant la réalisation de constructions d'une grande diversité.
- C'est un matériau isotrope : les propriétés physiques et mécaniques du matériau sont conservées quelles que soient l'orientation ou les coupes faites sur le produit. Ainsi l'homogénéité de la structure est parfaite.
- Ce matériau, à la fois traditionnel et moderne, est adapté à la majorité des constructions, aussi bien pour l'habitat individuel ou collectif que pour les bâtiments industriels.

- Le volume d'air représente 80% du volume total du béton cellulaire, tandis que la masse solide est de 20%. 1 m³ de matières premières permet donc de produire 5 m³ de matériau de maçonnerie en béton cellulaire. Cette très grande économie de matières premières est l'un des aspects écologiques du béton cellulaire.
- A titre d'information, la surface des cellules dans 1kg de béton cellulaire est de 20m² ; reportée au m³.

III.5/ Classification du béton cellulaire

Basés sur le mode de cure le béton cellulaire peut être non-autoclave (**BCNA**) ou autoclave (**BCA**). Les résistances mécaniques, le retrait de séchage, l'absorption etc. dépendent directement du mode et la durée de cure. Le développement des résistances est plutôt lent pour les produits non-autoclaves (cure humide). L'autoclavage amorce une réaction entre la chaux et la silice/alumine. Il existe une large variation dans la pression la durée suggérée par plusieurs sauteurs (durée 8-16h et la pression 4,16 MPa) [23]. Les autres variables significatifs sont l'âge et les paramètres du mélange au début du cycle de cure, et le taux de changement de température et pression L'autoclavage est rapporté pour réduire le retrait de séchage significativement et est essentiel si le béton cellulaire est exigé dans des niveaux acceptables de résistance et retrait [23].

Les normes belges **NRN B 21-002** ainsi que les normes européennes **EN 7714** classifient qualitativement le béton cellulaire en catégories en fonction de leur masse volumique sèche apparente (classe ρ) et de leur résistance à la compression (classe f) et la résistance caractéristique à la compression (R_c)

Tableau I.8 : Classification du béton cellulaire selon la masse volumique et la résistance à la compression.

Class ρ	Critères	Classe f	R_c (MPa)
$\rho_{0.4}$	$300\text{Kg/m}^3 \leq \rho \leq 400\text{Kg/m}^3$	f_2	$R_c \geq 2$
$\rho_{0.5}$	$400\text{Kg/m}^3 \leq \rho \leq 500\text{Kg/m}^3$	f_3	$R_c \geq 3$
$\rho_{0.6}$	$500\text{Kg/m}^3 \leq \rho \leq 600\text{Kg/m}^3$	f_4	$R_c \geq 4$
$\rho_{0.7}$	$600\text{Kg/m}^3 \leq \rho \leq 700\text{Kg/m}^3$	f_5	$R_c \geq 5$
$\rho_{0.8}$	$700\text{Kg/m}^3 \leq \rho \leq 800\text{Kg/m}^3$	f_6	$R_c \geq 6$

III.6/ Propriétés du béton cellulaire

III .6.1/ La structure

La structure du béton cellulaire est caractérisée par sa matrice microporeuse solide et macroporeuse. Les macropores sont formés en raison de l'expansion de la masse causée par le dégagement du gaz et les micropores apparaissent dans les parois entre les macropores. Les macropores sont des pores avec un diamètre de plus de 60 μ m [23]. Le système poreux du béton cellulaire est aussi classifié en fonction de distribution de taille de pores : des pores artificiels, des pores intra-particules et des pores intra-liant, et la distribution des pores dans la matrice a une grande influence sur les propriétés du béton cellulaire. Bien que les restes de système poreux soient en grande partie identiques, il existe une différence dans la structure du **BCA** et **BCNA**, causé par les changements incidents dans les produits d'hydratation, qui explique la variation dans leurs propriétés. En autoclavage, une partie de la matière siliceuse réagit chimiquement avec la matière calcaire comme la chaux, et la chaux libérée par l'hydratation du ciment, formant une structure microcristalline stable avec une surface spécifique très réduite. Tada et al [36] ont montré que le BCNA a un plus grand volume de micropores en raison de la présence excessive d'eau. Il a été observé que la distribution de taille de macropores n'a pas beaucoup d'influence sur la résistance mécanique. Les propriétés du béton cellulaire comme résistance, perméabilité, diffusivité, le retrait, et le fluage sont intimement liés à sa porosité et la distribution de taille des pores. Ainsi, la caractérisation de la structure des pores est extrêmement importante, et plus dans le cas du béton cellulaire où la porosité peut être aussi haute que 80 %. La porosité et la distribution de taille cellulaire varient considérablement avec la composition et le mode de cure.

III.6.2/ La densité

Le béton cellulaire dépend de la densité (300-1800 kg/m³), il est essentiel que ses propriétés soient qualifiées avec la densité. En spécifiant la densité, les conditions d'humidité, (c'est-à-dire), séchage à l'étuve ou à l'air libre) doivent être indiqués. Le béton cellulaire avec une vaste gamme de densité pour des applications spécifiques peut être fabriqué avec la variation de la composition qui à son tour influe sur la structure, la taille et la distribution des pores. Une structure cellulaire stable et de préférence sphérique est nécessaire pour des propriétés structurelles et fonctionnelles optimales [23]. Aussi les pores doivent être distribués uniformément dans la masse pour obtenir des produits de densité uniforme. Le développement des macropores dans la matrice est influencé par la densité d'une façon significative [37],[38]. En termes conventionnels, la densité du béton cellulaire est liée à sa compacité et porosité.

III.6.3/ La résistance à la compression

La résistance à la compression du béton cellulaire augmente avec l'augmentation de la densité. La valeur moyenne des résistances mécaniques utilisant des éprouvettes cubiques de densité sèche de 400 kg/m³ a été signalée égale à environ 2 MPa ; pour une densité sèche de 700 kg/m³, elle a été trouvée égale à environ 6 MPa [23]. Un autre rapport a montré que pour une gamme de densité de 500 à 700 kg/m³, la résistance à la compression était de 2 à 4 MPa [40]. L'autoclavage améliore les résistances mécaniques d'une façon significative. Sous des températures et pressions élevées ce qui donne une forme stable de la tobermorite. La résistance mécanique du BCNA. Augmente de 30 à 80% entre 28 jours et 6 mois, et

marginale au-delà de cette période une partie de cette augmentation est attribuée au processus de carbonatation. Avec le contenu de l'humidité de 5 et 10 %, la résistance en compression est réduite environ 20 et 25 % respectivement. La résistance de BCNA et BCA utilisant les cendres volantes a abouti à un rapport résistance/densité plus élevé [38], [39].

La résistance à la compression augmente en fonction de la masse volumique du béton cellulaire comme en attestent les tableaux extraits des normes belges **NBN B 21-200** et **NBNB 21-400**. Les cellules sont plus petites dans un béton cellulaire de forte densité, essentielle est clairement précisée dans le complément national à la norme **EN 771-4**.

Tableau I.9 : Résistance à la compression du béton cellulaire selon la densité.

ρ (kg/m ³)	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
Rc(MPa)	3,0	3,0	3,5	4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0

Diverses formules empiriques ont été déterminées afin de prédire la résistance en compression Rc du béton cellulaire autoclave en fonction de la porosité, voir **tableau I.5**

Tableau I.10 : Formules empiriques de prédiction de la résistance à la compression σ en fonction de la porosité [23].

	Rc ou σ (MPa)	Constantes	Paramètres
Féret modifié (béton de mousse)	$R_{C\alpha} = \gamma(1 + E/C + A/Cj)$	γ, α	E/C : rapport eau/ciment A/C : rapport air/ciment
Schiller	$Rc = \gamma \ln \left(\frac{P_{cr}}{P_t} \right)$	γ	P_t : porosité critique à résistance nulle P_{cr} : porosité du béton cellulaire
Bal 'Shin	$Rc = Rc_0 (1 - P_t)^\alpha$	α	Rc_0 : résistance à porosité nulle P_t : porosité du béton cellulaire
Ryshkewitch	$Rc = Rc_0 \cdot e^{-\beta \cdot P_t}$	β	Rc_0 : résistance à porosité nulle P_t : porosité du béton cellulaire
Hasselmann	$Rc = b - a P_t$	a, b	Rc_0 : résistance à porosité nulle P_t : porosité du béton cellulaire

III.6.4/ Porosité du béton cellulaire

La grande proportion de vide 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 μ m) et les micropores (diamètre < 60 μ m) avec une répartition de 3/4 de macropores pour 1/4 de micropore [42].

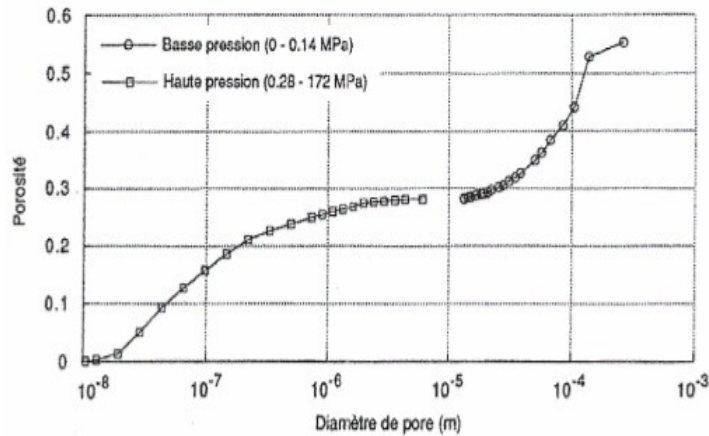


Figure I.8 : Distribution porale cumulée du béton cellulaire autoclave [42].

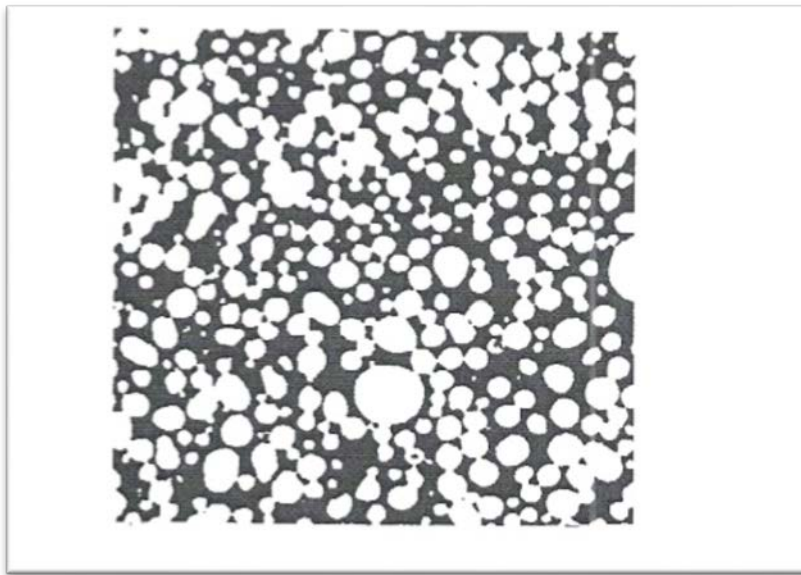


Figure I.9 : Exemple d'image binaire (taille réelle 17 mm x17mm) de béton cellulaire ($\rho=400\text{Kg/m}^3$) [43].

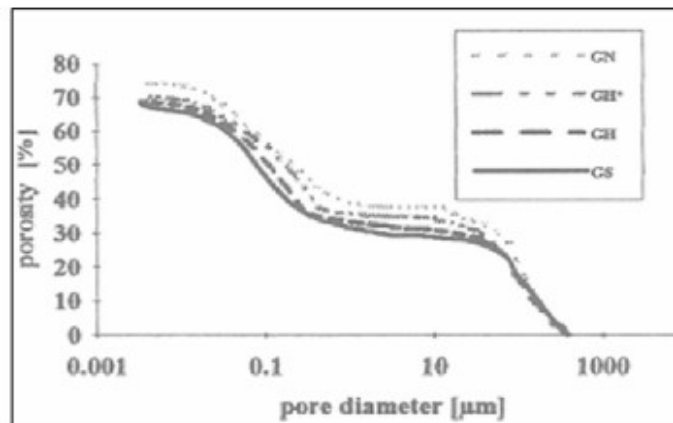


Figure I.10: Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves en fonction du Diamètres des pores [22].

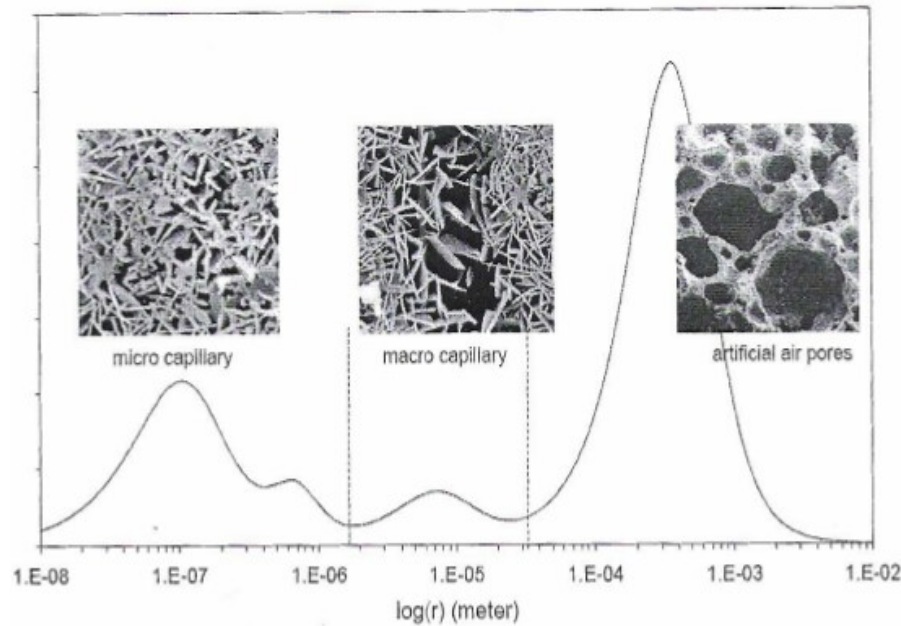


Figure I.11 : Distribution porale volumique du béton cellulaire autoclave [44].

III.6.5/ Conductivité thermique

La conductivité thermique relativement basse du béton cellulaire est due aux pores remplie d'air [45]. La conductivité thermique λ du béton cellulaire dépend principalement de sa densité .D'autre facteur Comme le contenu d'humidité, le niveau de température, la structure poreuse et des matières première influent aussi la conductivité thermique [46]. La relation entre la conductivité thermique et la densité des spécimens secs d'un **BCA** est montré dans la figure I.8 [43]. Comme attendu, la conductivité thermique augmente avec l'augmentation du contenu d'humidité [47]. La quantité de pores et sa distribution sont aussi des facteurs qui influent sur l'isolation thermique du béton cellulaire.

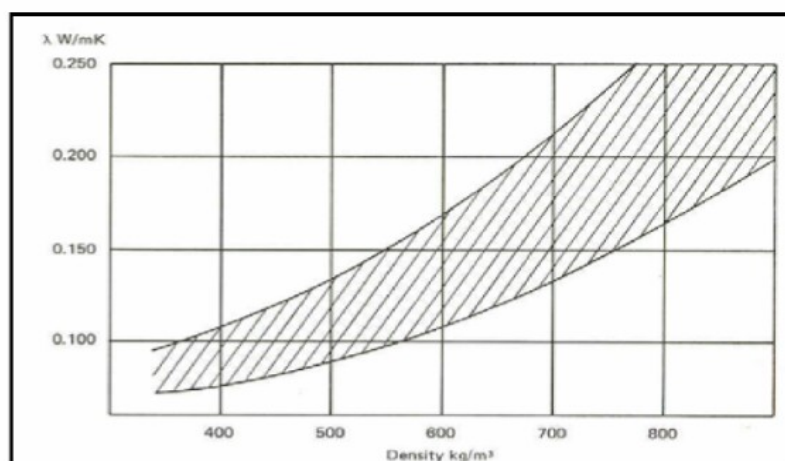


Figure I.12 : Conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique sèche du béton cellulaire [23].

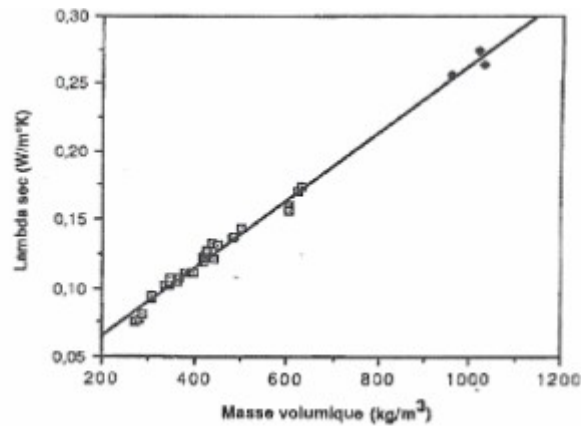


Figure I.13 : Evolution de la conductivité thermique du béton cellulaire en fonction de sa masse volumique jusqu'au non-expansé [28].

Tableau I.11 : Caractéristiques thermiques de quelques matériaux [13].

	ρ (kg/m³)	Porosité Pr%	C (J/Kg.k)	λ (W/m.k)
Air	1,2	-	1000	0,026
Eau liquide	988	-	4180	0,602
Béton hydraulique	2330	8	1050	1,80 à 2,00
Béton argile expansé	1600	36	900	0,46
Béton de cellulaire	350 à 650	75 à 82	880	0,16 à 0,33
Béton de bois	600 à 900	52	1200	0,09 à 0,30
Brique	1800	-	860	1,15

III.7/Techniques de mesure des paramètres de transferts

III.7.1 / Paramètres de transfert thermique

Les paramètres thermiques indépendants que l'on cherche à identifier sont au nombre de deux. Il s'agit de la conductivité thermique apparente k_{11} ou λ^* ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et la capacité calorifique massique apparente c^* ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) ou volumique $C^* = \rho_0 c^*$ ($\text{J.m}^{-3}.\text{K}^{-1}$). Ce sont les paramètres intervenant dans l'équation de conduction de la chaleur (loi de Fourier). Un troisième paramètre dépendant des deux premiers peut être déduit. Il s'agit de la diffusivité thermique apparente du milieu a^* ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) donnée par le rapport de la conductivité thermique λ^* à la chaleur volumique du milieu C^* . La signification de ces paramètres, dans un milieu polyphasique est moins « claire » que pour un milieu homogène. En effet, la complexité de la structure poreuse et le changement d'état de l'humidité présente dans le matériau sous l'effet de gradients thermiques sont susceptibles d'influer notablement sur les bilans énergétiques et

donc de modifier les valeurs apparentes des paramètres thermophysiques. Si l'on suppose un transfert purement conductif, le double problème auquel on se trouve confronté sera donc, d'une part d'estimer les caractéristiques thermiques globales équivalentes à celle d'un milieu homogène du matériau poreux à partir de ses différents constituants en tenant compte de sa structure et d'autre part, d'évaluer les corrections à apporter aux coefficients thermiques vrais pour intégrer l'effet d'éventuels transferts purement conductif lié à l'état hydrique du matériau.

De nombreuses méthodes de mesure des paramètres de conduction sont utilisées. Elles peuvent être divisées en deux classes principales selon le régime de chauffage employé :

- **Régime stationnaire :**

L'établissement d'un gradient stationnaire de température à l'intérieur d'un matériau solide plan permet une détermination simple de la conductivité thermique, puisqu'il suffit de mesurer les températures des faces du matériau ainsi que le flux thermique qui le traverse. Parmi les méthodes stationnaires utilisées on cite : la méthode de la plaque chaude gardée [48], la méthode du fil chaud [49] et la méthode des cylindres coaxiaux [50].

- **Régime instationnaire :**

L'établissement d'un gradient stationnaire de température à l'intérieur d'un matériau solide est généralement long, surtout pour des matériaux solides peu conducteurs. Des méthodes plus rapides ont été développées en mesurant des variations de température en régime instationnaire ou transitoire. L'avantage de ces méthodes par rapport aux méthodes stationnaires réside dans la rapidité du temps de mesure. Un temps d'acquisition de la température d'environ 500 secondes est largement suffisant pour déterminer les paramètres thermiques. De plus, le régime transitoire fait intervenir outre la conductivité thermique du matériau, la diffusivité thermique et par conséquent la capacité calorifique du matériau. Parmi les méthodes transitoires utilisées on peut citer: la méthode du fil chaud [51], la méthode de la sonde axiale basée sur le principe du fil chaud [52], la méthode par chauffage périodique [53], la méthode du film chauffant [54] et la méthode photothermique flash [55].

Récemment, d'autres techniques de mesure en régime transitoire ont été développées. Il s'agit de la méthode de la sonde monotige à faible inertie thermique développée par [53] et destinée à la détermination de la conductivité thermique et la méthode de la sonde plane TPS (Transient Plane Source) développée par [54] et destinée à la détermination simultanée de la conductivité thermique et de la diffusivité thermique du matériau poreux. La sonde TPS est issue du développement de la sonde THS (Transient Hot Strip) développée par [55]. Ce sont ces deux techniques qui seront employées dans cette étude. Une description détaillée de ces deux méthodes sera donnée dans le chapitre consacré aux techniques expérimentales.

III.7.2/ Paramètres de transfert hydrique

En se limitant au cas d'un écoulement unidirectionnel, selon le travail de [56] que le seul paramètre intervenant dans le phénomène de transfert d'humidité est la diffusivité hydrique D_w qui est la somme de la diffusivité hydrique de la phase vapeur D_{wv} et de la diffusivité hydrique de la phase liquide D_{wl} . La première est dominante dans le cas des faibles teneurs en eau tandis que pour des teneurs en eau élevées c'est le transfert en phase liquide qui est

dominant. La figure I.4 est une représentation schématique de l'évolution de la diffusivité hydrique $D_\theta = D_{\theta v} + D_{\theta l}$ en fonction de la teneur volumique en eau θ selon [57]... [59].

