



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTE : GENIE CIVIL ET ARCHITECTURE

DEPARTEMENT : GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par

BEN BRAHIM Safia & TOUAL Souad

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE : Génie Civil

OPTION : Matériaux de construction

Thème

L'étude de l'effet de la porosité sur le comportement physico-mécanique et thermique d'un béton cellulaire à base de sable calcaire et siliceux obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
GUEDDOUDA Mohamed Kamel	Pr	Président
BELAIDI Akram Salah Eddine	MCA	Examineur
FERHAT Ahmida	MAA	Encadreur
GOUAL Idriss	Pr	Co-Encadreur

Promotion : Septembre-2018

Remerciments

شكر وعرفان

أحمد الله عز وجل على أن من علينا بإتمام هذا البحث و أسأله مزيدا من النجاح و التوفيق في نجاحات مقبلة بإذنه تعالى.

ثم أتوجه بخالص الشكر و العرفان و الامتنان للأستاذ المشرف:د/أحميدة فرحات و مصداقا لقول رسول الله صلى الله عليه وسلم "من إستعاذكم فأعيذوه,ومن سألكم بالله فأعطوه , ومن دعا لكم فأجيبوه , ومن صنع لكم معروفا فكافئوه، فإن لم تجدوا ماتكافئوه فادعوا له حتى تروا أنكم كافأتموه" الذي تفضل بالإشراف على هذا البحث و لم يخل علينا بتوجيهاته و آرائه القيمة و لأستاذي القدير د/ قوال ادريس الذي مد يد العون لنا ولم يخل علينا بتوجيهاته و لا ننسى فائق الشكر و التقدير لاعضاء اللجنة الاستاذ قدودة محمد كمال و بلعدي اكرم صلاح الدين المحترمين و لأساتذتنا الكرام الذين تتلمذنا على أيديهم طيلة مشوارنا الدراسي و الجامعي . كما نشكر مديري ومسؤولي مخبر الهندسة المدنية على إستقبالهم لنا. كما لا يفوتنا تقديم الشكر إلى كل من كانت له يد عون في إخراج هذا البحث إلى النور، سائلين المولى عز و جل أن يجعل ذلك في ميزان حسناتهم.

ونشكر كل من ساعدنا من قريب أو من بعيد ولو بابتسامة.

بن ابراهيم صفية

طهال سعاد

الاهداء

قال عز وجل : [وَقَضَىٰ رَبُّكَ أَلَّا تَعْبُدُوا إِلَّا إِيَّاهُ وَبِالْوَالِدَيْنِ إِحْسَانًا إِنَّمَا يَبْلُغَنَّ عِنْدَكَ الْكِبَرَ أَحَدُهُمَا أَوْ كِلَاهُمَا فَلَا تَقُلْ لَهُمَا أَفًّا وَلَا تَنْهَرُهُمَا وَقُلْ لَهُمَا قَوْلًا كَرِيمًا وَ اخْفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُل رَّبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا] صدق الله العظيم.

إلى نور العيون... ورمش الجفون والسر المكنون والحب المجنون في القلب المفتون والعقل الموزون والصدر الحنون ، إلى البلسم الشافي والقلب الدافئ والحنان الكافي، إلى التي

خطني بسياج حبها إلى أروع أم في الوجود أمي الحبيبة

إلى الذي تاهت الكلمات في وصفه وعجز اللسان في ذكر مآثره إلى سندي وعوني وقدوتي إلى نور الوضاء مصدر فخري وذخري إلى ذلك الينوع الذي اغترفت منه الحنان إلى الذي يعجز قلم واللسان على خطه في كلمات إلى من جعل نفسه شمعة تحترق من أجل أن ينير دربي وإلى من لعب وشقى من أجل راحتي وسعادتي إليك يا أبي الغالي .

إلى النجوم والكواكب إلى الورود البهية الذين قاسموني حنان الوالدين أخوتي

إلى رموز البراءة والصفاء : علال . طاهر . عبدالرحمان . وبنات خالتي امينة

إلى اللذين جعلوا من الضعف قوة أساتذتي الكرام

إلى ظلالتي التي لا تغيبني ، أصدقائي الأعزاء : سعاد طوال، الزهراء بن جدو، عائشة قنيش، فاطمة رقاد، ..