La teneur volumique en eau θ_r représente la rupture de continuité de la phase liquide, c'est la valeur pour laquelle la perméabilité du liquide s'annule. La détermination du coefficient de transfert en phase vapeur D_{wv} ou $D_{\theta v}$ est déterminé à partir de l'isotherme de sorption. On trouvera dans les travaux de [56], [60]... [62] une étude plus complète des phénomènes de sorption et du processus de condensation dans les matériaux poreux.

Le coefficient de transport en phase liquide D_{wl} ou $D_{\theta l}$ est déterminé à partir du profil hydrique type $\theta(b)$ où b est la variable de Boltzmann ($b = x.t^{-1/2}$). Le profil type est déduit à partir de l'évolution spatio-temporelle de la teneur en eau $\theta(x, t)$ dans le matériau lorsque celui-ci est mis en contact avec une nappe d'eau. Les méthodes généralement employées pour le suivi de l'évolution de la teneur en eau dans l'espace et dans le temps sont la technique de l'atténuation des rayons gamma et l'imagerie par résonance magnétique nucléaire RMN. Pour plus de détails sur ces méthodes on peut se référer aux travaux de [63] ... [68].

Chapitre II

**Caractérisation des matières premier
et technique expérimentale**

II.1/ Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons toutes les techniques expérimentales employées dans ce travail de recherche, permettant de réaliser l'identification des matières premières utilisées, ainsi que les essais de mesure des propriétés physico-mécanique et thermique. Les composants de base de notre béton sont le sable de calcaire, le ciment, la chaux et l'eau de gâchage.

La caractérisation physico-chimique de ces composants serait indispensable en vue d'une interprétation rationnelle des résultats de différents essais qui seront effectués sur le béton frais et durci.

Notons que tous les essais expérimentaux ont été effectués au laboratoire de recherche de génie civil de l'université Amar Telidji à Laghouat.

II.2/ Caractérisation des matières premières

II.2.1/ Sable de calcaire

Le sable calcaire utilisé lors de cette étude est issu des résidus de la station de concassage des roches calcaires dite Station d'Ouezzane située au nord de la commune de Laghouat près du pont d'Oued M'zi. En effet, dans cette station, la fraction des granulats dont le diamètre est supérieur à 3 mm est commercialisée, le reste est rejeté dans la nature (Photo II.1).



Photo II.1 : Provenance de Sable calcaire.

II.2.1.1/Analyse granulométrique par tamisage (EN933-1 et EN 933-2)

L'analyse granulométrique permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon. On utilise une série de tamis emboîtés les uns sur les autres dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas.

Le matériau est placé en partie supérieure des tamis et le classement des grains s'obtient par vibration de la colonne de tamis. La courbe qui relie le pourcentage des passants aux diamètres des tamis est appelée courbe granulométrique. A partir de l'analyse granulométrique, certains coefficients de classification peuvent être déterminés :

II.2.1.2/ Module de finesse

La finesse du sable étudié peut être quantifiée par le calcul du module de finesse M_f .

Celui-ci correspond à la somme des pourcentages des refus cumulés, ramenés à l'unité, pour les tamis d'ouverture 0,16- 0,315- 0,63- 1,25- 2,5 et 5mm. Le module de finesse représente, en quelque sorte, et de manière approchée, la surface comprise entre la courbe granulométrique et l'axe horizontale supérieure du graphe. Il est noté M_f et exprimé par la formule suivante :

$$M_f = \frac{\sum \text{refus cumulés en \% pondéral des tamis (0.16-0.315-0.63-1.25-2.5-5mm)}}{100} \quad (\text{II.1})$$



Photo II.2 : Appareillage de l'essai d'Analyse granulométrique par tamisage.

Les résultats de L'analyse granulométrique du sable calcaire sont présentés par la courbe granulométrique de **la figure II.1**.

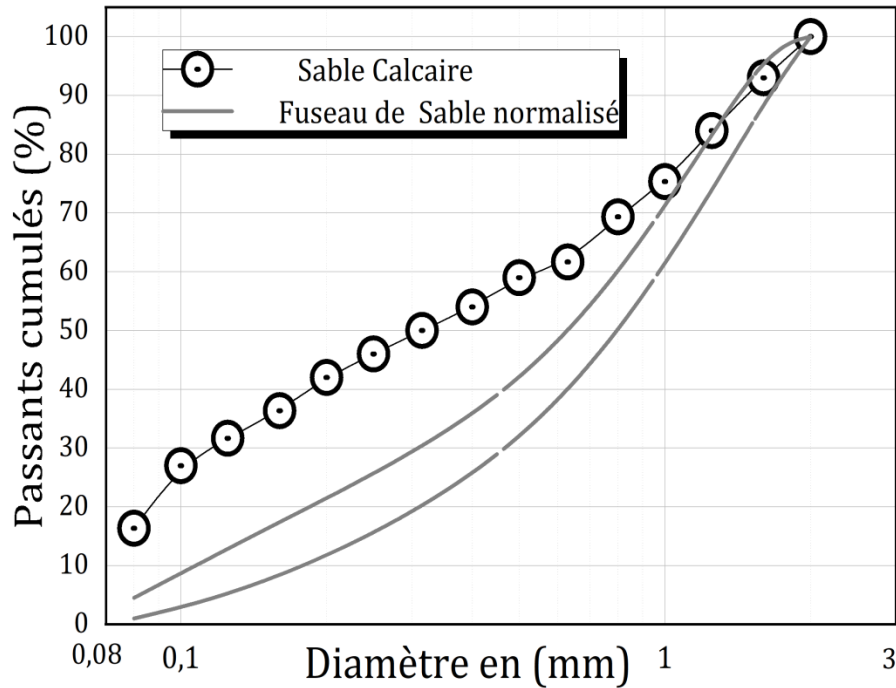


Figure II.1 : Courbe granulométrique du sable calcaire.

L'analyse granulométrique qu'on a réalisée selon la norme **EN 933-1** et **EN 933-2** a montré que ce sable contient un grand pourcentage des fines. Selon des études précédentes, la quantité des fines (filler calcaire) représente 9% du poids total, pour améliorer la compacité et obtenir une résistance maximale. Le diamètre maximal est 2 mm.

II.2.1.3/Equivalent de sable (EN 933-8)

L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du floculat et de la partie sédimentée. Ces hauteurs sont déterminées dans une éprouvette où la prise d'essai a été traitée, dans des conditions définies, par une solution capable de faire flocculer les éléments fins. L'essai permet d'avoir une idée globale de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans un sable en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argile, impuretés).

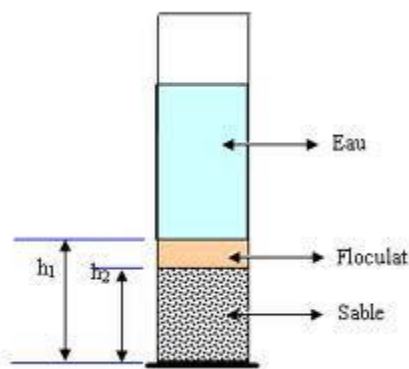


Figure II.2 : Détermination de l'équivalent de sable.

ES est exprimé par la formule suivante :

$$ES = 100 \frac{h_2}{h_1} \quad \text{Eq (II.2)}$$

-hauteur h_1 : sable propre +élément fins.

-hauteur h_2 : sable propre seulement.

II.2.1.4/Masses volumiques absolue et apparente (NF P 18-555)

Elles sont exprimées en kg/m^3 . La masse volumique absolue est la masse par unité de volume absolu de la matière qui constitue l'agrégat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains ; tandis que la masse volumique apparente est la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

$$\rho_{abs} = \frac{M}{V_{abs}} \quad \text{Eq(II. 3)} \quad \text{et} \quad \rho_{app} = \frac{M}{V_{app}} \quad \text{Eq(II.4)}$$

Les méthodes utilisées sont le récipient de 1l pour la masse volumique apparente et pour la masse volumique absolue on utilisera les méthodes de l'éprouvette graduée et le pycnomètre. Pour les liants on utilisera le voluménomètre de Le Chatelier (**ASTM C 188-72**) (photo II-2), et un liquide inerte vis-à-vis de la poudre (liant) ce sera par exemple du tétrachlorure de carbone ou du benzène.

$$\rho_{ab} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1} \quad \text{Eq(II. 5)}$$



Photos II.3 : Voluménomètre de Chatelier.

Tableau II.1 : Caractérisation physico-chimique de sable calcaires.**Caractérisation de sable calcaire :****Caractéristiques Physiques**

Analyse granulométrique : 0/D	0/2
< 2 mm (%)	100
< 80 μm (%)	16,34
Coefficient d'uniformité : Cu	6,60
Coefficient de courbure Cc (%)	0,6
Module de finesse : Mf (%)	2,60
Equivalent de sable : ES (%)	78,10
Masse apparente (g/cm^3)	1,60
Masse absolue (g/cm^3)	2,64
SSB de Filler calcaire (cm^2/g)	2193 $\pm$ 27

Caractéristiques chimiques

CaCO_3 (%)	83
NaOH (%)	2,4
Al_2O_3 (%)	0,17
Fe_2O_3 (%)	0,26
MgO (%)	0,012
NaCl (%)	0,11
Insolubles	10,90
Autres (%)	3,95
Valeur de Bleu ($\text{g}/1000\text{g}$)	1,33

L'analyse minéralogique par diffraction au rayon X présentée dans la figure II.3 montre que notre matériau est principalement composé de calcite (CaCO_3), avec la présence de traces de quartz (SiO_2) et de dolomite $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ et de la ferrite (FeO_2). Cette teneur élevée en CaCO_3 est favorable pour le durcissement et la cimentation de ces matériaux compacté.

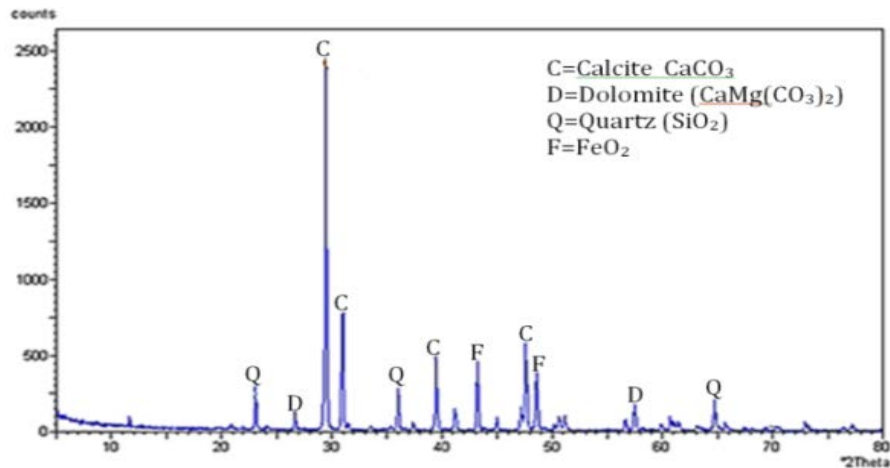


Figure II.3 : Diffractogramme aux rayons X du sable calcaire.

II.2.2/Ciment

Nous avons utilisé un seul type de ciment. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ – CEM II/B 42,5 sous le nom commercial MATINE qui répond à la norme Algérienne NA 442, de l'usine de LAFRAGE.

II.2.2.1/ Consistance du ciment (EN 196-3)

L'essai de consistance normale est effectué avec l'appareil de vicat selon la norme EN196-3. La consistance normale représente le pourcentage d'eau requis pour la fabrication d'une pâte de ciment de consistance normale. Elle est évaluée en mesurant l'enfoncement d'une tige cylindrique, sous l'effet d'une charge constante, dans la pâte. L'enfoncement est d'autant plus important que la consistance est plus fluide, cette consistance est alors appelée "consistance de vicat".

II.2.2.2/ Prise de ciment (EN 196-3)

L'essai consiste à suivre l'évolution de la consistance d'une pâte de consistance normalisée permettant ainsi d'évaluer la vitesse de durcissement de la pâte de ciment durant les premières heures qui suit l'addition de l'eau.

Le début et la fin de la prise sont déterminés à l'aide de l'aiguille de Vicat qui est le moyen le plus couramment utilisé selon la norme française EN 196-3.

Le "temps de début de prise" repère donc le moment où l'hydratation du ciment passe de la période dite dormante à une période d'hydratation plus active au cours de laquelle la pâte de ciment connaît un brusque accroissement de sa viscosité jusqu'au moment où elle atteint la consistance d'un solide, c'est le temps de fin de prise.

II.2.2.3/ Mesure de la finesse (EN 196-6)

La finesse d'un ciment est généralement exprimée par sa surface massique: c'est la surface totale des grains contenus dans une masse unité de poudre. La surface massique est généralement exprimée en cm^2 de surface des grains de liant par gramme de poudre. L'essai consiste à faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment, en utilisant un

perméabilimètre Blaine (Photo II.3); plus la surface massique de cette poudre est importante et plus le temps t mis par l'air pour traverser la poudre est long. La surface est proportionnelle à $\sqrt{t}$. La surface spécifique est calculée par la formule:

$$S = K \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1-e)\sqrt{\eta}} \quad \text{Eq (II.5)}$$

S – Surface spécifique (cm^2/g).

k – Constante de l'appareil.

e – Porosité de la couche tassée.

t – Temps mesuré en secondes.

ρ – Masse spécifique du ciment (g/cm^3).

η – Viscosité dynamique de l'air à la température d'essai (en poises).



Photo II.4: Perméabilimètre de Blaine.

Tableau II. 2 : Composition chimique et caractéristiques physiques du ciment.

Caractéristiques de ciment :

Caractéristiques physiques	
Masse apparente (g/cm^3)	1,12
Masse spécifique (g/cm^3)	3,10
SSB (cm^2/g)	3006±17
Temps de début de prise	2h 15
Temps de fin de prise	4h 20
Refus sur un tamis 100µm	0

Caractéristiques Chimiques (%)

CaO	63,55
SiO ₂	23,4
Al ₂ O ₃	4,82
Fe ₂ O ₃	3,94
MgO	1,65
K ₂ O	0,6
SO ₃	0,48
Na ₂ O	0,1
Cl	/
CaO libre	0,92
Insoluble	0,5
Pert au feu	3,15

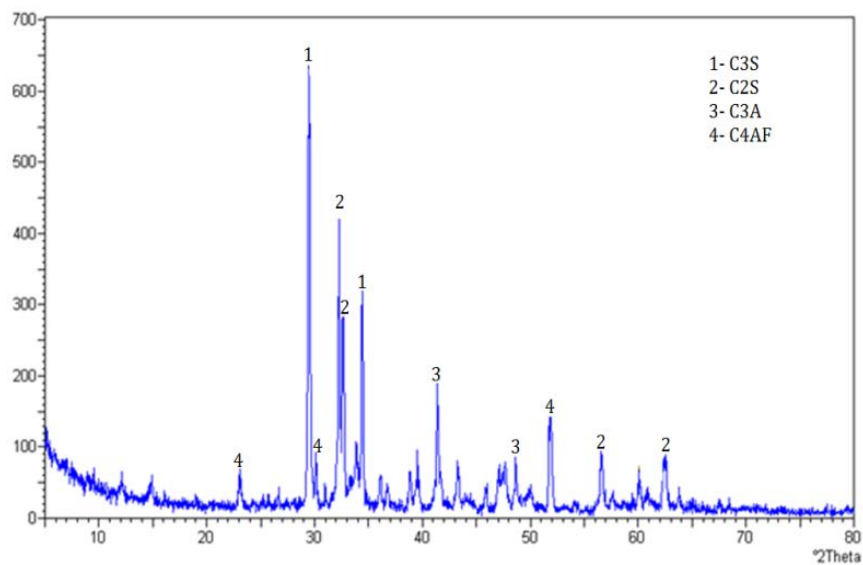


Figure II.4 : Diffractogramme aux rayons X du ciment.

II.2.3/La chaux

La chaux utilisée dans cette étude est une chaux broyée de l'unité SODEPAC de la wilaya de Saida-Algérie. Elle est fabriquée à partir d'un calcaire CaCO_3 contenant moins de 5% d'oxyde de Magnésium MgO et moins de 2% de Trioxyde de soufre SO_3 .

Avant d'entamer la partie expérimentale, la chaux a subi un prétraitement qui se résume en extinction, séchage et broyage jusqu'à avoir une surface spécifique au voisinage de celle de ciment et de le rendre hydraté (photo II.5)

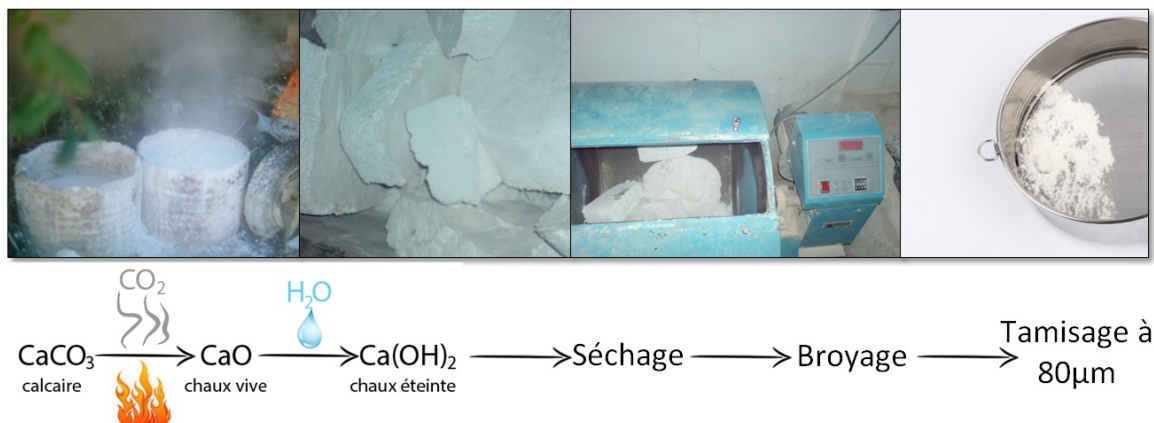


Photo II.5 : Différents phases de préparation de la chaux éteinte.

Les caractéristiques physico-chimiques et l'analyse minéralogique et granulométrique de la chaux sont données dans le tableau II.3 ci-dessus.

Tableau II.3 : Composition chimique et caractéristiques physiques de la chaux.

Caractéristiques de la chaux :

Caractéristiques Chimiques (%)	
CaO	>73,3
SiO ₂	<1,65
Al ₂ O ₃	<3,94
Fe ₂ O ₃	<4,82
MgO	<0,5
CO ₂	<0,1
SO ₃	<0,6
Na ₂ O	0,4 - 0,5
CaCO ₃	<10
Matériau Insoluble	<1

Caractéristiques physique

Masse apparent (g/cm ³)	0,633
Masse spécifique (g/cm ³)	2,182
SSB (cm ² /g)	4974± 14
Passant à 63µm/80µm	0,898
Refus sur un tamis 100µm	0

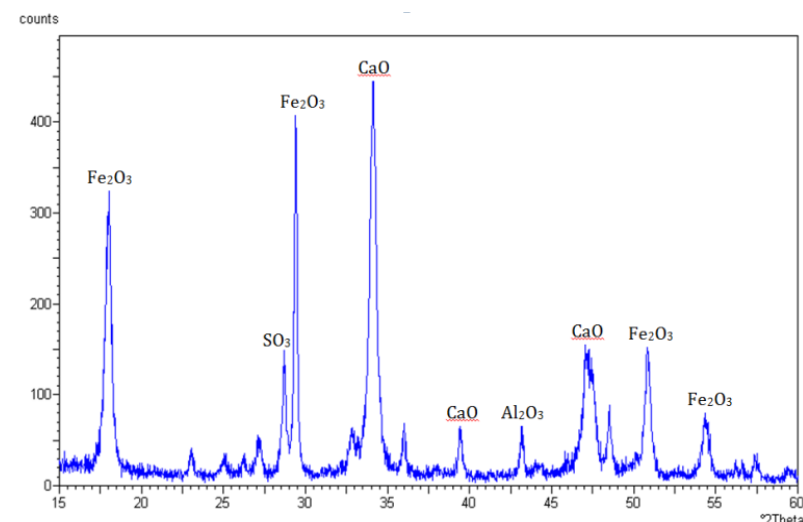


Figure II.5 : Diffractogramme aux rayons X de la chaux.

II.2.4/Poudre d'Aluminium

La poudre d'aluminium utilisée comme agent réactif pour l'expansion du béton confectionné est un aluminium pur à 99%, de granulométrie d'environ 75µm, fabriqué par la société SIGMA-ALDRICH. A noter que la qualité de l'aluminium et sa finesse influent sur la réaction d'expansion (aluminium –chaux) et par conséquent sur la densité du produit fini.

II.2.5/Eau de gâchage

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau potable (eau de robinet) distribuée par le réseau du service public de la Wilaya de Laghouat. Les résultats de l'analyse chimique de cette eau fournis par le laboratoire d'Algérie des eaux de département de Laghouat sont présentés dans le tableau 4. Ils répondent aux prescriptions de la norme XP P 18-303 et NF EN 1008 (IDC P 18-211), (2003).

Tableau II.4 : Composition chimique de l'eau de gâchage (mg/l).

Ca	Mg	Na	K	Cl	SO ₄	CO ₃	NO ₃	PH	T (°C)
74,4	49	40	5	95	170	300	42,3	7,5	17,1

II.3. / Essai expérimentaux effectués

II.3.1/ Essai d'écoulement NF P18-452 (Essai au maniabilimètre B)

Le temps d'écoulement est mesuré à l'aide d'un maniabilimètre B, conformément à la norme NF P18-452. Cette grandeur est caractérisée par la mesure d'écoulement qui est autant plus grande que la consistance du mortier est épaisse.



Photo II.6 : Maniabilimètre B (180x90x90mm³).