و إلى من ساهم من بعيد أو قريب في إنجاح هذا الجهد المتواضع

وفقههم الله في مشوارهم وسدد خطاهم..

بن ابراهيم صفية



الاهداء

قال عز وجل : [وَقَضَىٰ رَبُّكَ أَلَّا تَعْبُدُوا إِلَّا إِيَّاهُ وَبِالْوَالِدَيْنِ إِحْسَانًا إِنَّمَا يَبْلُغَنَّ عِنْدَكَ الْكِبَرَ أَحَدُهُمَا أَوْ كِلَاهُمَا فَلَا تَقُلْ لَهُمَا أُفٍّ وَلَا تَنْهَرْهُمَا وَقُلْ لَهُمَا قَوْلًا كَرِيمًا وَ اخْفِضْ لَهُمَا جَنَاحَ الذُّلِّ مِنَ الرَّحْمَةِ وَقُلْ رَبِّ ارْحَمْهُمَا كَمَا رَبَّيَانِي صَغِيرًا] صدق الله العظيم.

إلى نور العيون... ورمش الجفون والسر المكنون والحب المجنون في القلب المفتون والعقل الموزون والصبر الحنون ، إلى البلسم الشافي والقلب الدافئ والحنان الكافي، إلى التي أحسن لي بسياج حبها إلى أروع أم في الوجود أمي الحبيبة

إلى الذي تاهت بكلمات في وصفه وعجز اللسان في ذكر مآثره إلى سندي وعوني وقدوتي إلى السر الموضئ مصدر فخري ودخري إلى ذلك ينبوع الذي اغترفت منه الحنان إلى الذي يعجز الحلم واللسان على خطه في كلمات إلى من جعل نفسه شمعة تحترق من أجل أن ينير دربي وإلى من نعت وشقي من أجل راحتي وسعادتي إليك يا أبي الغالي .

إلى النجوم والكواكب إلى التورود البهية الذين قاسموني حنان الوالدين أخوتي إلى رموز البراءة والصفاء تواتي . مباركة . فاطمة . عبدالقادر . هنية . احمد . والى زوجي عبدالرحمن وابني الغالي هارون عبد الله إلى اللذين جعلوا من الضعف قوة أساتذتي الكرام إلى ظلالتي التي لا تدارعي ، أصدقائي الأعزاء: صفية بن ابراهيم، الزهراء بن جدو، عائشة قنيش، فاطمة رقاد، ..

و إلى من ساهم من بعيد أو قريب في إنجاح هذا الجهد المتواضع وفقهم الله في مشوارهم وسدد خطاهم..

طوال سعاد



ملخص:

هذا العمل هو جزء من مجال بحث واسع يتمثل في تجميع واستغلال المواد المحلية لمدينة الاغواط (جنوب الجزائر) في تطوير مواد البناء.

الهدف الرئيسي من العمل المقدم ، هو دراسة تأثير المسامية على السلوك الفيزيوميكانيكي والحراري للخرسانة الخلوية المرتكزة الحصول عليه عن طريق التفاعل مع ألمنيوم الطريقة المقترحة لتحضير خرسانة خلوية هي طريقة تم على الرمل الكلسي و السيليسي التفاعل الكيميائي للجير الناتج عن تمييه الاسمنت مع مسحوق الألمنيوم و ذلك عبر مرحلتين الاولى بدون اضافة هذا الاخير و تغير الرمل و مقارنتها مع النتائج بعد اضافة مسحوق الألمنيوم في المرحلة الثانية النتائج المتحصل عليها توضح ان الطريقة المقترحة لتخفيف الخرسانة تعتبر الى حد ما مقبولة من حيث تخفيف الناقلية الحرارية للمواد المنتجة الا ان نسبة انخفاض الكتلة الحجمية للرمل الكلسي متقاربة مع نتائج الخاصة بالرمل السيليسي على عكس مقاومة الانسجام بالنسبة لهذا الاخير اذا ما قورنت بالرمل الكلسي فهي منخفضة رغم انها تعتمد على نفس التركيبة مكونة من الرمل الاسمنت و الجير الكلسي بنسب معينة .