II.3.2/ Résistances mécaniques en compression

La technique expérimentale utilisée est celle de méthodes d'essai des bétons cellulaires article N°24 (résistance à la compression du béton cellulaire) approuvées par la commission des bétons légers [64].

Les mesures ont été effectuées à l'âge de 28 jours sur des éprouvettes prismatiques de mortiers 4x4x16 cm³ démoulées à un jour et conservées dans une chambre de conservation où la température varie entre 21°C±3°C et a une humidité relative varie entre 85% ±3%.

La presse utilisée pour ces essais a une capacité de 100 KN et une vitesse de déplacement de 0,1 à 0,3 mm / min et une vitesse de chargement contrôlable (conformément à la norme NFP 18-406 et aux recommandations CPC4 de la **(RILEM)**). La presse utilisée de marque CONTROLS pilotée par ordinateur.

Au premier temps la résistance est mesurée dans deux directions, la direction parallèle au sens de l'expansion noté R_{c1} et au sens perpendiculaire au sens de l'expansion du matériau noté R_{c2} , ceci afin de mettre en évidence l'influence de la forme géométrique des pores sur la résistance à la compression à l'état sec, par la suite nous avons constaté que le rapport R_{c1}/R_{c2} est très proche de 1 et que la forme des pores est quasi-sphérique pour tous les mélanges élaborés soit à l'intérieur ou sur la surface externe d'échantillon (Photo II.7) .

A cet effet la résistance sera mesurée uniquement dans une seule direction qui est la direction perpendiculaire au sens de l'expansion du matériau à cause de ces surfaces rectilignes qui nous permet avoir une répartition homogène de la charge mieux au moment d'écrasement d'éprouvettes.

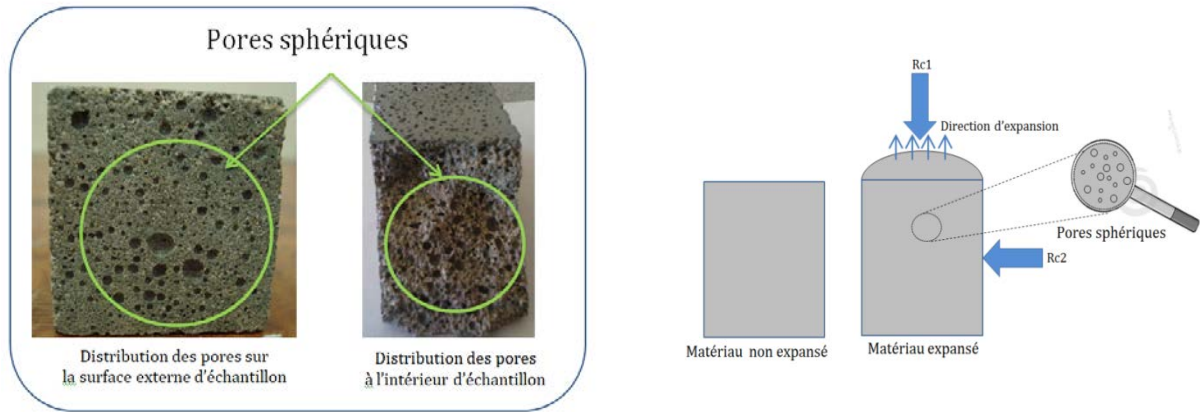


Photo II.7 : forme des pores dans la matrice.

II.3.3/ La masse volumique apparente et absolue

Par définition, la masse volumique apparente sèche ρ_{app} est le rapport de la masse de l'échantillon M à son volume apparent sec V_t . Et la masse volumique absolue est le rapport de la masse de la matière à son volume absolu (voir la formule II.4).

Les mesures sont réalisées par pesées et mesure des dimensions des éprouvettes pour la densité apparente tandis que pour la densité absolue, l'échantillon de matière a été obtenu par broyage des morceaux d'éprouvettes. L'état sec est obtenu par séchage de l'échantillon en étuve à 105°C jusqu'à masse constante.

II.3.4/ La Porosité totale

La porosité est une caractéristique très importante, elle influe sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons. C'est une des principales caractéristiques du matériau poreux.

La porosité de béton provient de celle de la matrice et celle du granulat, elle est exprimée en pourcentage et représente la fraction des volumes des vides dans le matériau par rapport au volume total. Connaissant la masse volumique ρ_{abs} du solide obtenue, le calcul de la porosité totale H est immédiat si l'on connaît, de plus, la masse volumique apparente ρ_{app} de l'échantillon auquel on s'intéresse. En effet, on peut écrire:

$$P = 1 - \frac{\rho_{app}}{\rho_{abs}} \quad Eq(II.6)$$

II.3.5/ La porosité accessible à l'eau

La porosité totale est en fait composée de la porosité connecté ou ouverte (ensemble de pores reliés à l'extérieur) et de la porosité fermée ou vacuolaire (celle qui n'est pas connecté avec l'extérieur). Seule le premier est accessible aux fluides, l'eau en l'occurrence.

La porosité accessible ou ouverte est mesurée par la méthode de saturation sous vide. En effet, l'échantillon est placé dans un dessiccateur fermé dans laquelle on établit le vide (Photo II.7). L'enceinte est mise en dépression à l'aide d'une pompe à vide jusqu'à ce que la pression dans l'enceinte atteint environ 0,1 bars [65]. On introduit alors de l'eau déminéralisée dans

l'enceinte jusqu'à immersion totale des échantillons. Après 24h environ, la perméabilité des échantillons nous laisse supposer qu'ils ont atteint leur saturation maximale. L'échantillon saturé est par la suite sortie de l'enceinte puis pesé, soit $m_{sat}(g)$ la masse de l'échantillon saturé. Le volume des pores accessible à l'eau (V_a) sous vide est égal au volume d'eau qui a pénétré dans l'échantillon (V_{eau}), ($V_a = V_{eau}$). Le volume des pores accessible se détermine par la formule suivante :

$$V_a = V_{eau} = \frac{m_{eau}}{\rho_{eau}} = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{\rho_{eau}} \quad Eq (II.7)$$

Et la porosité accessible se détermine par : $P_{acc} = \frac{V_a}{V_t}$

Où ρ_{eau} représenté la masse volumique de l'eau, estimée à $1g/cm^3$. La porosité accessible s'obtient ainsi par simple pesée de l'échantillon sèche et de l'échantillon saturée.



Photo II.8 : Dispositif et échantillon utilisés pour l'essai d'accessibilité à l'eau.

II.3.6/ Absorption capillaire (Sorptivité)

Cet essai mesure le taux d'absorption de l'eau par suctions capillaires des éprouvettes de mortier non saturées, mises en contact avec de l'eau sans pression hydraulique.

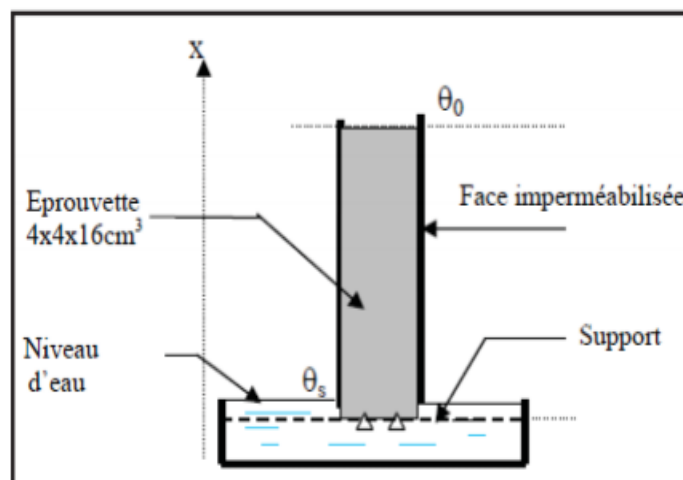


Figure II.6: Schéma de l'essai de capillarité.

Avant les mesures de la Sorptivité, les échantillons seront préalablement conditionnés dans l'étuve à environ 50 °C jusqu'à une masse constante. L'essai de Sorptivité détermine le taux ou vitesse d'absorption par remontée capillaire d'une éprouvette (4x4x16) cm³ placée sur de petits supports dans un bac contenant de l'eau suivant le schéma indiqué à la figure II.6 de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que d'une hauteur de 5 mm de la profondeur du bac, le reste de l'éprouvette est préalablement imperméabilisé par un film plastique sur toutes les autres faces. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps, le montage expérimental de l'essai d'absorption est clair dans la figure II.6 ci-dessus.

Ce paramètre hydrique est déterminé en traçant l'évolution du volume d'eau absorbé par l'éprouvette (4x4x16) cm³ en fonction de la racine carrée du temps. Cette évolution est caractérisée en général par deux tronçons linéaires. Le premier, qui est caractérisé par une pente assez importante, est utilisé pour la détermination de la sorptivité du matériau.

$$i = S_w \sqrt{t} \quad \text{Eq(II. 8)}$$

Où S_w est la sorptivité du matériau et i le volume d'eau absorbée par unité de surface. Expérimentalement, la sorptivité est déterminée en traçant l'évolution du volume d'eau absorbé par l'échantillon par unité de surface absorbante en fonction de la racine carrée du temps. La quantité d'eau absorbée est mesurée par pesée à 0,01g près à différents intervalles de temps et le volume est déduit à l'aide de la masse volumique de l'eau liquide (1g/cm³). La sorptivité est, donc, définie comme étant la pente de la droite caractérisant l'évolution du volume d'eau en fonction de la racine carrée du temps dans la première période de l'absorption. Notons que la sorptivité, ainsi déterminée, est équivalente au coefficient d'absorption capillaire utilisé par les recommandations de [66]. Le taux d'absorption volumique par unité de surface i à un instant t donné est calculé en utilisant la formule :

$$\frac{M(t) - M(0)}{\rho_w \cdot A_{ab}} \quad \text{Eq(II. 9)}$$

Où : $M(t)$: masse de l'échantillon humide à l'instant t .

$M(0)$: masse initiale de l'échantillon à l'état sec.

ρ_w : masse volumique de l'eau liquide (1 g/cm³).

A_{ab} : Surface absorbante de l'échantillon (4x4 =16 cm²).

II.3.7 / Essais de Caractérisations thermiques

Le pouvoir isolant des matériaux est caractérisé par leur conductivité thermique et leur diffusivité thermique. La conductivité thermique λ exprimée en W.m⁻¹. K⁻¹, traduit l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur. Elle est définie comme la quantité de chaleur qui traverse perpendiculairement pendant l'unité de temps l'unité de surface isotherme quand la température présente un écart de 1°C sur l'unité de longueur de distance. Plus le matériau est isolant et plus faible est sa conductivité thermique. Généralement la conductivité thermique augmente avec la densité du matériau [56]. La diffusivité thermique « a » d'un matériau exprime la vitesse de propagation d'une perturbation thermique dans un milieu, elle est exprimée en (m²/s). Plus la diffusivité d'un matériau est faible, plus le matériau est thermiquement isolant. La conductivité thermique λ (W/m.K) et la diffusivité a (m² /s) dépendent des caractéristiques intrinsèques des constituants du matériau, de sa microstructure

et de son état d'humidité (rôle de l'eau). Ce sont ces deux paramètres qu'on a cherché à identifier pour les matériaux élaborés. De nombreuses méthodes et différents instruments de mesure ont été utilisés pour la détermination de la conductivité thermique des matériaux.

La mesure utilisée dans notre cas est la méthode dite du **fil chaud** pour certains échantillons et celle du hot disk ou méthode TPS pour d'autres.

II.3.7.1/ Méthode du fil chaud

C'est une méthode de mesure de la conductivité thermique des matériaux isolants. On place un fil chauffant entre les surfaces de deux échantillons du matériau à caractériser. On applique un échelon de flux de chaleur constant ($\varphi = 0$ si $t < t_0$ et $\varphi = \varphi_0$ si $t \geq t_0$) au fil chauffant et on relève l'évolution de la température $T_s(t)$ de ce fil. Pendant le temps où la perturbation n'a pas atteint les autres faces des échantillons, c'est-à-dire où l'hypothèse du milieu semi-infini est valide, on peut considérer que le transfert au centre de l'échantillon autour du fil est radial. La modélisation de ce transfert de chaleur permet de calculer l'évolution de la température au centre de l'échantillon. On applique une méthode d'estimation de paramètres pour calculer les valeurs de la conductivité thermique λ [67].

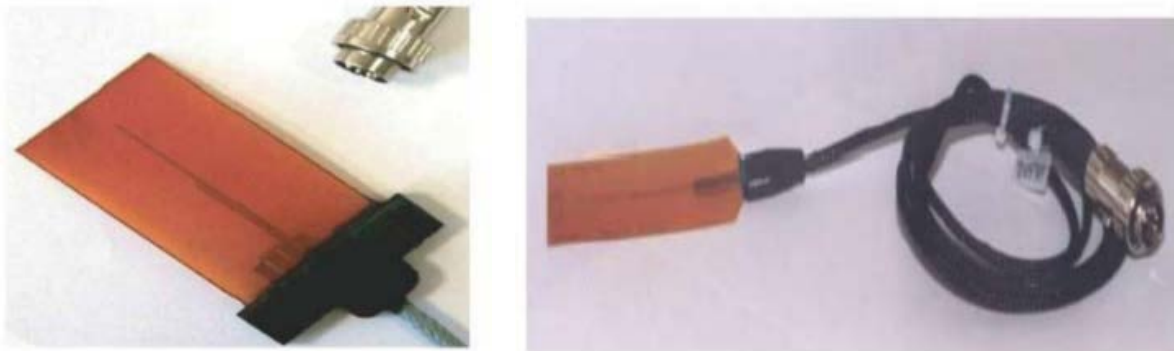


Photo II.9 : Vue d'une sonde de type fil chaud.

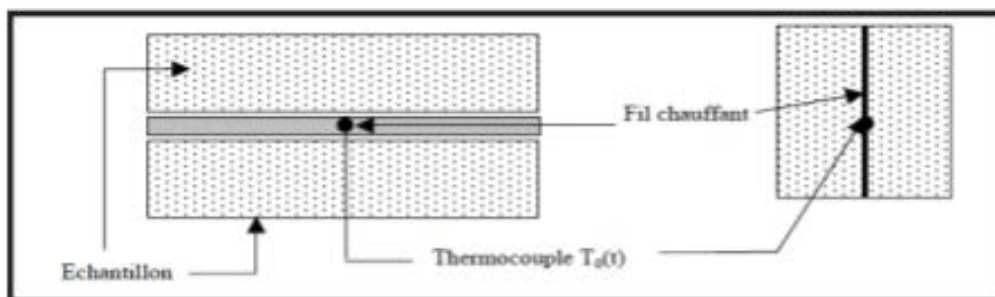


Figure II.7 : Schéma du montage de la méthode du fil chaud [67].

Afin de protéger les échantillons contre les échanges de températures avec l'extérieur pouvant perturber les mesures expérimentales, on a conçu un dispositif de serrage permettant d'assurer

un bon contact sonde/échantillon, tout en isolant les facettes de l'échantillon du milieu extérieur avec des plaques en polystyrène expansé.

L'essai consiste à délivrer un flux de chaleur dans la sonde (fil chaud) de dimensions $(40 \times 60) \text{ mm}^2$ disposé en sandwich entre deux échantillons identiques de mêmes dimensions $(40 \times 40 \times 80) \text{ mm}^3$ serrés dans le dispositif comme il est indiqué dans la photo II.9. On obtient par la suite les graphes des températures expérimentales enregistrées à chaque seconde.

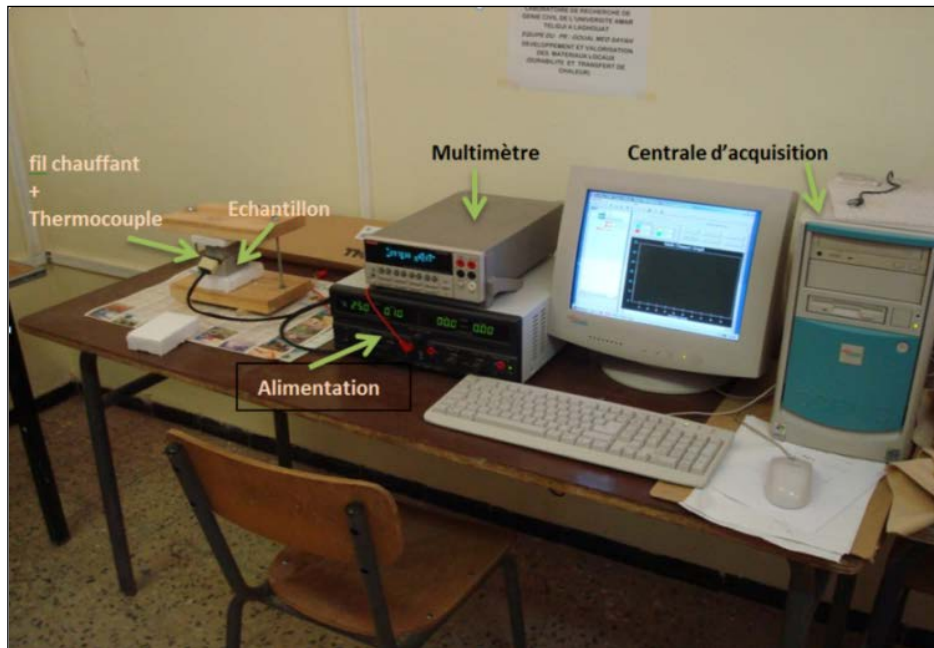


Photo II.10 : Montage expérimental pour la mesure de la conductivité thermique

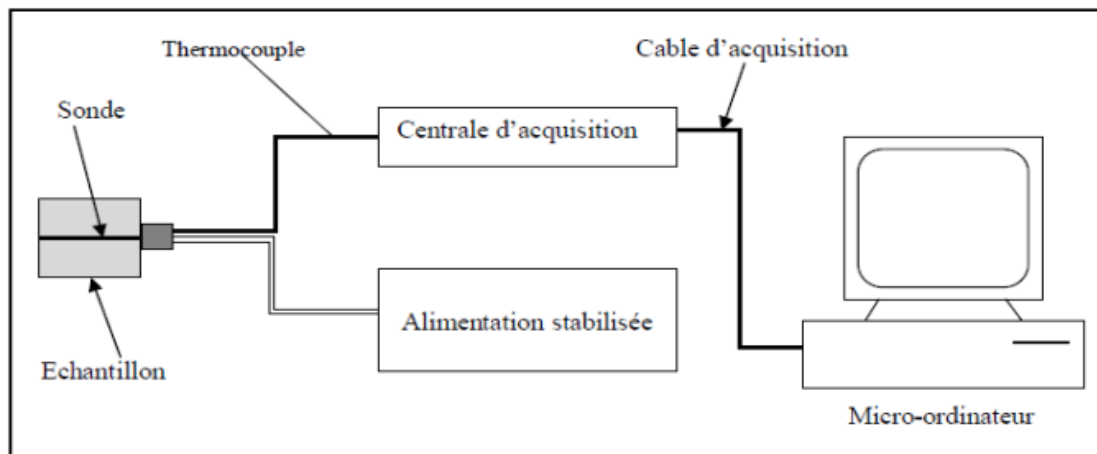


Figure II.8: Schéma du montage expérimental [56].

L'essai a été réalisé au niveau du laboratoire de recherche de génie civil de l'université Amar Telidji de Laghouat.

Le thermocouple de la sonde est reliée à une centrale d'acquisition de type « Keithley-2700 Multimeter », qui permet de suivre l'évolution de la température en fonction du temps dans la

sonde. Les mesures sont ensuite communiquées à travers un câble d'acquisition au microordinateur via une carte d'interface. La compensation de la jonction froide du thermocouple se fait automatiquement à l'aide d'un microprocesseur intégré dans la centrale d'acquisition. La puissance électrique φ_0 dissipé dans l'élément chauffant est déterminée connaissant l'intensité de courant $I(A)$ le traversant qui peut être lue à travers une alimentation stabilisée type « ElektroAutomatik », et la différence de potentiel entre ses extrémités $U(V)$ soit:

$$\varphi_0 = U.I \quad Eq(II.10)$$

Etant donné que l'on cherche simplement à estimer le temps pendant lequel le milieu reste semi-infini, La modélisation du système fil chaud [6] permet d'écrire l'équation suivante:

$$Ts(t) - Ts(0) \approx \frac{\varphi_0}{4\pi\lambda L} \ln(t) + \varphi_0 \left[R_c - \frac{\ln\left(\frac{r_0}{\sqrt{a}}\right)}{2\pi\lambda L} + \frac{\gamma}{4\pi\lambda L} \right] \quad Eq(II.11)$$

R_c : Résistance de contact à l'interface résistance chauffante / échantillon.

λ : Conductivité thermique de l'échantillon.

a : Diffusivité thermique de l'échantillon.

r_0 : Rayon du fil chauffant.

L : Longueur du fil chauffant (égal à 6cm dans notre cas).

φ_0 : Puissance dissipée dans la résistance chauffante L'inertie de la sonde et la résistance de contact n'influent pas sur la température aux temps longs.

Le tracé de $T_0(t) - T_0(t=0)$ en fonction de $\ln(t)$ est une droite de pente $\frac{\varphi_0}{4\pi\lambda L}$ dont la détermination permet de calculer la conductivité thermique λ . L'inertie de la sonde et la résistance de contact n'influent pas sur la température aux temps longs. Pour appliquer cette méthode d'estimation, il faut s'assurer que l'hypothèse du milieu semi-infini reste valable sur l'intervalle d'estimation choisi. Les bruits de mesure sur les valeurs des températures aux différents temps de mesure étant constants et non corrélés, on utilise la méthode des moindres carrés linéaires pour estimer la pente ce qui nous permet de déduire la conductivité thermique λ ($W.m^{-1}.K^{-1}$) [67].

II.3.8 / Essai hydro-thermique

Cet essai a pour but de déterminer la conductivité thermique des bétons élaborés à différents degrés de saturation S_r et des températures T choisis préalablement à l'aide d'une enceinte climatique qui nous permet de choisir la température et l'humidité désirées. Les mesures ont été effectuées entre l'état sec et l'état de saturation passant par des valeurs intermédiaires afin de déterminer la variation de la valeur de la conductivité thermique en fonction de S_r , où S_r est le taux de saturation en eau.

Cette essai est un peu délicat et prend beaucoup de temps, pour ces raisons nous avons choisi par trois valeurs intermédiaires de différents degrés de saturation.

Maintenant dans cette partie a été consacrée à la détermination des paramètres de transfert de chaleur dans le béton cellulaire en mettant en évidence le phénomène de transfert couplé masse-chaleur. Pour des raisons d'ordre pratique, on a choisi d'étudier l'évolution des paramètres thermiques en fonction de la température à des taux de saturation en eau donnés. Cette approche est plus simple que de faire varier dynamiquement la teneur en eau dans l'échantillon en cours d'essai. Les mesures ont été effectuées entre l'état de saturation et l'état sec du matériau à des températures 5°C, 25°C et 50°C. Ce choix a été motivé par le souci de se placer dans des conditions proches des conditions réelles de fonctionnement du matériau en œuvre. Les teneurs en eau successives ont été obtenues en saturant d'abord les échantillons en les mettant dans de l'eau distillée à $T = 20 \pm 1^\circ\text{C}$ jusqu'à saturation maximale, puis en les désaturant progressivement par séchage au four à micro-ondes. Cette technique, d'après Harton & Wierenga (1982) permet d'obtenir une répartition aussi uniforme que possible de l'eau dans les échantillons. Une fois la teneur en eau souhaitée est atteinte, on pèse l'échantillon pour déterminer sa teneur en eau avec précision, puis on procède à son emballage dans un film plastique thermorétractable. Cette procédure permet de maintenir l'humidité dans l'échantillon constante pendant toute la durée du cycle de mesures à différentes températures.

En ce qui concerne le choix des températures, on dispose d'une enceinte climatique de type CONTROLS, celle-ci nous permet d'explorer la gamme de températures sélectionnées. Pour les mesures des paramètres thermiques, nous avons utilisé, suivant les cas :

- La méthode de fil chaud pour déterminer la conductivité thermique apparente dans des conditions hygrothermiques variables (de l'état sec jusqu'à la saturation maximale) pour les températures $T = 5, 25$ et 50°C respectivement.

La figure II.9. De l'organigramme ci-dessous montre le déroulement de ces essais hydro-thermique.

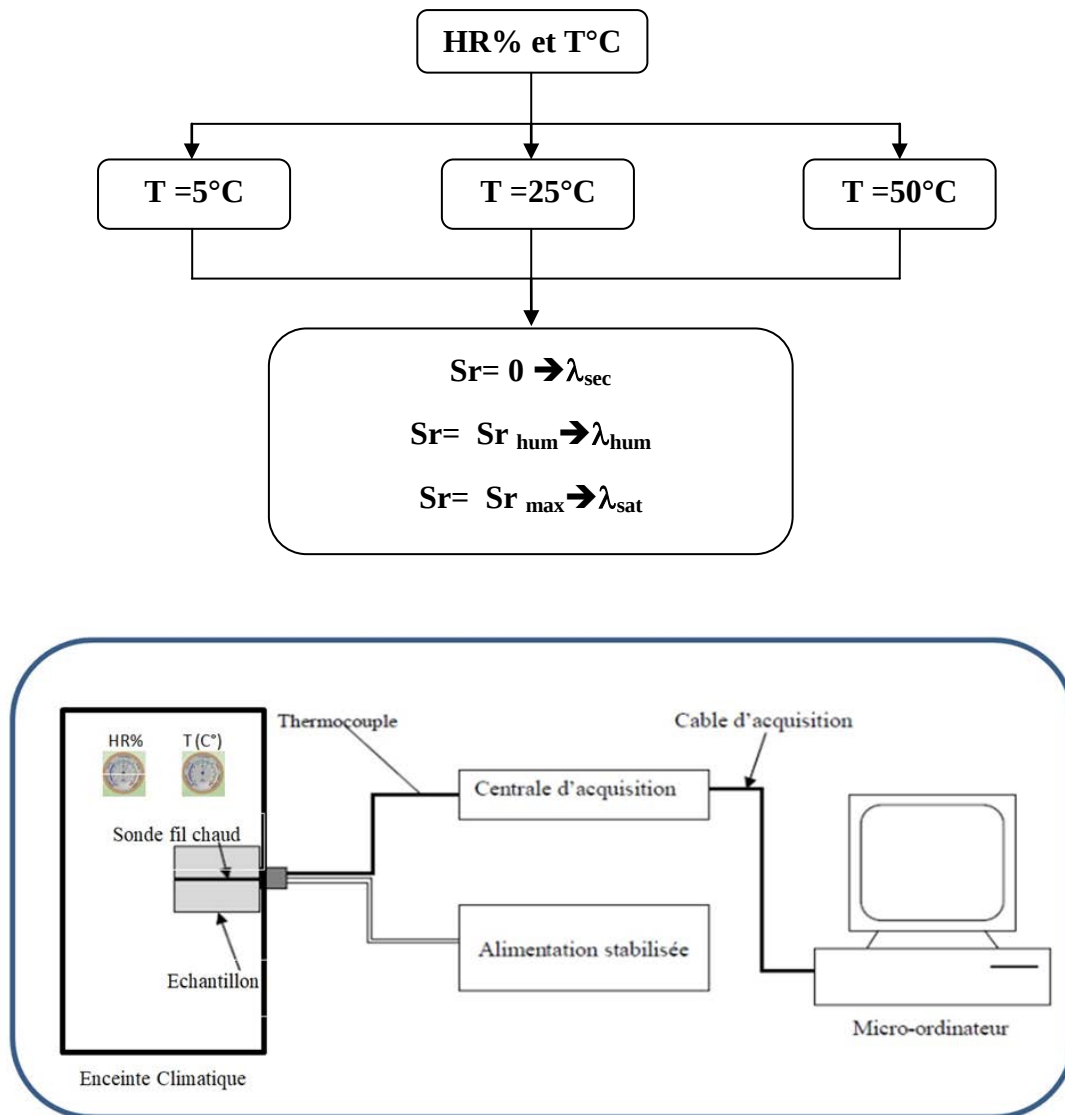


Figure II.9 : Organigramme et schéma du montage expérimental pour les mesures de l'essai hydro-thermique

II.3.8 .1/ Mode opératoire des essais hydro-thermique

- Mesure de la conductivité thermique à l'état sec pour les différentes températures (5°C, 25°C et 50°C).
- Saturation des échantillons.
- Hermétisation des échantillons par plastification.
- Choix de température par ordre décroissants 50°C, 25°C et 5°C pour le même d'degree de saturation.

- L'aide des mesures de l'état sec et l'état saturé nous avons choisi trois paliers intermédiaires. A l'aide d'un micro-onde jusqu'à avoir la masse désirée.
- Mesure de la conductivité thermique pour le degré saturation mesuré.
- En répète cette opération pour l'ensemble de reste des échantillons.

II.4 / Mode opératoire et préparation des éprouvettes d'essais

II.4.1 / Dosage en constituants des mortiers élaborés

La composition du mélange (sable calcaire, ciment, chaux, eau et fines) à une importance prépondérante sur les caractéristiques physiques, mécaniques et thermiques du béton cellulaire à base de sable calcaire. La littérature montre que plusieurs études ont été effectuées pour déterminer la composition optimale du mélange sec afin de mettre en évidence le dosage en constituants [69]. La composition du mélange des matériaux secs a été choisi en se basant sur la composition optimale du mélange sec liant-sable qui a été déterminée à partir des résultats de Syndicat National du béton cellulaire et les recommandation de commission des bétons légers [64] et [70].

Les pourcentages massiques en sable calcaire (Sc) et en ciment (C) sont :

$$\frac{Sc}{Sc + C} = 65\% \quad , \quad \frac{C}{Sc + C} = 35\%$$

Par contre, la quantité des fines calcaires et le dosage en eau ont été déterminés sur la base des deux considérations suivantes :

1-Resistance mécanique suffisante : La quantité d'eau employée permet d'obtenir des résistances mécaniques conformes aux recommandations exigées pour un béton léger.

2-Facilité de mise en moule : Nous avons opté pour une mise en moule par coulage sans vibration afin d'éviter l'expulsion des bulles d'air produit l'hors de la réaction du mortier avec la poudre d'aluminium [56].

Donc le dosage en constituant optimal a été déterminé à la base de deux paramètres essentiels :

- Le rapport E/C .
- La quantité des fillers calcaire (fc) par rapport au sable calcaire (Sc).

D'après les travaux [71] qui ont travaillé sur le même type de sable calcaire ; On remarque d'après la figure II.10 à 9% de dosage en fines ce mélange acquiert une résistance à la compression simple maximale de l'ordre de 25,50 MPa correspondant à un gain de 34% par rapport au témoin ($fc=0\%$).

Au-delà de 9% de fine calcaire, les résistances à la compression simple à 28 jours des mélanges baissent considérablement par rapport à celles de l'optimum.

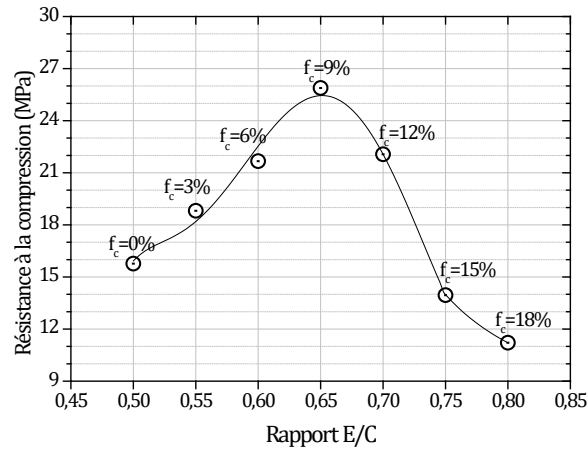


Figure II.10: Variation des résistances à la compression optimums à 28 jours en fonction de consistance E/C pour le différent dosage en fines calcaires élaborées [71].

II.4.2 / Procédure de malaxage

- ✓ Le mélange sable, fines, ciment et chaux est malaxée à sec pendant deux minutes à vitesse lente à l'aide d'un malaxeur à mortier normalisé.
- ✓ L'eau de gâchage est graduellement versée dans le mélange, sans interrompre le malaxage. La durée de malaxage en phase humide est fixée à quatre minutes: deux minutes de malaxage à vitesse lente, puis un arrêt pour racler les parois et surtout le fond de la cuvette pour homogénéiser le mélange. On reprend ensuite le malaxage pendant deux minutes à vitesse rapide.
- ✓ On arrête une deuxième fois le malaxage pour pouvoir ajouter la poudre d'aluminium.
- ✓ Puis on redémarre le malaxage pendant une minute à vitesse lente suivie d'une minute à vitesse rapide [78]

II.4.3 / Mode de conservation

- ✓ Les conditions de température et d'humidité dans lesquels les travaux ont été menés variaient entre 20 ± 3 °C pour la température et de $85 \pm 3\%$ pour l'humidité relative (HR).
- ✓ Le milieu de conservation des éprouvettes qu'on a adopté dans l'étude des compositions à optimiser est le milieu standard, qui est l'eau à une température de 21 ± 3 °C.
- ✓ Pour les bétons cellulaires, les moules une fois remplis, sont conservées dans l'ambiance du laboratoire ($T=21\pm3^{\circ}\text{C}$, $\text{HR}=85 \pm 3\%$). Après 24 heures et avant le démoulage, on arase la partie expansée du béton.
- ✓ Après démoulage, les éprouvettes sont conservées à l'intérieur d'une chambre humide ($T=20\pm2^{\circ}\text{C}$ et $\text{HR}=90\pm5\%$) pendant 28 jours jusqu'à maturation.

Chapitre III

Résultats et Discussion Expérimentaux

III.1/ Introduction

Malheureusement, plus de 20% des sables fabriqués sont impropres à l'utilisation comme sable de construction du fait d'une teneur en fines supérieure à 12%. De même, les fillers calcaires, qui résultent aussi du processus de concassage et de broyage des roches calcaires, sont considérés comme des résidus inutilisables et donc inexploités. Dans cette étude expérimentale, on présentera les caractéristiques physicomécaniques des matériaux utilisés pour la confection des mortiers et bétons cellulaires ainsi que l'influence de l'utilisation des fines calcaires sur les propriétés physiques et les performances mécaniques et thermiques des mortiers et bétons cellulaires aussi bien à l'état frais qu'à l'état durci, la structure cellulaire est obtenue par réaction chimique avec l'aluminium pulvérulent. L'amélioration mènera à la valorisation des sables calcaires concassés et à la préservation de l'environnement par une optimisation de l'utilisation des stations de concassage [68].

Nous présenterons dans cette partie les résultats expérimentaux des différentes techniques employées.

L'analyse des résultats expérimentaux est également abordée en tenant compte de l'influence de la structure poreuse en particulier l'influence de la macroporosité sur les paramètres de transfert thermique.

Cette partie présente une étude des propriétés physiques et mécaniques du béton élaboré et se concentre sur l'étude du comportement hydro-thermique du béton cellulaire élaborés pour les températures 5°C, 25°C et 50°C pour des degrés de saturation passant de l'état sec jusqu'à la quasi-totalité de saturation passant par trois valeurs intermédiaires pour présenter les valeurs de la conductivité thermique à l'état humide.

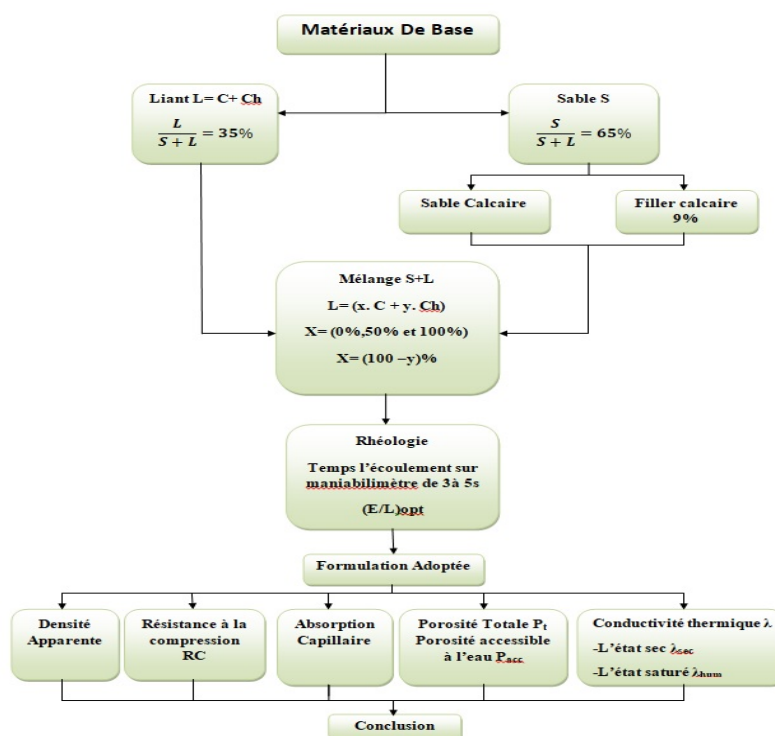


Figure III.1 : Organigramme de programme expérimental.

III.2/ Etude rhéologique

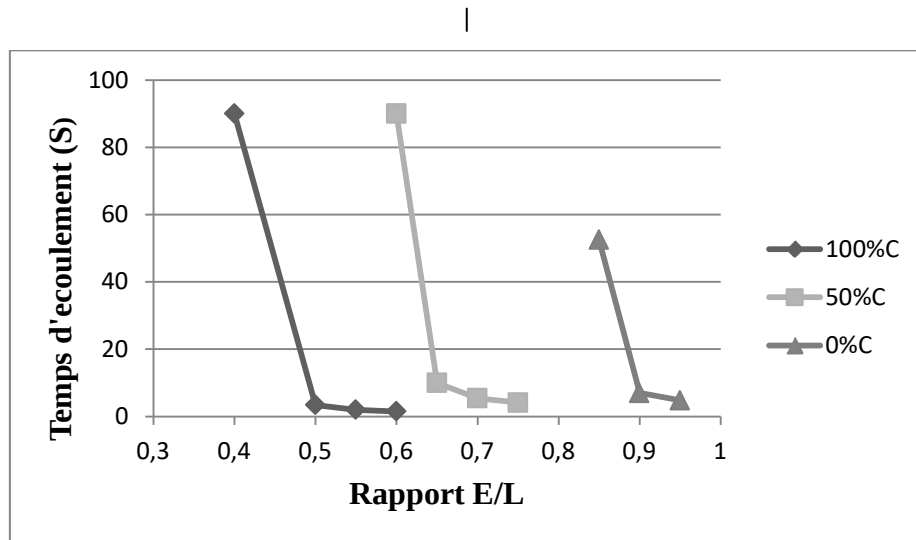
La quantité d'eau a été déterminée sur la base des essais rhéologiques sur la pâte (ciment, chaux, sable calcaire, filler calcaire) pour des rapports E/L qui varient de (0,4 à 1) avec un pas de 5% par rapport à la masse du liant. En premier lieu, l'étude de l'écoulement a été réalisée par un maniabilimètre de type B (photo II.5).

Afin d'étudier l'influence de la chaux sur le comportement rhéologique, mécanique et thermique et par la suite physique trois pourcentages de ciment avec la chaux éteinte par rapport à la masse de liant ont été choisis. Ces pourcentages sont 0,50 et 100%.

Tableau III.1 : Composition en pourcentage massique des différents mélanges.

Composition	Sable calcaire (Sable + filler)%	Liant =chaux+ ciment L= (Ch + C)%	L =Ch + C		Intervalle E/L
			Ciment (c) C/L	Chaux (ch) Ch/L	
A (100%C)	65	35	100	0	0,4-0,60
B (50%C + 50%Ch)	65	35	50	50	0,6-0,75
C (0%C)	65	35	0	100	0,85-0,95

L'étude de l'écoulement a été réalisée par l'essai de la consistance des mortiers (chap. II). Le principe de cet essai consiste à déterminer le temps d'écoulement de la pâte de ciment, chaux et sable sous une fréquence de vibration de maniabilimètre B. L'essai est réalisé pour les différents dosages en eau. Les résultats de cet essai sont représentés sur la figure III.2



La figure III.2 : la variation de rapport E/L en fonction pourcentage de ciment.

Nous avons remarqué que le rapport E/L qui permet d'obtenir des éprouvettes sans fissure superficielles avec une mise en moule facile et pratique sans vibration correspond à un temps d'écoulement compris entre 3 et 5 secondes. Donc nous avons retenu cette plage de temps d'écoulement pour les mélanges élaborés qui ont un temps d'écoulement inférieur à 3s ou

supérieur à 5s donnent respectivement des pâtes assez fluides ou assez fermées. Cela nécessite une mise en moule sans vibration pour les pâtes fermes ce qui est déconseillé dans l'élaboration des bétons cellulaire à des bétons des résistances médiocres inférieures à la valeur recommandées pour les bétons légers.

III.3/ la Masse volumique apparente (densité)

La variation de la masse volumique apparente ou la densité en fonction de l'agent expansive et en fonction du dosage en liant sont montrées dans la figure III.3 et la figure III.4 respectivement.

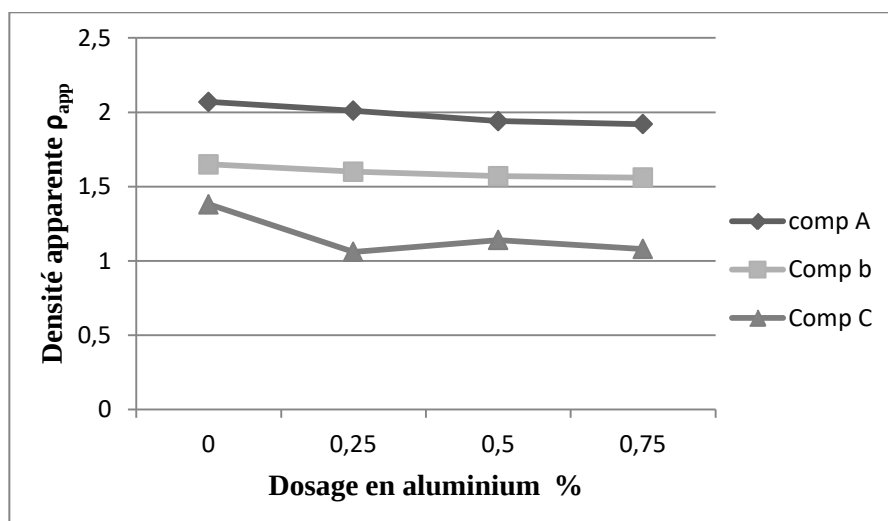


Figure III.3 : La variation de la masse volumique apparente en fonction du dosage en aluminium.

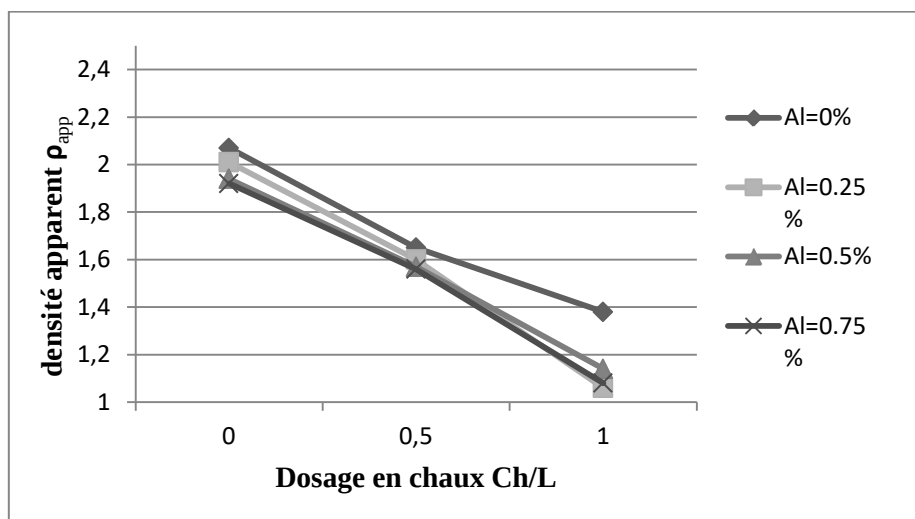


Figure III.4 : La variation de la masse volumique apparente en fonction du rapport Ch/L.