و نلاحظ في الاخير ان النتائج المتحصلة عليها بالنسبة للكتلة الحجمية و مقاومة الانسجام و المسامية و الناقلية الحرارية في تركيبة التي تتكون من الرمل الكلسي متقاربة مع النتائج المكونة من الرمل السيليسي لكن هذا الاخير هو الاحسن استعمالا في مواد البناء بعد هذه الدراسة .

الكلمات المفتاحية: مواد البناء ، الخرسانة الخلوية ، الرمل الكلسي، الرمل السيليسي ، مسحوق الألمنيوم، الاسمنت، الجير الكلسي.

Résumé :

Ce travail fait partie d'un vaste domaine de recherche qui consiste à évaluer et exploiter les matériaux locaux de la ville de Laghouat (sud de l'Algérie) dans le développement de matériaux de construction.

L'objectif principal du travail présenté est d'étudier l'effet de la porosité sur le comportement physico-mécanique et thermique du béton cellulaire élaboré à partir d'un sable calcaire et siliceux obtenu par réaction avec la poudre d'aluminium. L'allègement de ces bétons est obtenu par réaction de l'aluminium avec la chaux libérée au cours d'hydratation de ciment et pour accélérer ce processus on a ajouté dans la matrice la chaux aux plusieurs dosage afin d'augmenter la légèreté de ces bétons et garder une résistance suffisante qui répond aux exigences de ce type des bétons. Les résultats obtenus montrent une diminution de la densité et de la conductivité thermique des matériaux élaborés, mais que le pourcentage de réduction de masse du sable calcaire est proche des résultats trouver parla littérature contrairement à la résistance mécanique.

Les résultats obtenus pour la densité apparente, la résistance mécanique, la porosité et la conductivité thermique dans les compositions élaborées pour les deux sables sont très proches, mais on remarque que les résultats produit par le sable siliceux est peu mieux que le sable calcaire.

Les mots clés : Les matériaux de construction, béton cellulaire, le sable calcaire, le sable siliceux, Poudre d'aluminium, le ciment, la chaux.

Abstract

This work is part of a broad area of research that involves evaluating and exploiting local materials in the city of Laghouat (southern Algeria) in the development of building materials. The main objective of the work presented is to study the effect of porosity on the physico-mechanical and thermal behavior of cellular concrete made from limestone and siliceous sand obtained by reaction with aluminum powder. The lightening of these concretes is obtained by reaction of the aluminum with the lime released during the hydration of cement and, to accelerate this process, lime has been added to the matrix in several doses in order to increase the lightness of these concretes. and keep sufficient strength that meets the requirements of this type of concrete. The results obtained show a decrease in the density and the thermal conductivity of the materials developed, but that the percentage of mass reduction of the calcareous sand is close to the results found by the literature contrary to the mechanical resistance.

the results obtained for the apparent density, the mechanical strength, the porosity and the thermal conductivity in the compositions elaborated for the two sands are very close, but one notices that the results produced by the siliceous sand is little better than the limestone sand.

Key words: Building materials, cellular concrete, the calcareous sand, the siliceous sand, aluminium powder, the cement, the lime.