La figure III.3 permet de constater que la masse volumique apparente du matériau diminue lorsque le pourcentage en aluminium augmente et que les vides créés par l'hydrogène libéré par la réaction de l'aluminium apportent bien un allègement au matériau.

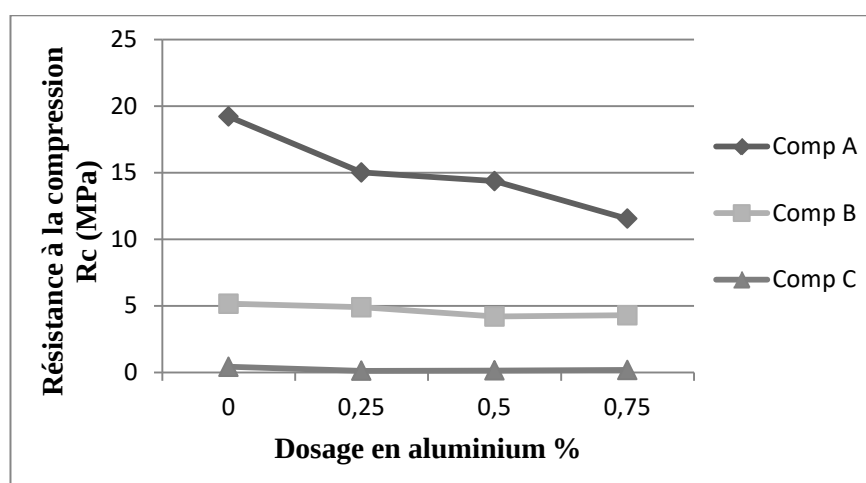
Dans la figure III.4 qui représente la variation de la densité apparente en fonction de dosage en liant pour les différents élaborés, nous remarquons que l'allure des courbes sont semblable, cette ressemblance due au dosage en chaux qui joue un rôle important sur la diminution de la densité apparente [3],[4].

III.4/ Résistance à la compression

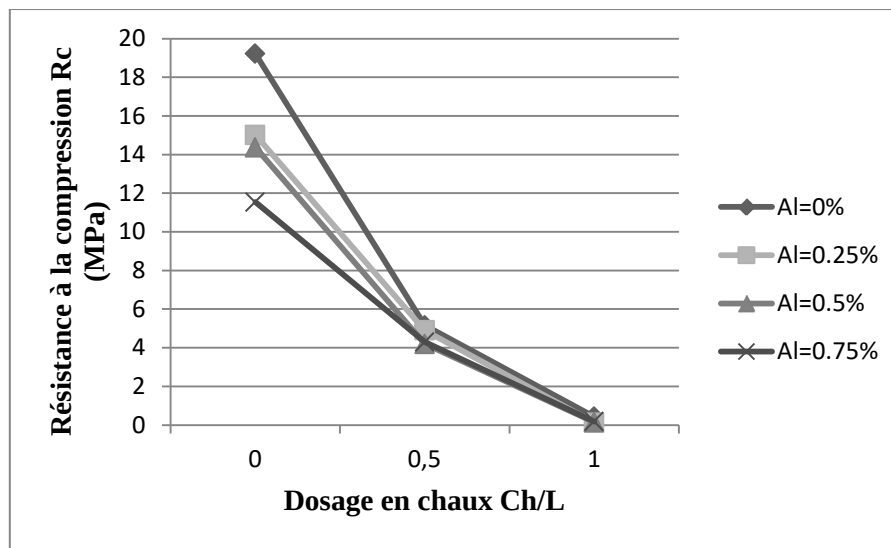
Les résultats de la résistance à la compression des différentes compositions à l'âge à 28 jours sont représentés dans le tableau III.2 la variation de la résistance à la compression en fonction de dosage en aluminium.

Tableau III.2 : la variation de la résistance à la compression R_c (MPa) en fonction de dosage en aluminium.

Dosage en Al (%)	<i>Comp A</i>	<i>Comp B</i>	<i>Comp C</i>
0	19,22	5,16	0,43
0,25	15,02	4,90	0,12
0,50	14,37	4,20	0,15
0,75	11,54	4,30	0,18



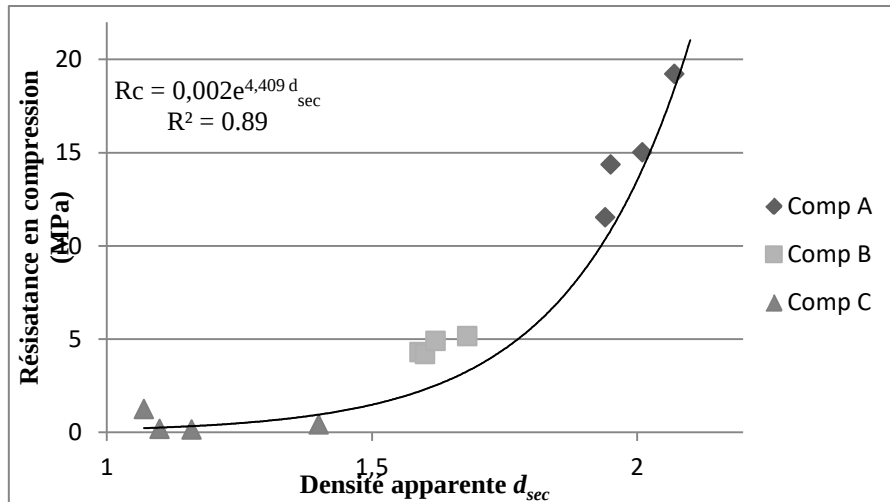
La figure III.5 : la variation de la résistance à la compression en fonction de dosage en aluminium.



La figure III.6 : la variation de la résistance à la compression en fonction de dosage en chaux.

Les résultats de la figure III.5 et la figure III.6 révèlent que la résistance à la compression diminue significativement en fonction du dosage de la chaux et de la poudre d'aluminium, ceci est une conséquence de la déduction de densité par l'augmentation de la porosité dans la matrice, [72], pour le même pourcentage d'aluminium, la résistance à la compression diminue de plus de 76% lorsque le dosage de chaux (Ch/L) varie de 0 à 100% et 95% lorsque le dosage d'aluminium dépasse 0,25%, nous avons constaté aussi qu'un pourcentage en aluminium supérieur à 0,25% est pratiquement inconcevable puisqu'il conduit à une chute de la résistance accompagné d'un phénomène d'effritement du béton cellulaire.

On remarque aussi que tous les compositions C forte dosage en chaux possédait une très faible résistance à la compression (inférieur à 1 MPa) et ceci quel que soit le dosage en aluminium.

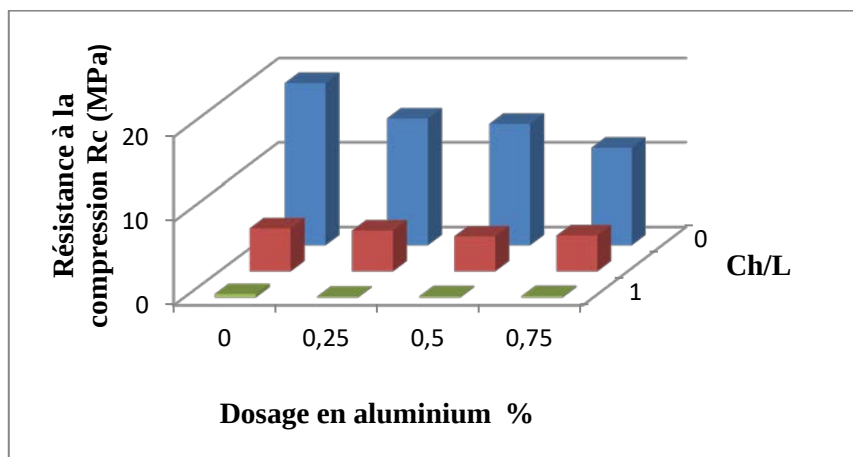


La figure III.7 : Evolution de la résistance à la compression en fonction de la densité apparente pour les différents mélanges.

Le résultat expérimental de la figure III.7 confirme une relation évidente entre la densité et la résistance mécanique, plus matériau est dense plus sa résistance mécanique est élevée, la résistance mécanique en compression varie de 0,15 MPa à 19,22 MPa pour des densités allant de 1,07 à 2,07 selon son teneur en aluminium et en chaux.

Une relation entre la résistance mécanique et la densité sèche des différentes compositions élaborées a été établie et tracée sur la figure III.7, un modèle théorique reliant la résistance mécanique à la résistance mécanique a été proposé afin de prédire la résistance mécanique de matériaux élaborés en utilisant l'équation suivante :

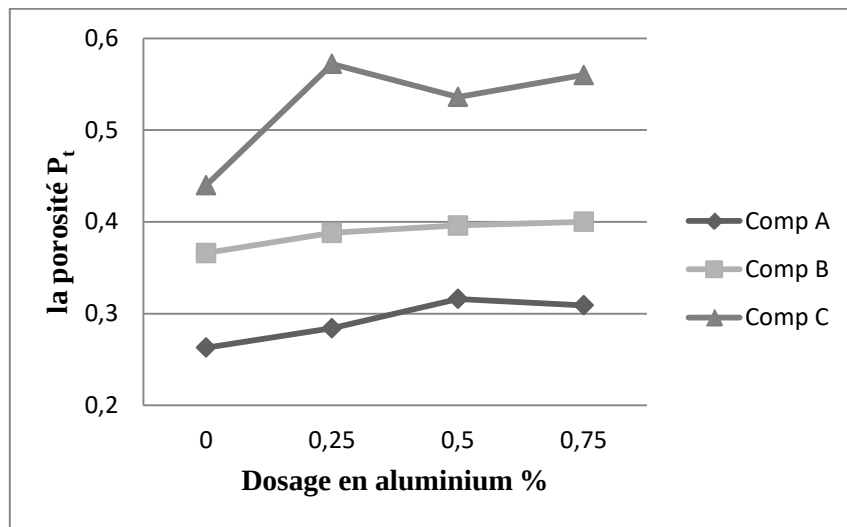
$$R_c = 2 \cdot 10^{-3} e^{4,409 \rho_{app}} \quad \text{Eq (III.1)}$$



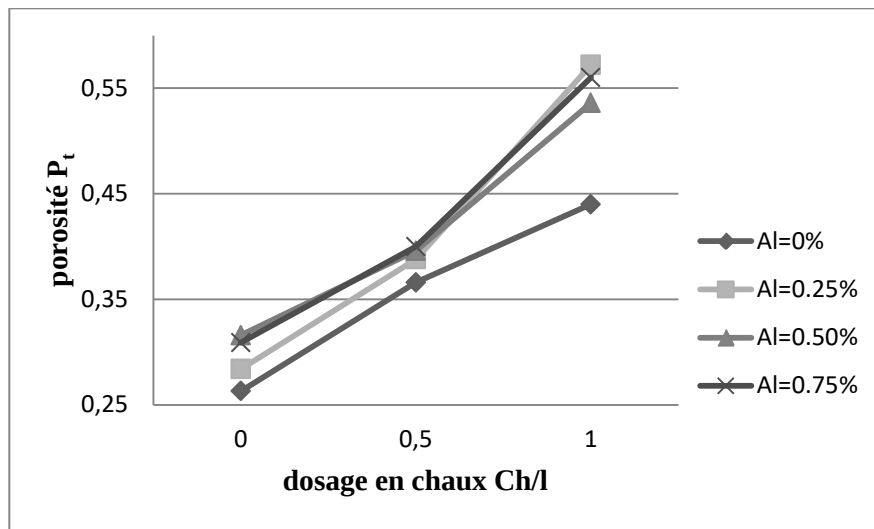
La figure III.8 : Evolution de la résistance à la compression en fonction du dosage en aluminium et de rapport de liant (Chaux-Ciment) pour les différents mélanges élaborés.

L'histogramme de la figure III.9 qui résume l'effet de l'augmentation du taux de la chaux et dosage en aluminium qui influe négativement sur la résistance mécanique, les barres de composition A (0% chaux) et B(50% chaux) restent bien dans les normes exigées pour un béton léger de la **RILEM**, **ACI 213R87** et (**NARAYANAN,N et al,2000**) contrairement aux barres des composition C (100% chaux) qui ne répondent pas aux exigences en vigueur des bétons légers [73], [64] et [66].

III.5/ La porosité

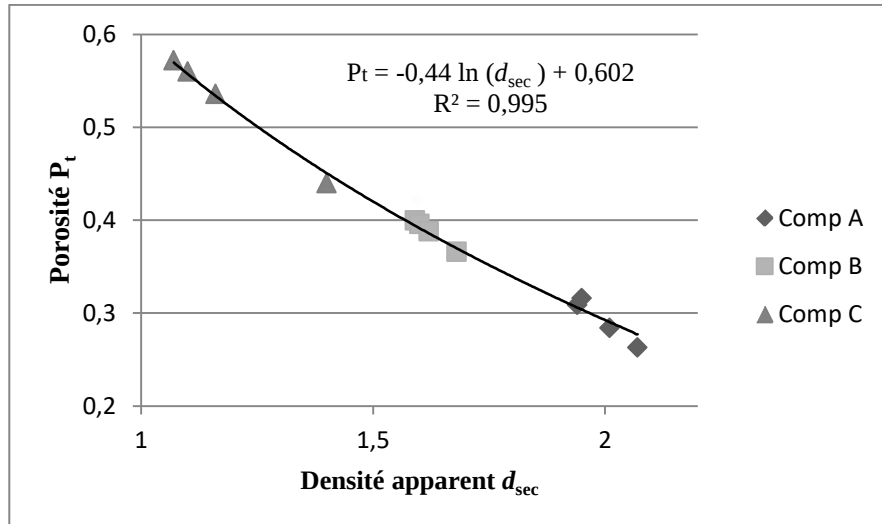


La figure III.9 : Evolution de la porosité en fonction du dosage en aluminium.



La figure III.10 : Evolution de la porosité en fonction du dosage en aluminium.

Les résultats expérimentaux de la figure III.9 et la figure III.10 ci-dessous donnant la variation de la porosité des différentes compositions en fonction de dosage en aluminium et dosage en liant Ch/L. Ces résultats montrent que la P_t augmente avec le pourcentage de chaux dans le liant ainsi qu'avec la teneur en aluminium, et ce en raison de l'augmentation de la porosité introduite, l'augmentation de la porosité en fonction du pourcentage de chaux dans le liant et plus marqué pour les compositions sans aluminium et diminue graduellement avec l'augmentation de la teneur en aluminium dans le mélange.



La figure III.11 : Evolution de la porosité en fonction de la densité apparent pour les différents mélanges.

Le résultat expérimental de la figure III.11 confirme une relation évidente entre la densité et la résistance mécanique, plus le matériau est dense moins sa porosité, la porosité varie de 0,263 à 0,572 pour des densités allant de 1,07 à 2,07 selon teneur en aluminium et en chaux.

Une relation entre la porosité et la densité des différentes compositions élaborées a été établie et tracée sur la figure III.11, un modèle théorique reliant la résistance mécanique de matériaux élaborés en utilisant l'équation suivante :

$$P_t = -0.44 \ln(d_{sec}) + 0.602 \quad \text{Eq (III.2)}$$

III.6/ Modélisation de la résistance à la compression

Nous avons essayé de tirer des relations mathématiques reliant la résistance mécanique à la porosité du matériau en utilisant les modèles communément utilisés [73]... [75]. Il s'agit des modèles de *Bal'Shin* ; *Ryshkewitch* ; *Schiller* et *Hasselmann* dont les expressions mathématiques sont données par :

- **Modèle de Bal'shin :** $R_c = R_{c_0} (1 - P_t)^\alpha$ Eq (III.3)

- **Modèle de Ryshkewitch :** $R_c = R_{c_0} \cdot e^{-\beta \cdot P_t}$ Eq (III.4)

- **Modèle de Schiller :** $R_c = \gamma \ln \left(\frac{P_{cr}}{P_t} \right)$ Eq (III.5)

- **Modèle Hasselmann :** $R_c = b - a \cdot P_t$ Eq (III.6)

Où a , b , α , β et γ sont les coefficients des modèles, R_{c_0} est la résistance en compression à porosité nulle et P_{cr} est la porosité critique correspondant à une résistance nulle.

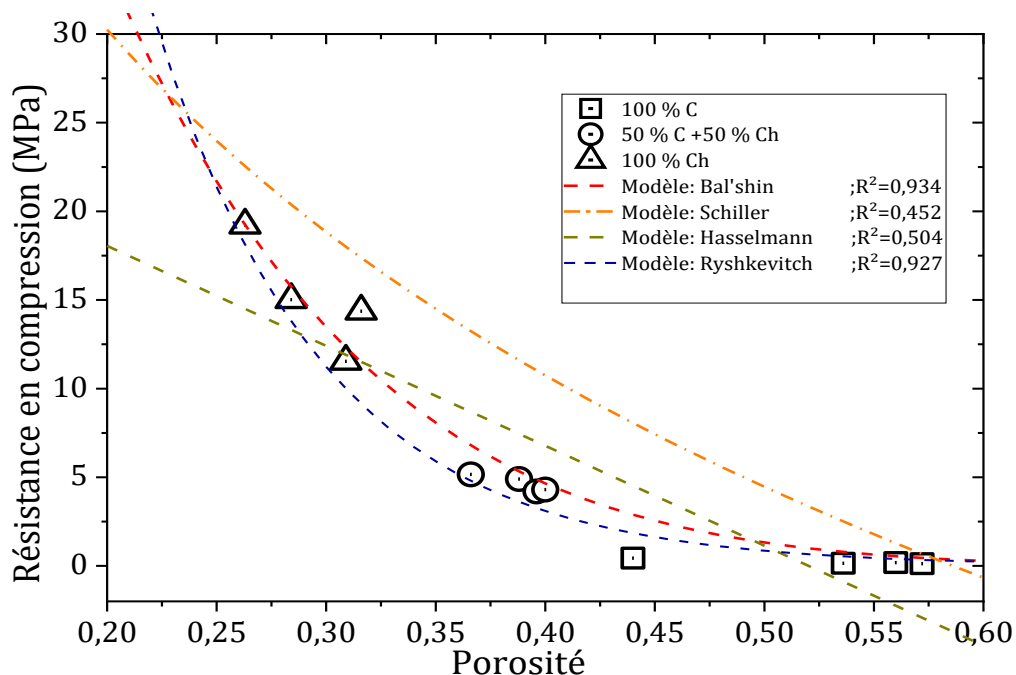
Le tableau III. 3 regroupe les valeurs des coefficients des différents modèles calculés par régression sur la courbe expérimentale $R_c = f(P_t)$.

La figure III.13 représente les valeurs expérimentales et théoriques de la résistance mécanique en compression à 28 jours en fonction de la porosité totale P_t . Certaines de ces modèles ne sont plus valables dans notre cas tel que le modèle *Schiller* et de *Hasselmann* contrairement aux modèles *Ryshkewitch* et de *Bal'shin* qui donnent cependant des résultats relativement corrects dans la plage de porosité habituellement quantifiée [74], [76] ... [78].

Malgré la diversité des mélanges élaborés de points de vue teneur en agent expansif, le dosage en liant (ciment, chaux) et la quantité de l'eau de gâchage peuvent trouver leurs explications que ces résultats expérimentaux confirment une relation tout à fait évidente entre la densité et la résistance mécanique [73] Plus le matériau est dense plus sa résistance mécanique est élevée. La résistance mécanique en compression varie de 0,125 MPa à 19,22 MPa pour des porosités allant de 0,572 à 0,263. Donc, une perte considérable en résistance mécanique est enregistrée dans l'intervalle de porosités balayées. Ceci est dû à l'affaiblissement des liaisons inter granulaires en fonction de la teneur chaux et aluminium. Ceci a été bien confirmé par les histogrammes de La figure III.8.

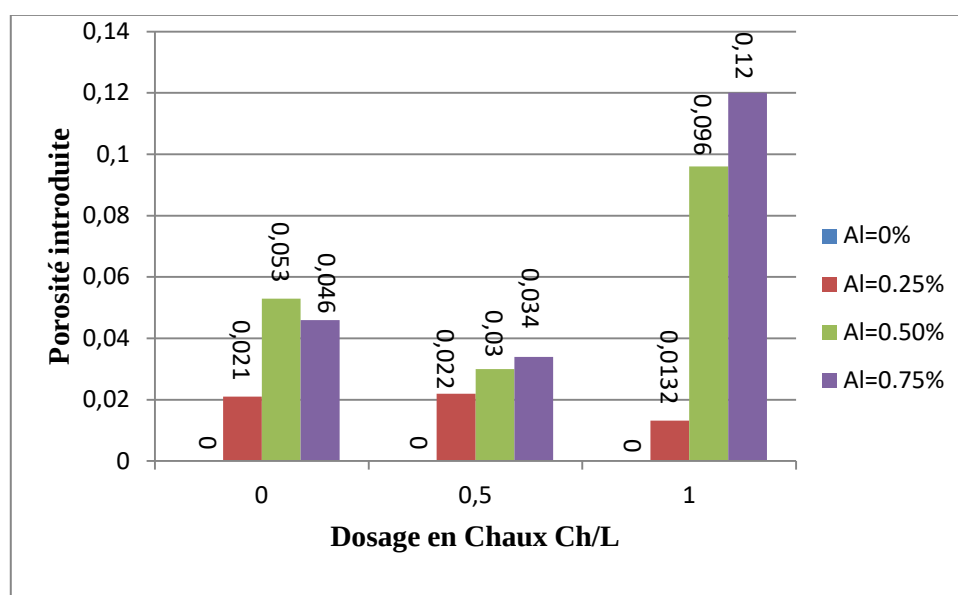
Tableau III.3 : les résultats des modélisations reliant la résistance à la compression et la porosité.

Modèle	Coefficient calculés							Coefficient de corrélation	R ²
	R _{c0}	α	β	γ	a	b	ϵ		
Bal'Shin	157,84	6,91	----	----	----	----	----	0,966	0,934
Ryshkewitch	535,2	----	12,88	----	----	----	----	0,963	0,927
Schiller	----	----	----	28,136	----	----	0,586	0,672	0,452
Hasselmann	----	----	----	----	-56,361	29,319	----	0,710	0,504



La figure III.12 : Résistance en compression à 28 jours en fonction de la porosité totale valeurs expérimentales et modèles théoriques.

III.7/ Porosité introduite



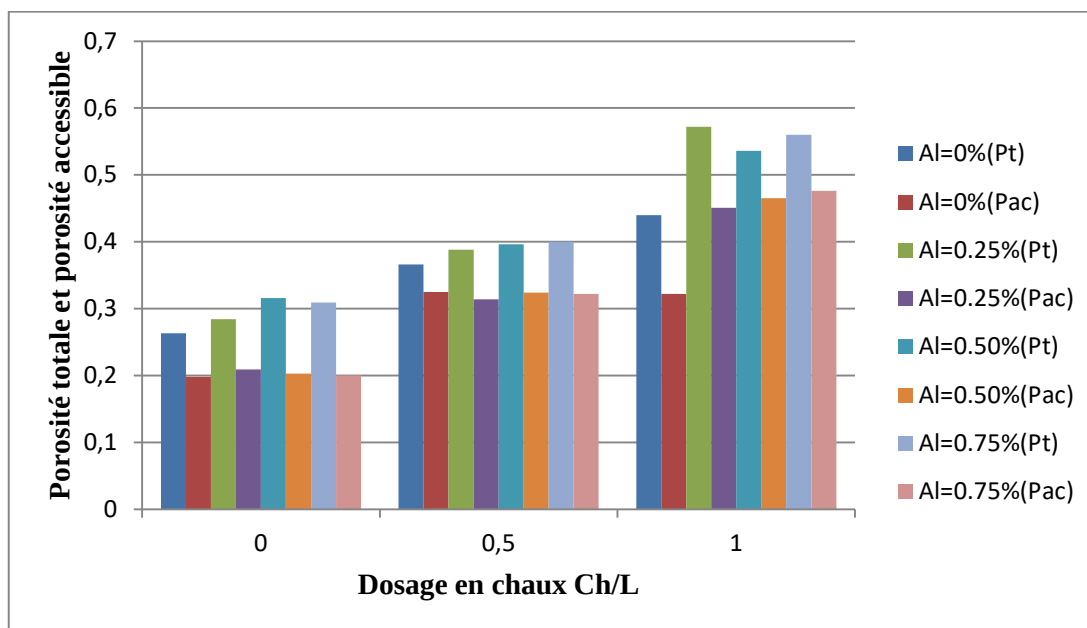
La figure III.13 : Evolution de la porosité introduite en fonction du dosage en chaux.

Les résultats expérimentaux de la figure III.13 donnée la variation de la porosité introduite en fonction du dosage en chaux. Ces résultats montrent que la porosité introduite augmente avec le pourcentage de chaux dans le liant ainsi qu'avec la teneur en aluminium.

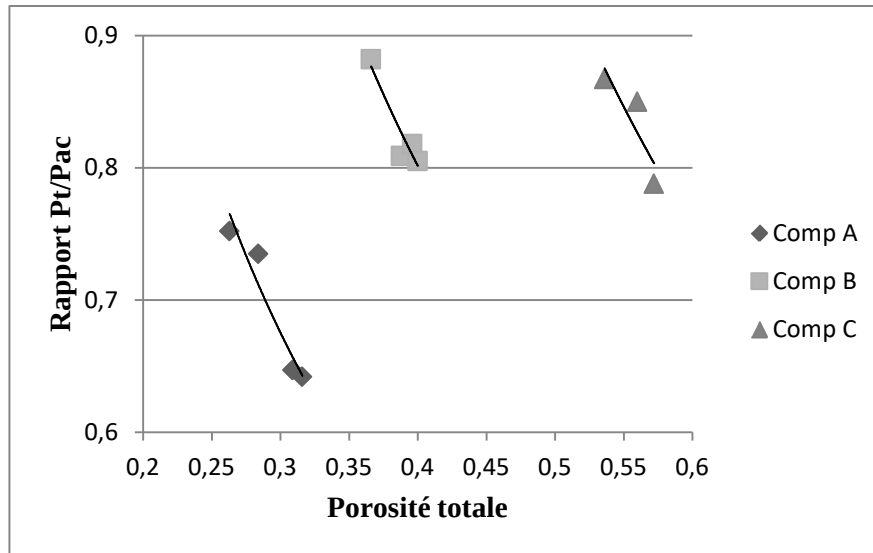
III.8/ Influence de la porosité accessible sur les bétons élaborées

La porosité accessible et totale dans un matériau cimentaire est le premier indicateur de la durabilité, elle est le siège de transfert d'humidité dans le matériau et le chemin de diffusion des agents agressifs ; plus cette porosité est importante, plus la pénétration d'agents agressifs est facilitée surtout pour les bétons à forte porosité comme le cas des bétons cellulaire, et plus la durabilité du matériau est affectée, cependant, l'identification de la porosité ouvert ou accessible dans un matériau est plus indispensable pour l'étude de sa durabilité que la porosité totale.

Dans la figure III.14 qui présente la variation de la porosité totale et la porosité accessible par l'eau en fonction du dosage en liant (Ch/L), ils remarquent dans la majorité des cas étudiées que la porosité totale et la porosité accessible augmentent avec le pourcentage de chaux dans le liant ainsi qu'avec la teneur en aluminium.



La figure III.14 : Evolution de la porosité totale et la porosité accessible en fonction du dosage en chaux.

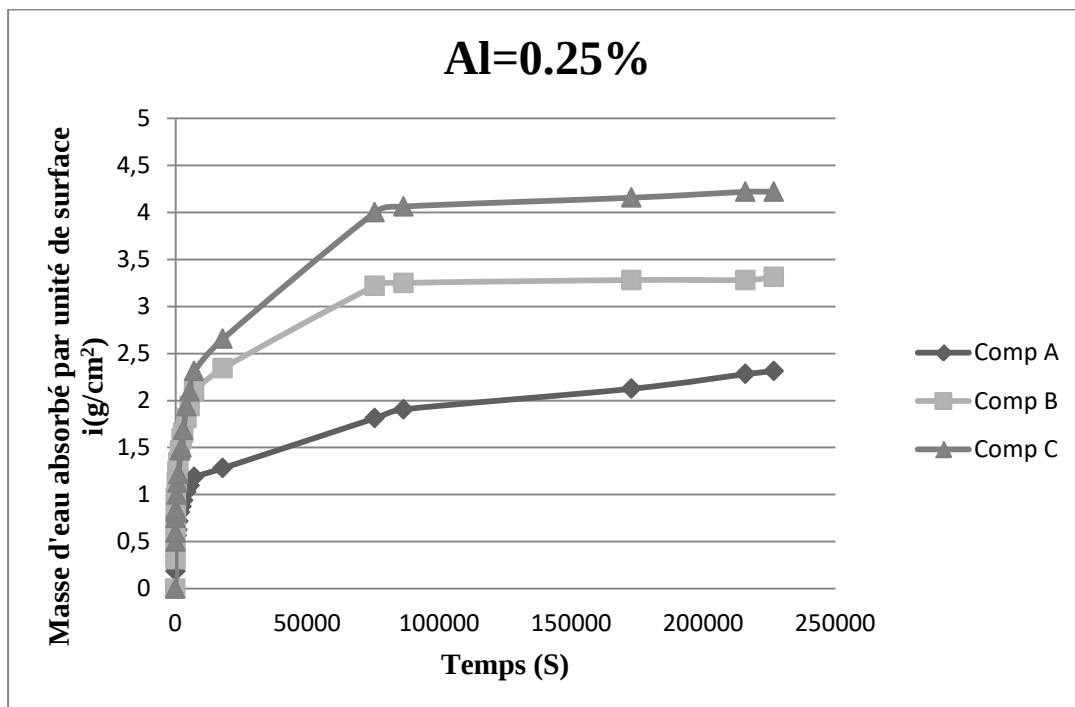
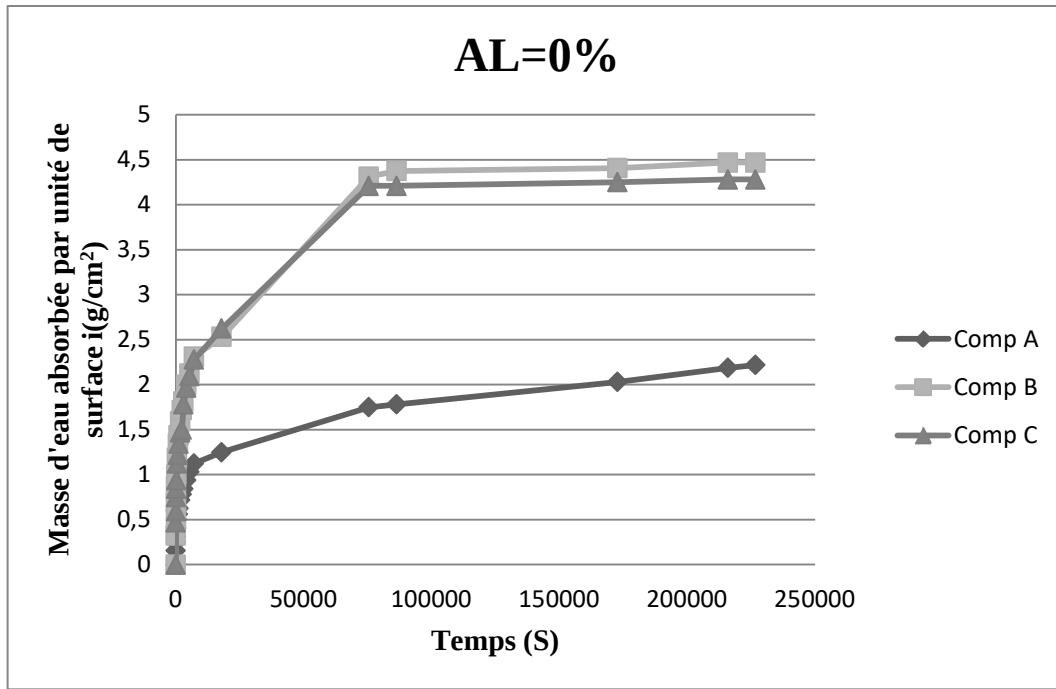


La figure III.15 : Evolution du rapport P_t/P_{ac} en fonction de la porosité totale.

Les résultats de la figure III.15 confirment une relation tout à fait évidente entre la porosité totale et le rapport P_t/P_{ac} ; le rapport augmenté avec la porosité totale, le rapport varie de 0,642 à 0,882 pour des porosités allant de 0,263 à 0,572 selon son teneur en aluminium et en chaux.

III.9/ Absorptivité des bétons cellulaires élaborés

Les essais d'absorption capillaire ont été effectués sur des éprouvettes prismatiques $(4 \times 4 \times 16) \text{ cm}^3$ préalablement séchées en étuve jusqu'à masse constante, ces dernières sont placées verticalement sur leur bases de dimension $(4 \times 4) \text{ cm}^2$ dans un récipient à niveau d'eau maintenu constant. Les éprouvettes sont immergées dans l'eau à une profondeur de 1cm au minimum, les résultats de l'essai d'absorption sont représenté dans la figure III.16.



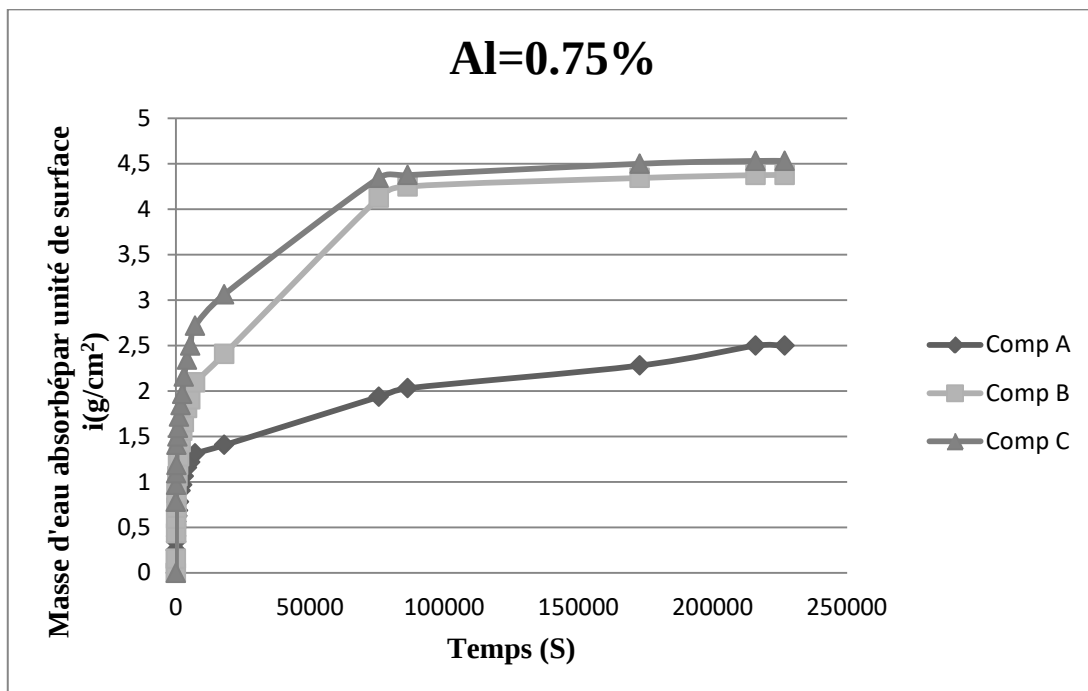
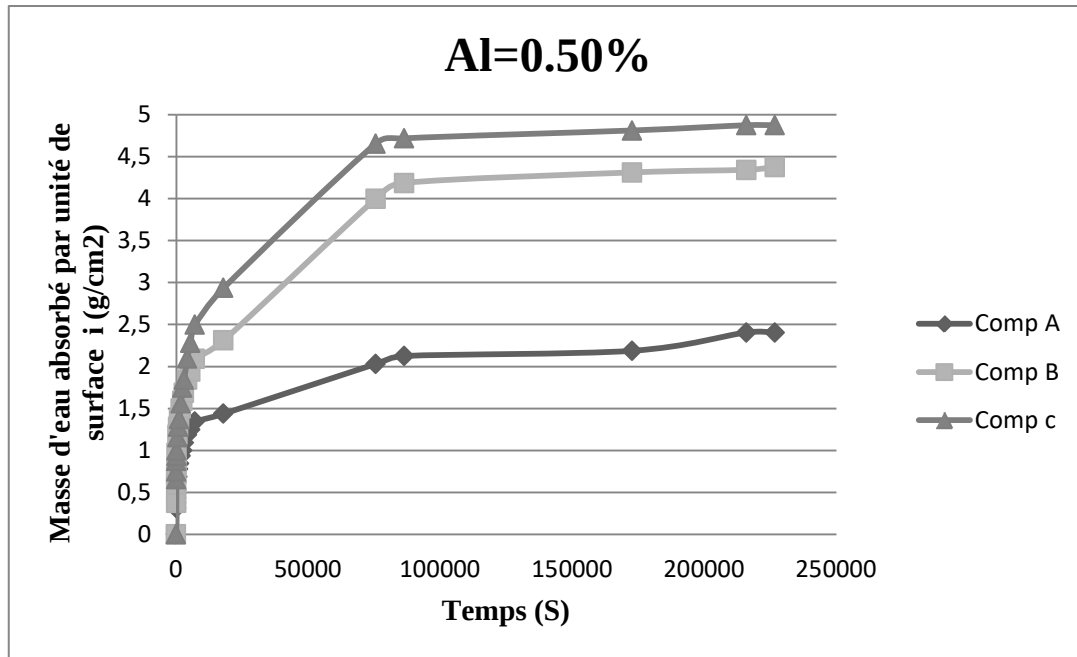
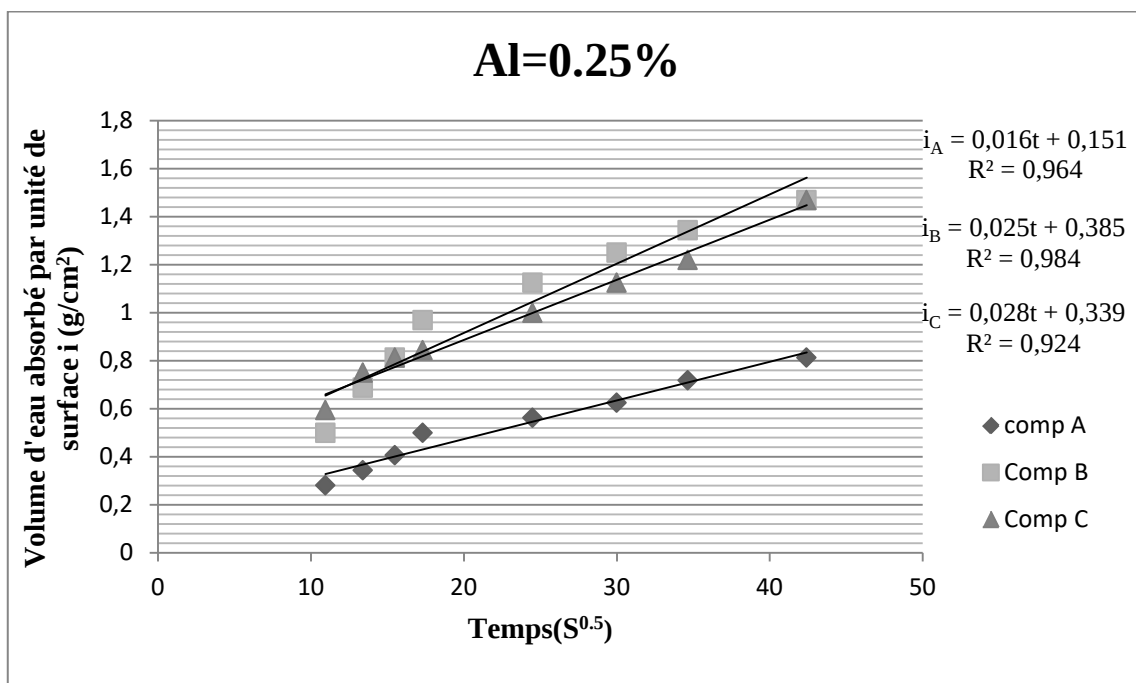
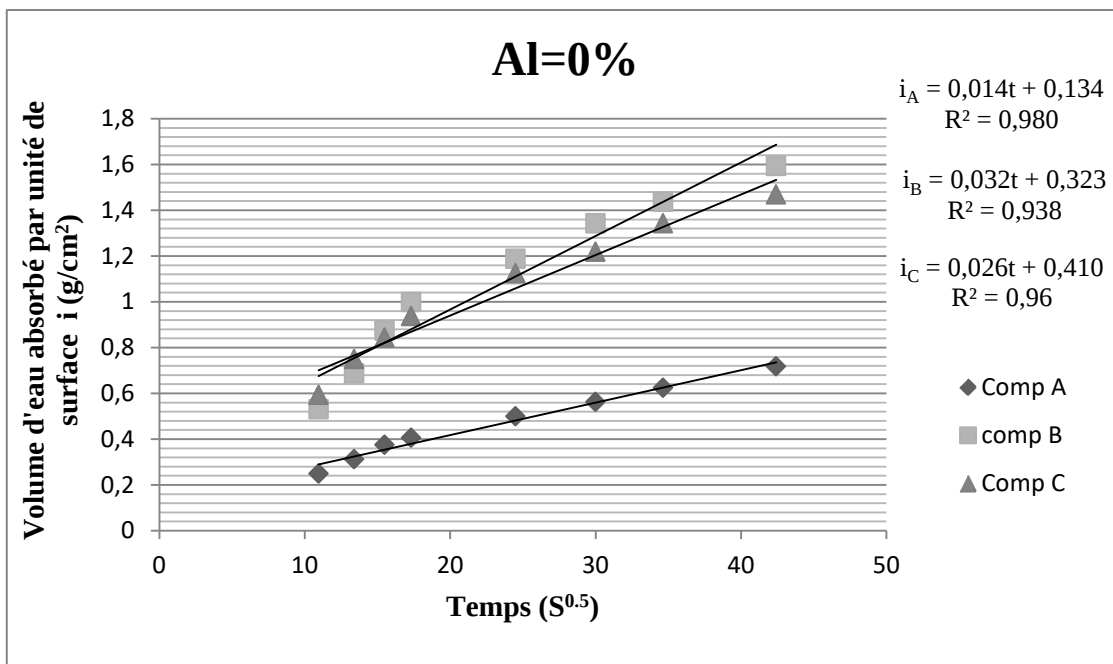


Figure III.16 : la variation du volume d'eau absorbée par unité de surface i (g/cm²) en fonction du temps (s).