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des photos	
Liste des symboles	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
CHAPITRE I .REVUE SUR LA DOCUMENTATION	
I-Béton de sable	4
I-1 Introduction	4
I-2 Définition du béton de sable	5
I-3 Constituants du béton de sable	5
I-3-1 Le sable	5
I-3-2 Le ciment Portland	5
I-3-2-1 Le ciment portland artificiel (CPA-CEM I)	6
I-3-2-2 Le ciment portland composé (CPJ-CEM II)	6
II- Les bétons légers gras	7
II-1 Historique	7
II-2 Définition et classification	8
II-3 Types de bétons légers	12
II-3-1 Béton à agrégats légers	12
II-3-2 Le béton caverneux	16
II-3-3 Les Bétons cellulaires	17
II-4 Avantages et inconvénients des bétons légers	17
• Avantages	17
• Inconvénients	18
II-5 Propriétés mécaniques des bétons légers	19
II-5-1 Porosité	19
II-5-2 Légèreté	20
II-6 Comportement et performances mécaniques	20
II-7 Sensibilité à l'eau	22
II-7-1 L'absorption	22
II-8 Propriétés thermiques	23
III- Le Béton cellulaire	25
III-1 Historique	25
III-2 Définition	25
III-3 Les différents types de béton cellulaire	26
III-3-1 Béton cellulaire obtenue par réaction chimique : (béton à gaz)	26
III-3-2 Béton cellulaire obtenue par réaction physique : (béton mousse)	26
III-3-3 Béton micro cellulaire	26
III-4 Avantages et Inconvénients du béton cellulaire	26
• Les avantages	26
• Les inconvénients	27
III-5 Classification du béton cellulaire	27

III-6 Propriétés du béton cellulaire.....	28
III-6-1 La structure.....	28
III-6-2 La densité.....	29
III-6-3 La résistance à la compression.....	29
III-6-4 Porosité du béton cellulaire	30
III-6-5 Conductivité thermique.....	32
CHAPITRE II. CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES	
II-1 Caractérisation des matériaux.....	35
II-1-1 Introduction	35
II-1-2 Caractérisation des matières premières	35
II-1-2-1 Le sable	35
Sable calcaire.....	35
Sable siliceux	35
II-1-2-1-1 Masse volumique	36
Masse volumique apparente	36
Masse volumique absolue	37
II-1-2-1-2 Analyse granulométrique (NF P94-056)	38
II-1-2-1-3 Equivalent de sable (NF P 18-597)	39
II-1-2-1-4 Les résultats des essais effectués sur le sable	40
II-1-2-2 Le ciment.....	41
II-1-2-2-1 Masse volumique (NF P 18-555)	42
Masse volumique absolue	42
II-1-2-2-2 Mesure de la finesse (EN 196-6)	43
II-1-2-2-3 Analyse minéralogique par diffraction	44
II-1-2-3 La chaux.....	45
II-1-2-4 Aluminium.....	46
II-1-2-5 L'eau de gâchage.....	47
II-2 Techniques expérimentales.....	47
II-2-1 Essai d'écoulement (NF P18-452) maniabilimètre B.....	47
II-2-2 Conservation des éprouvettes.....	48
II-2-3 Essai de résistance à la compression.....	49
II-3 Elaboration du béton cellulaire	50
II-3-1 Procédé de malaxage.....	50
II-3-2 La porosité totale.....	50
II-4 Caractéristiques thermiques	53
II-4-1 Technique de la Hot Disk.....	53
II-4-1-1 Démarche expérimentale	53
CHAPITRE III. MATERIAUX ET RESULTATS EXPERIMENTAUX	
III-1 Introduction.....	57
III-2 Dosage en constituants des mortiers élaborés.....	57
III-3 Etude d'ouvrabilité	59
III-4 Comportement mécanique d'un béton cellulaire	61
III-5 Influence de dosage en aluminium et le dosage en liant sur la densité.....	62
III-6 Influence de dosage en aluminium sur la porosité totale et la porosité accessible à l'eau.....	64

III-7 Influence de rapport C/L sur la porosité totale et la porosité accessible à l'eau	66
III-8 Influence de dosage en aluminium sur la résistance à la compression.....	67
III-9 La modélisation (formules empirique) reliant la résistance à la compression et la porosité	68
III-10 Caractérisations thermiques.....	70
III-11 Influence de la masse volumique sur la conductivité thermique	70
III-12 Influence de la porosité totale sur la conductivité thermique	72
III-13 Influence de la résistance à la compression sur la conductivité thermique	73
III-14 Influence de la différence mélange élaboré sur la conductivité thermique	73
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	75
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	76

Liste des figures :

Figure I.1 