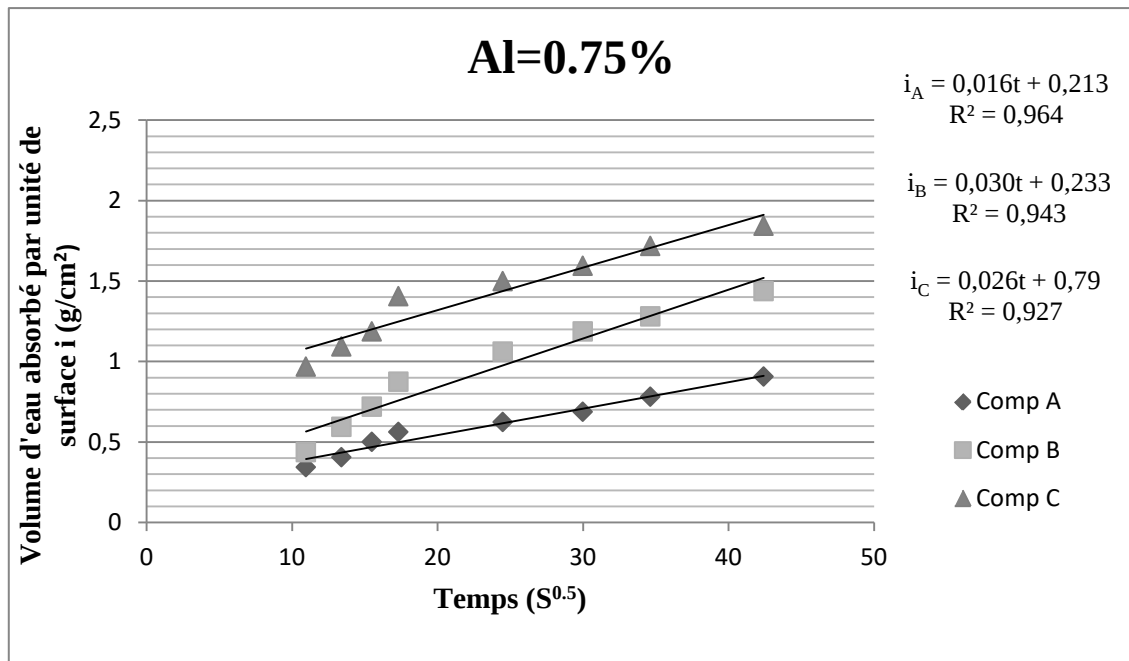
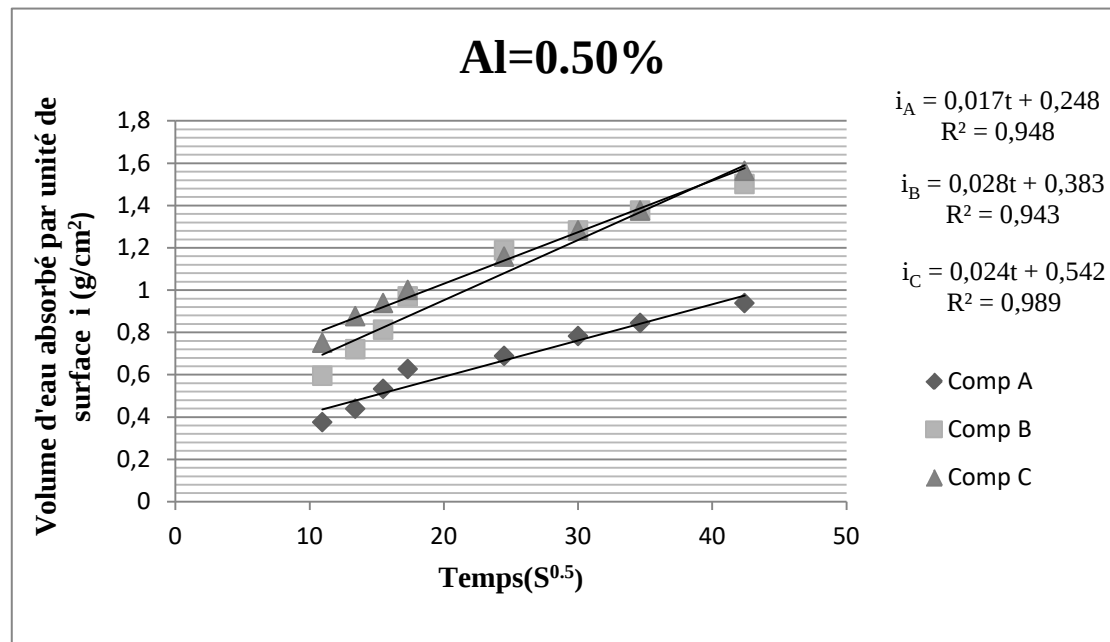


Figure III.17 : variation de la masse d'eau absorbée durant la première heure en fonction de la racine carrée du temps des différentes compositions.

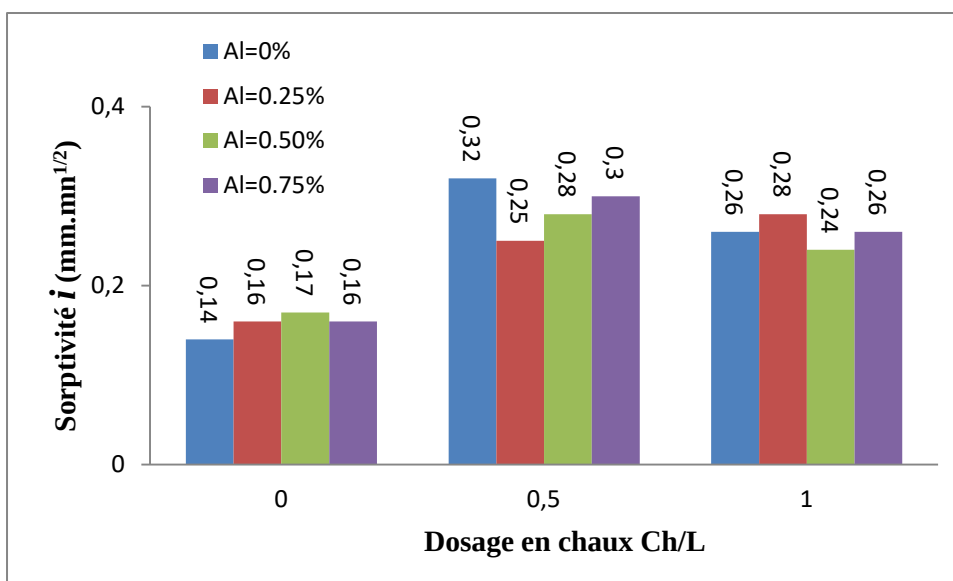
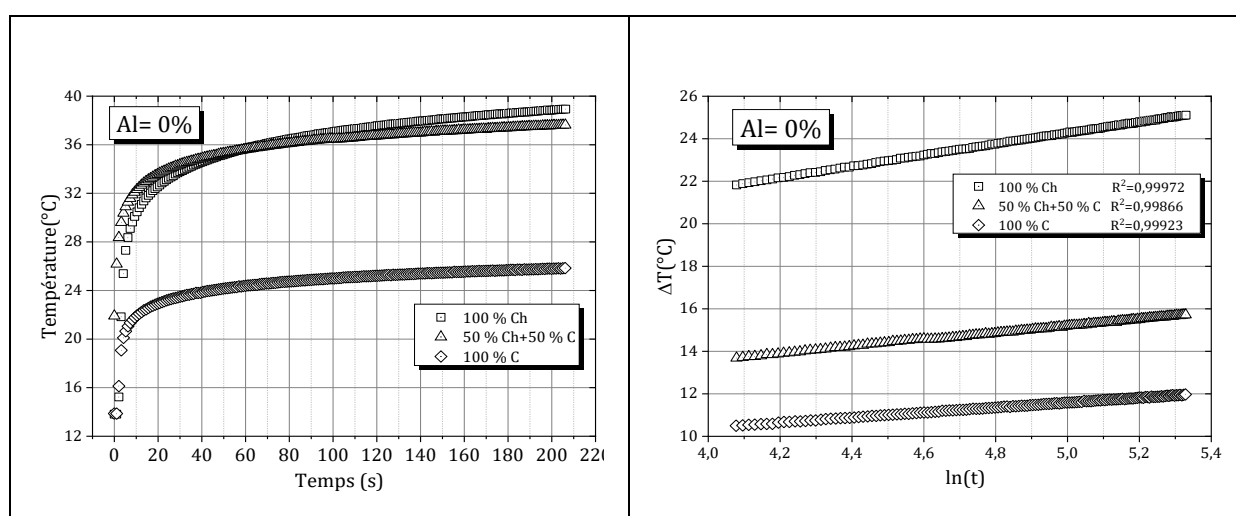


Figure III.18 : la variation sorptivité i en fonction de dosage en chaux Ch/L.

La figure III.18 est un histogramme qui représente la variation de sorptivité « i » en fonction de dosage en chaux pour les différents compositions élaborés, nous remarquons que la sorptivité augmente avec l'augmentation de dosage en aluminium et le dosage en chaux Ch/L.

III.10/ Etude du transfert thermique

Avant d'entamer la partie de comportement hydro-thermique nous présentons ici les thermogrammes de mesure de la conductivité thermique λ_{sec} à l'état sec pour l'ensemble de compositions de béton cellulaire à base de sable calcaire élaborées sont donnés dans la figure III.19.



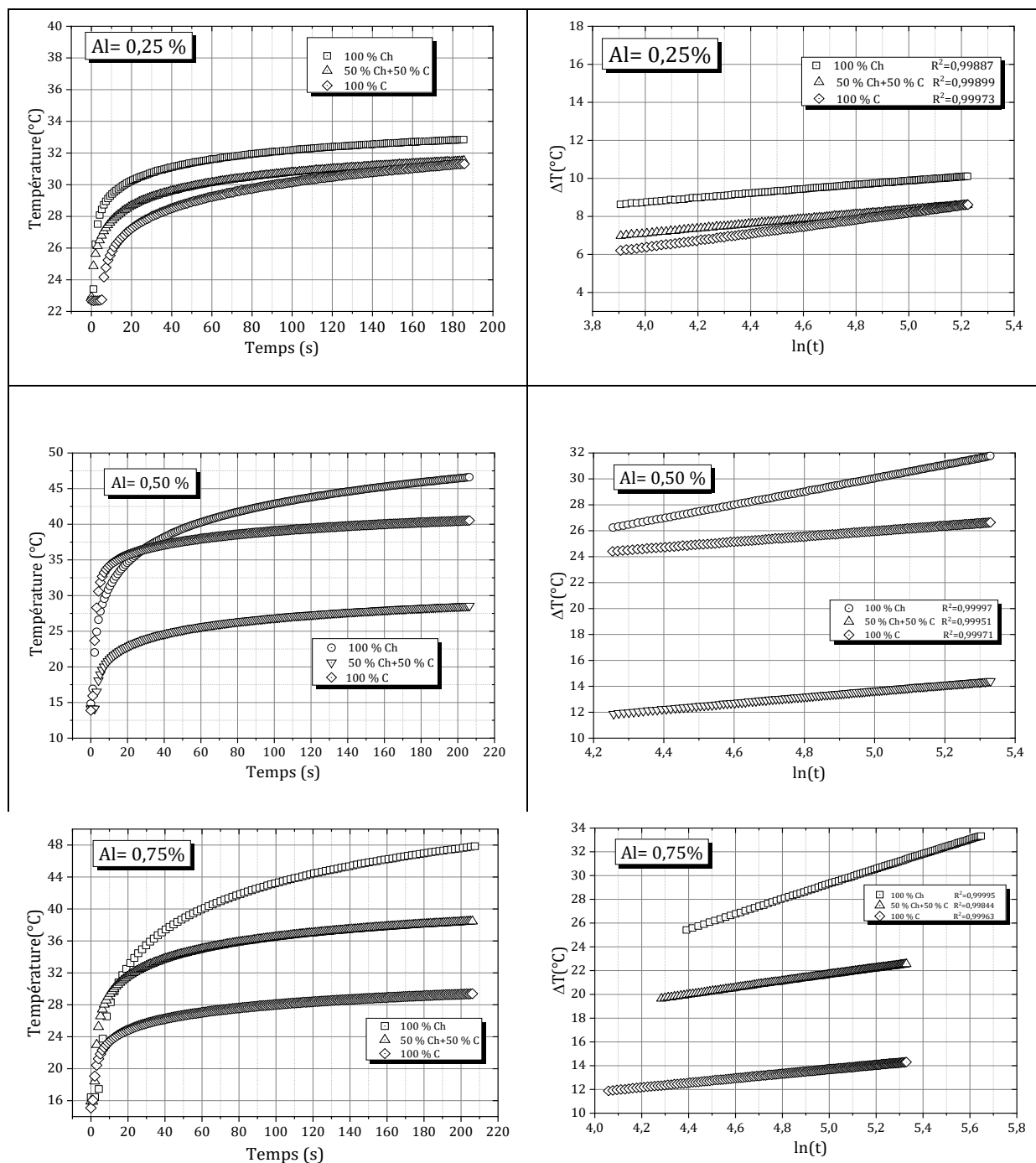


Figure III.19 : Thermogramme pour le calcul de la conductivité thermique à l'état sec λ_{sec} .

Ces résultats montrent que la conductivité thermique à l'état sec augmente avec le pourcentage de chaux dans le liant ainsi qu'avec la teneur en aluminium pour les différentes compositions élaborées.

III.11/ Etude du transfert hydro-thermique

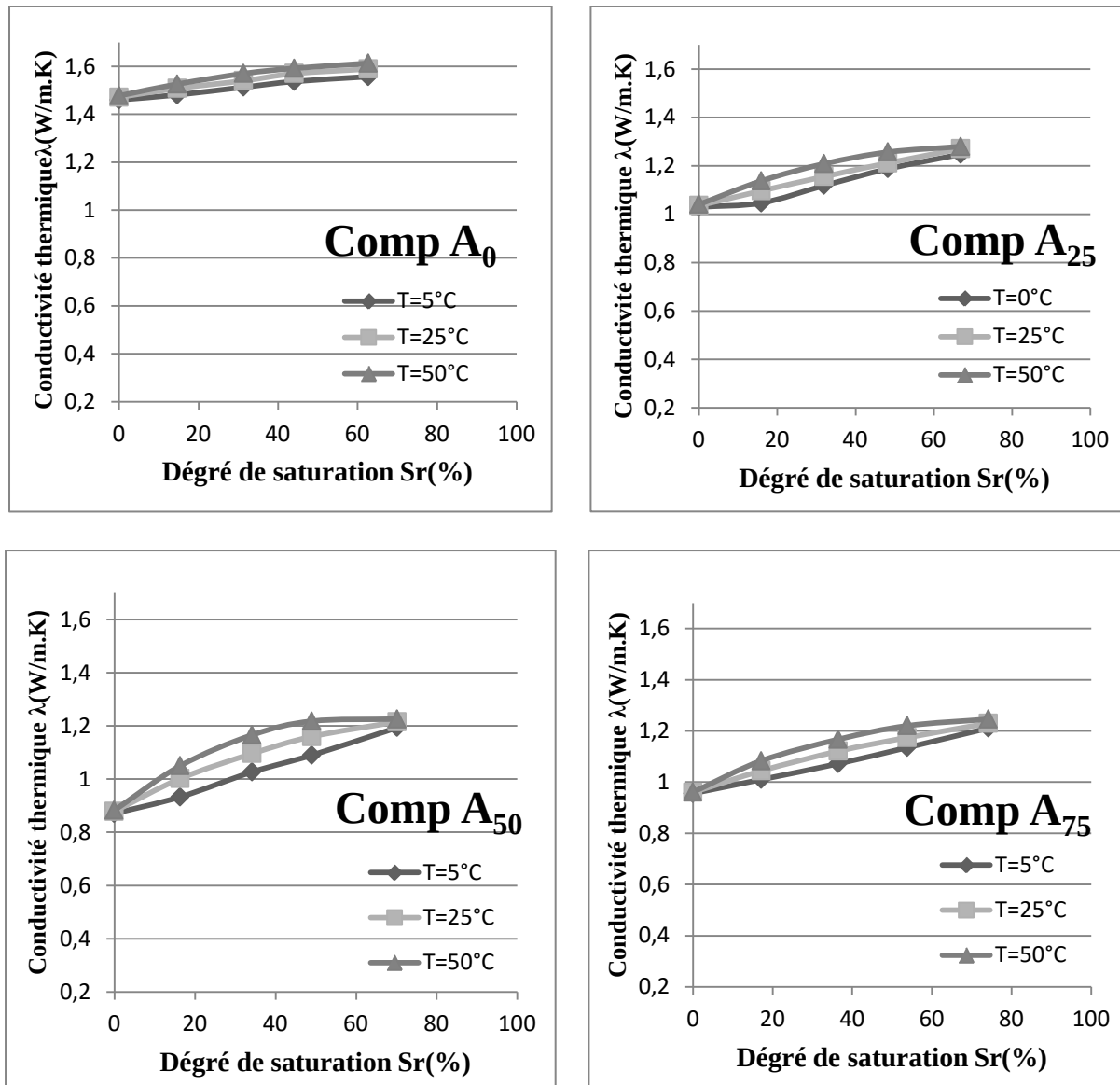


Figure III.20 : Evolution de la conductivité thermique en fonction du taux de saturation en eau et de la température de composition A.

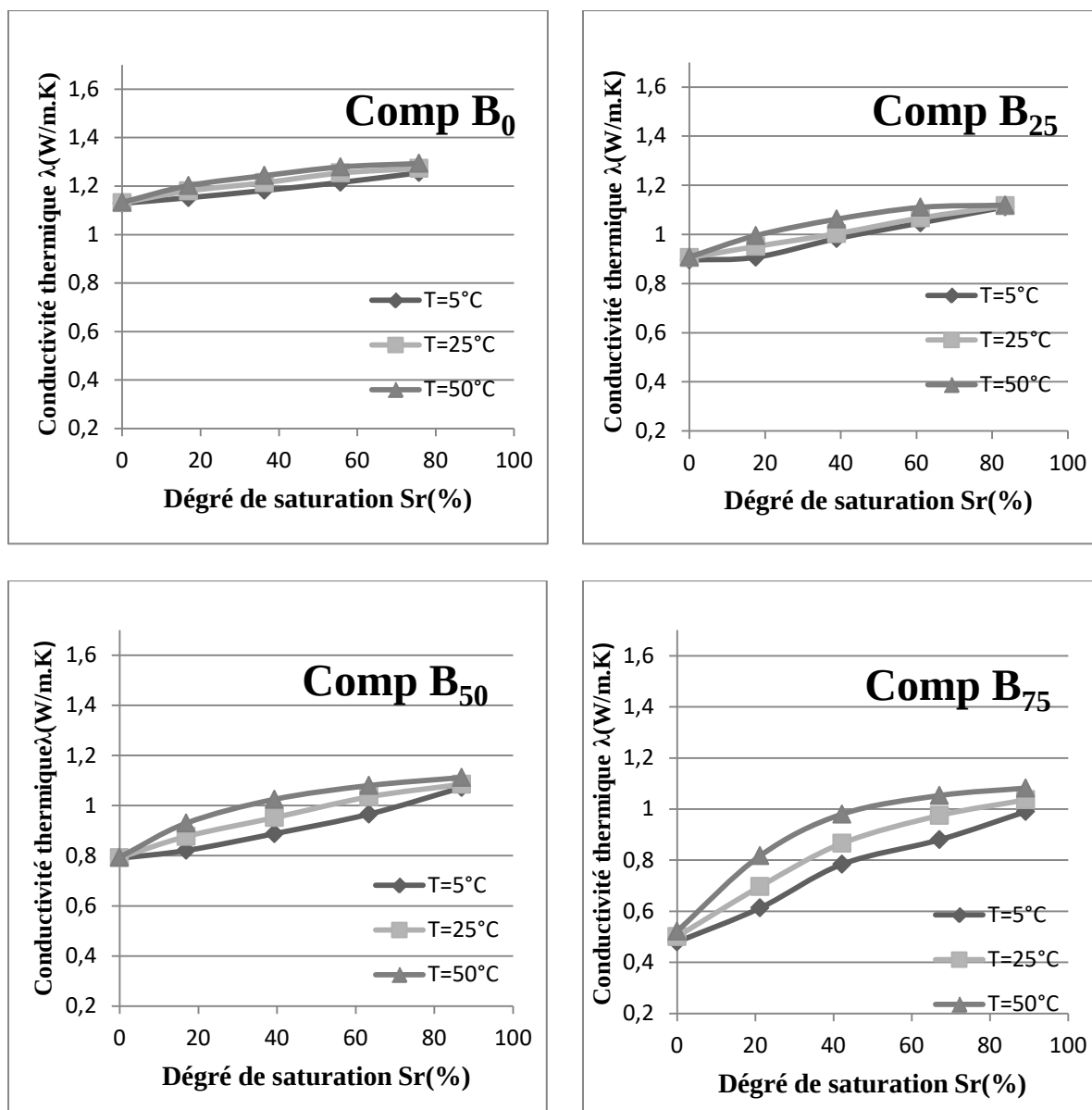


Figure III.21 : Evolution de la conductivité thermique en fonction du taux de saturation en eau et la température de composition B.

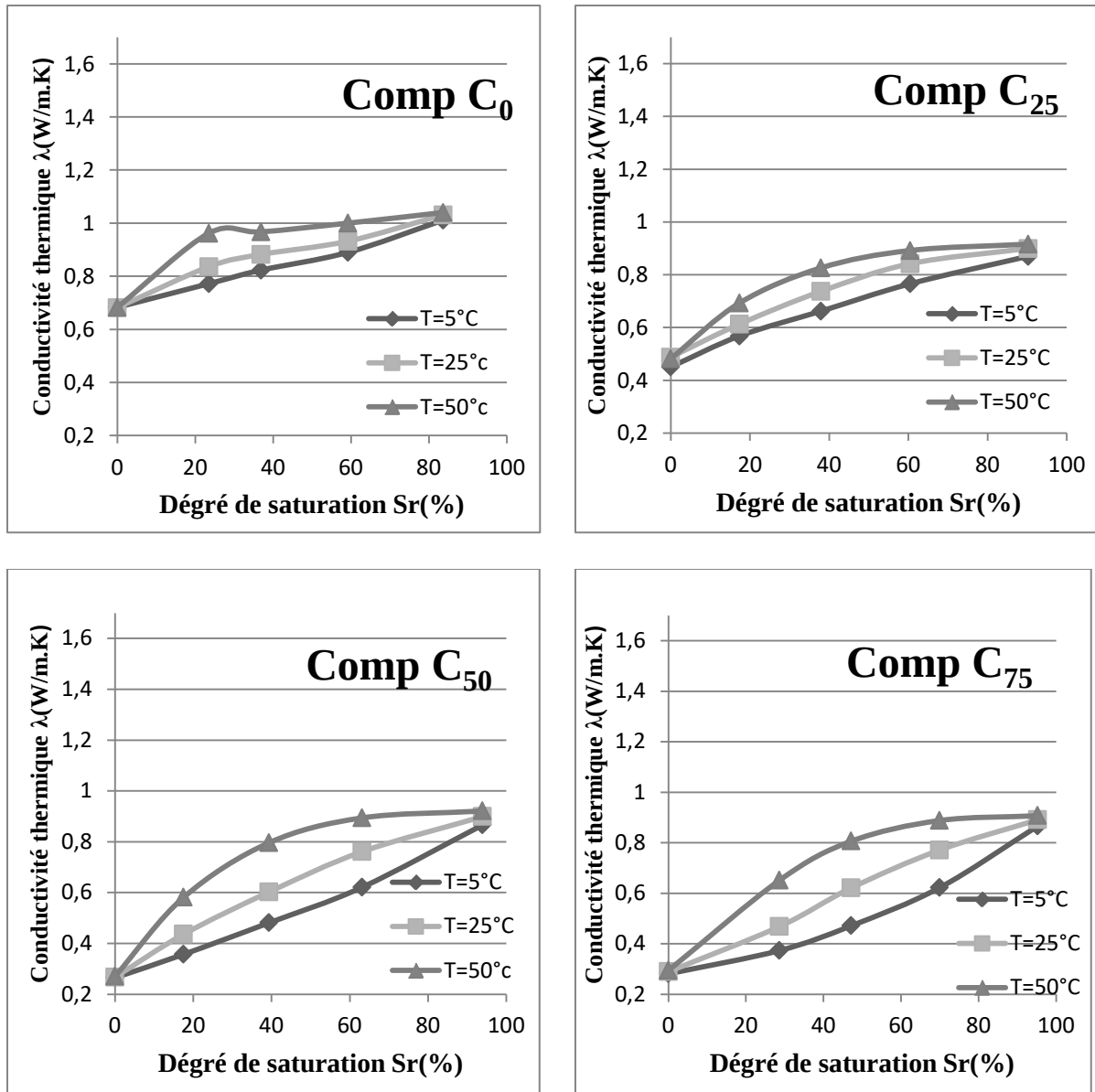


Figure III.22 : Evolution de la conductivité thermique en fonction du taux de saturation en eau et la température de composition C.

Les résultats de mesure sont reportés sur la figure III.20, 21 et 22. Plus de 180 valeurs de conductivité thermique ont été déterminées représentant la moyenne des mesures effectuées sur trois échantillons de chaque composition. Pour pouvoir comparer les résultats des différentes compositions on a utilisé le taux de saturation en eau S_r plutôt que la teneur volumique en eau. Les résultats montrent que la conductivité thermique apparente évolue presque linéairement pour la majorité des compositions élaborés en fonction du taux de saturation en eau, mais uniquement à basse température où la température est au voisinage de 20°C, c'est à-dire que le phénomène d'évaporation-condensation n'apparaît pratiquement pas [56].

Conclusion

générale

Conclusion Générale :

Ce travail avait pour objectif l'étude de comportement hydro-thermique d'un béton cellulaire à base sable calcaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent. Il s'agit de montrer les potentialités d'utiliser les ressources locales, notamment le sable calcaire, le liant (ciment, chaux) en vue développement d'un matériau de construction mécaniquement et thermiquement performant, et répondant aux exigences d'économie d'énergie et de développement durable.

Afin d'atteindre cet objectif, on a subdivisé ce travail en deux volets : le premier consiste en applique la formulation d'une composition optimale du mélange liant (ciment / chaux), sable calcaire. Le deuxième volet consiste en allègement de la pâte optimale par l'incorporation de différentes proportions d'aluminium en vue d'amélioration les performances thermiques du béton de sable. Les résultats expérimentaux de cette étude ont permis de conclure ce qui suit :

- La détermination de la quantité d'eau sur la base de l'essai rhéologique à la pâte (ciment, chaux, sable calcaire) en utilisent un maniabilimètre de type B pour le rapport E/L qui varient de (40% à 100%) avec un pas de 5% par rapport à la masse du liant jusqu'à avoir à un temps d'écoulement compris entre 2 et 3 secondes. Ce rapport qui nous permet d'obtenir des éprouvettes sans fissure superficielles avec une mise en moule facile et pratique sans vibration correspond.
- Pour les bétons cellulaires la masse volumique apparente du matériau diminué lorsque le pourcentage en aluminium augmente. L'ajout de la poudre d'aluminium au mélange apporte bien un allègement du matériau et permis d'atteindre des densités comprises entre 2070 et 1060 Kg/m³ pour des dosages en aluminium allant de 0 jusqu'à 0,75 avec un pas de 0,25.
- Pour ce type des bétons cellulaire, vue sa très fiable résistance à la traction (non mesurable dans la plupart du temps), donc il ne pas utile de présenter les résultats de la résistance à la traction et nous avons contenté a la résistance à la compression. Ces derniers ont été effectués à l'âge 28 jours. Les résultats de la résistance à la compression des différentes compositions sont variés de 0,12 à 19,22 MPa. La résistance diminue significativement en fonction du dosage de la chaux et de la poudre d'aluminium.
- Les valeurs de la porosité totale et la porosité accessible à l'eau et la porosité introduite augmente avec le teneur en chaux et la teneur en agent expansif, la porosité totale varie entre 0,263 et 0,572 et la porosité accessible varie entre 0,198 et 0,476 et la porosité introduit varie entre 0 et 0,132.
- Pour les modèles communément sont utilisé parce qu'il y a des relations mathématiques reliant la résistance mécanique à la porosité du matériau il s'agit des modèles de **Bal'Shin** ; **Ryshkewitch** ; **Schiller** et **Hasselmann**, les valeurs expérimentales et théoriques de la résistance mécanique en compression à 28 jours en fonction de la porosité totale P_t varie de 0,263 à 0,572 pour des résistance allant de 0,12 à 19,22 MPa, ce qui concerne les modèles nous avons remarqué que les modèles de **Bal'Shin** et **Ryshkewitch** sont proche à notre composition .

- Pour les valeurs absorptivité des bétons cellulaires élaborés, augmentent avec le teneur en chaux et la teneur en agent expansif, l'absorption varie entre 0,16 et 4,53 g/cm².
- Les résultats de mesure des propriétés thermiques montrent que à la conductivité thermique est nettement diminué par ajouts d'aluminium, les propriétés thermiques des bétons cellulaires sont liées à leurs masses volumiques, autrement dit plus la masse volumique est faible plus la conductivité thermique est faible. Pour la gamme des bétons élaborés on a pu obtenir une conductivité thermique qui correspond à littérature. la conductivité thermique augmente en fonction de taux de saturation, elle à l'état sec elle varie entre [0,956 et 1477]w/m.k pour 0% chaux, [0,48 et 1,133]w/m.k pour 50% chaux et [0,281 et 0,683]w/m.k pour 100% chaux, elle varie a l'état saturé entre [1,211 et 1,613]w/m.k pour 0% chaux, [0,99 et 1,293]w/m.k pour 50% chaux et [0,866 et 1,04]w/m.k pour 100% chaux. On remarque que la conductivité thermique diminue lorsque le dosage de la chaux augmenté, elle est l'état saturé plus grands 21% à l'état sec pour 0% chaux, 51% pour 50% chaux et 67% pour 100% chaux. enfin les résultats pour la conductivité thermique à l'état saturé est plus importante que l'état sec, cette importance est noté avec augmentation de dosage en chaux et en aluminium, nous posons que cette augmentation due essentiellement au forte réseau poreux dans la matrice causé au processus d'allégement.

Recommandations et perspectives de recherches

Pour les futures recherches, nous recommandons :

- Utiliser d'autres procédés d'allégement pour améliorer les performances thermiques des bétons de sables.
- Utiliser d'autres types de sable comme sable de dune.
- Optimiser le pourcentage d'aluminium.
- Utilisation de la technique de conservation d'autoclavage afin d'améliorer ces performances et minimiser le temps de conservation.

Bibliographies

Références bibliographique :

- [1] **Béton de sable**(1994) : caractéristique et pratiques d'utilisation, Synthèse du Projet National de recherche et Développement SABLOCRETE, vol.237, presses de l'Ecole National des Ponts et Chaussées, Paris, ISBN : 2-85978-221-4, (in French).
- [2] **AFNOR Standard NF P 18-500**(juin 1995) : Bétons de sables.
- [3] **G. Escadeillas** : " Les ciment aux fillers calcaires : Contribution à leur optimisation par l'étude des propriétés mécaniques et physiques des bétons fillérisés" .Thèse Doctorat de L'université Paul SABATIER, Toulouse, 1988, (in French).
- [4] **T. Vuk, V. Tinta, R. Gabrovec, V.Kaucie.** (2001): "The effects of limestone addition clinker type and fineness on properties of Portland cement". Cem. Coner. Res 31,
- [5] **Normes AFNOR :**
 Essais physico-mécaniques sur les bétons et mortiers (1981-1997).
 NF P 18-541 : Granulats pour béton hydraulique. Juin 1995.
 NF P15-301 : Ciment courant. Juin 1994.
 NF P18-303 : Eau de gâchage pour béton. Décembre 1998.
 NF P196-1 : Méthodes d'essais des ciments
- [6] **CIM Béton** (1995): Les béton de sable en structure de chaussées, centre d'information sur le ciment et ses applications, Paris, France.
- [7] **Kettab .R**(2007) : valorisation du sable de dune. Thèse de doctorat ENSP
- [8] **J. BROCARD** (1972), « Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment », Tome I, Librairie Aristide Quillet, 1972.
- [9] **J. BARON, J.P. OLLIVIER et J.C. WEISS**, (1999) : « Les béton, bases et données pour leur formulation », Edition Eyrolles, Troisième tirage.
- [10] **Société des ciments de Ain El-Kebire**, (2004) : « chimie des ciments 2
- [11] **P.Pimienta, J Chandellier, M. Rubaud, F. Dutruel, H.Nicole** (1994) : Etude de faisabilité des procédés de construction a base du béton de bois, Chhier du CSTB, Livraison 346, N°2703.
- [12] **Bentchikow. M** (2008) : Contribution à l'étude et à l'élaboration de matériaux composites pour l'isolation thermique (Cas de béton de fibres de papiers de papiers recyclés) ; Thèse de doctorat de l'ENP d'Alger.
- [13] **Véronique Cerezo** (2005) : Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique ; INSA de Lyon. Thèse de doctorat.

-
- [14] **Yang KE (2008)** : Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers : expérience et modélisation, Thèse de doctorat ; Université de Cergy-Pontoise,
- [15] **Arnould.M et Virlogeux .M (1986)** : granulats de béton légers, Presses de l'ecolentationale des ponts et chaussées; Paris.
- [16] **Ledhem .A (1997)** : Minimisation des variations dimensionnelles des bétons de bois à matrice argileuse, Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon.
- [17] **Ziregue Ahmed (2005)** : Valorisation de coproduits industriels de différents facteurs d'allégement sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques d'un béton à matrice calcaire-ciment, Thèse de magister, l'UAT de Laghouat.
- [18] **Daniel wyart (2008):** Technique de l'ingénieur par polystyrène expansé pu PSE.
- [19] **Dreux G et Festa. J (1995):** Nouveau guide du béton. Eyrolles.
- [20] **Encyclopédie du bâtiment (1970)** : les techniques déconstructions ; édition Eyrolles.
- [21] **Roger Lacroix-Albret Fuentes(1982)** : Traité de béton Armé ; Éditions Eyrolles, Paris
- [22] **Jacobs et Mayer (1992):** Porosity and permeability of autoclaved aerated concrete October 14-16.
- [23] **NARAYANAN, N and RAMAMURTHY, K (2000):** Structure and proprieties of aerated concrete; a review: cement and concrete research.
- [24] **AAC, (1978):** Autoclaved aerated concrete CEB manual of design and technology; Lancaster England, The construction Press Ltd.
- [25] **Bederina M (2007),** « Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base des déchets de bois». Thèse de doctorat, l'ENP d'Alger.
- [26] **A. Steopoe (1970):** "La durabilité du béton ", Eyrolles, Paris.
- [27] **Gotteicha.M, (2005).** Contribution à la caractérisation des bétons de sable à base de copeaux de bois traités, Thèsede Magister, U.A.T de Laghouat.
- [28] **G. Bauduin, DJ Mathieu et R. Phan tan Luu (1987)** : Mise au point d'un nouveau béton léger de polystyrène expansé – I ; Étude des constituants principaux vol ,23.N°6,PP.441-445,
- [29] **A. Laukaitis, R. Zurauskas, J. Keiene (2005)** : The effect of foampolystyrene granules on cement composite properties ; Cementconcrete composite 27 (2005)
- [30] **J.P Yvrard (1998)** : Expérimentation et modélisation du comportement Mécanique du polystyrène expansé. Thèse de doctorat de l'Université de Lille.
- [31] **Benmalek M L, Derbala R (2007)** ; « Élaboration et caractérisation d'un béton à base de sable dunaire et de sous –produits industriels.
-

-
- [32] **Bing Chen, Juanyn Liu (2004):** Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cement and Concrete Research* 34, PP.1259.
 - [33] **Gueddouda. M. K et al (9-11Février2007):** Caractérisation et stabilisation des sols expansifs ; colloque international, Sols et Matériaux à Problèmes ; Tunisie, PP.27-34
 - [34] **Adam M. Neville(2000) :** PROPRIÉTÉ DES BÉTONS, Traduit par le CRIB, Éditions Eyrolles,
 - [35] **Jos Cox, Albert Ingelaere, Jacques Siwaire, Pascal Meulders, Elly Van Overmeire:** Le béton cellulaire.
 - [36] **Tada S, Nakano S (1983):** "Microstructural approach to properties of moist cellular concrete". In: Wittmann FH, editor. *Proceedings Autoclaved Aerated Concrete, Moisture and Properties*. Amsterdam : Elsevier ;
 - [37] **C, lian y zhugsbeechem 2011** the relationship between posity and strength for porous concrete, *Construction and building materials* 25 4294-4298.
 - [38] **A. Laukaitis et al (2009):** Influence of fibrous additives on properties of aerated autoclaved concrete forming mixtures and strength characteristics of products. *Construction and building matériels* 23 3034-3042.
 - [39] **C.Boutin (1996) :** Conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé : modélisation par méthode auto cohérente. *Matériaux et constructions* 29 pp609-615.
 - [40] **Xiao-yan Huang et al (2012):** Preparation of autoclaved aerated concrete using copper Tailings and blast furnace slag. *Construction and building materials* 27 1-5.
 - [41] **E.K Kunhanandan Namibar, K. Ramamurthy (2006): Influence of filler type on the** Properties of foam concrete. *Cement and concrete composites* 28 475-480.
 - [42] **Bellini Da Cunha Neto, J.A. (1992).** Transport d'humidité en matériau poreux enprésence d'un gradient de température. Caractérisation expérimentale d'un béton cellulaire. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, saint-Martin-d'Hères. France.
 - [43] **J.P.Laurent (1991):** La conductivité thermique 'à sec' des bétons cellulaires autoclaves : un modèle conceptuel. *Matériaux et constructions* 24 pp221-226.
 - [44] **Roels, S. (2002).**Modelling unsaturated moisture transport in autoclaved aeratedconcrete: a microstructural approach, Norwegian university of science and technology.
 - [45] **Christian Guegan, Philippe Legras, Jean Francois Mazzoleni, Christian Colin, ThomasBreiner et Nicolas Foussier (2005):** «Mémento du béton cellulaire».
 - [46] **S.Tada (1992):** Pore structure and moisture characteristics of porous inorganic buildingMaterials. Wittmann FH Amesterdam pp53-63.
-

-
- [47] **J.P.Laurent (1991):** La conductivité thermique 'à sec' des bétons cellulaires autoclaves : un modèle conceptuel. Matériaux et constructions 24.
- [48] **Lang D.L (1956):** ASTM Bulletin, sept. pp.58-60.
- [49] **Wray K.L, Connolly T.J (1959):** J. Appl. Physics, 30 (11), pp.1702-1705.
- [50] **Tufeu R (1971):** Thèse de Doctorat d'état, Université Paris IV.
- [51] **Stalhane B, Pyk S (1931):** Teknisktidskrift, 61, pp.389-393
- [52] **Blackwell J.H (1954):** A transient flow method for determination of thermal constants of insulating materials in bulk, Can. J. Physics, 25, n°2, 137-144.
- [53] **Laurent J.P (1986):** Contribution à la caractérisation thermique des milieux poreux granulaire, Thèse de Doctorat de l'I.N.P.Grenoble.
- [54] **Gustafsson S.E (1991):** Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials, Review Scientific Instruments, vol.62, n°3, 797-804.
- [55] **Gustafsson S.E, Karawacki E, Khan M.N (1979):** Transient Hot-Strip method for simultaneously measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of solids and liquids - J. Phys. D :Appl. Phys., 12, 1411.
- [56] **Goual M S (2001):** Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation d'un co-produit argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent : caractérisation et comportement thermique, thèse Doctorat d'Etat soutenue le 28 février à l'ENP d'Alger.
- [57] **Daïan J.F (1986):** Processus de condensation et de transfert d'eau dans un matériau méso et macroporeux : Etude expérimentale du mortier de ciment. Thèse de Doctorat Sciences physiques, Université Scientifique, Technologique et Médicale de Grenoble, 319p.
- [58] **De Vries D.A (1958) :** Simultaneous transfer of heat and moisture in porous media. Trans. Amer. Geophys. Union vol 39, pp 909-916.
- [59] **De Vries D.A (1987) :** The theory of heat and mass transfer in porous media revisited. International Journal of Heat and Mass Transfer, vol 30, n°7, pp 1343-1350.
- [60] **Merouani L (1987):** Phénomènes de sorption et de transfert d'humidité dans des matériaux du bâtiment. Thèse de Doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Grenoble, 190p.
-

- [61] **Couasnet Y** (1989): Contribution à l'étude du transfert de vapeur d'eau en régime permanent et non stationnaire dans les matériaux poreux hygroscopiques, Cahier du CSTB N°2349, sept.1989.
- [62] **Quenard D** (1989): Adsorption et transfert d'humidité dans les matériaux hygroscopiques : approche du type percolation et expérimentation, Thèse de doctorat de l'I.N.P.Toulouse, 1989.
- [63] **Crause P** (1983): Etude fondamentale des transferts couplés de chaleur et d'humidité en milieu poreux non saturé, Thèse de Doctorat d'Etat, I.N.P.Toulouse, p.21.
- [64] **RILEM** (1970) : commission des bétons léger, Terminologie et définition, Matériaux et construction N°13, pp 60-69.
- [65] **RILEM** (mai-juin 1980) bimestriel: Porosité accessible à l'eau, Vol. 13-N° 75, P176.
- [66] **RILEM CPC 11.1** (1974): Absorption of water by immersion; **CPC 11.2** absorption of water by capillarity, mater.struct.7, pp291-297.
- [67] **Yves Jannot** (2008): « Métrologie thermique » ; Séminaire PER AUF, LEA Dakar, 12- 18/11/2008.
- [68] **J.BROCARD (1970)** : «Encyclopédie pratique de la construction et du bâtiment ».Tome J, Libraire ArtsideQuillet, 1972, P 813,815.
- [69] **ABDELLAH El hilali**(2009) : Etude expérimentale de la rhéologie et du comportement des bétons autoplaçant (BAP) : influence des fines calcaire et des fibres végétales, Thèse de doctorat ; Université de Cergy-Pontoise.
- [70] **Syndicat National du béton Cellulaire** «Mémento du béton cellulaire» (2005) : paris, édition Eyrolles, p190.
- [71] **FERHAT Ahmida** (2019) : « Contribution à la valorisation des résidus calcaires des stations de concassage par la mise au point de bétons spéciaux: les bétons cellulaires A BASE de sable calcaire »,Thèse de doctorat ; Université de Laghouat.
- [72] **ACI 213R-87** (1994) : Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI Manual of Concret Practice, Part I : Materials and General Properties of Concrete, Detroit, Michigan.

- [73] **Richard Cabrilla, Bruno Fiorio, Anne-lise Beaucour, Hélène Dumontet, Sophie Ortola**, (2006), Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity, *Construction and Building Materials*, 286-295.
- [74] **E.P, Kearsley and P.J, Wainwright**, The effect of porosity on the strength of foamed concrete, *ACI Materials Journal*, 88, P150-158.
- [75] **Waston K.L, (1981)**, A simple relationship between the compressive strength and porosity of hydrated portland cement, *Cement and Concrete Research*, vol, 11, pp 473-476.
- [76] **Aimad Oukhlef**, (2011), Détermination de la distribution de tailles de pores d'un milieu poreux, Thèse de doctorat ; L'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, France.
- [77] **M. Wihadi Tjaronge, Zulharnah, Ulva Ria Irfan**, (2015), Porosity size and compressive strength of self compacting concrete using sea water, *Procedia Engineering* 125 (2015) 832 – 837.
- [78] **Zineb DAMENE**, (2018), valorisation des sables de dunes de la région de laghouat : étude de béton cellulaires à base de sable de dune, chaux, ciment et poudre d'aluminium, Thèse de doctorat ; Université de Laghouat-Algérie.
- [79] **Bouguerra A**, (1997) , Contribution à l'étude d'un procédé de valorisation de déchets argileux , Comportement hygrothermique des matériaux élaborés, Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon.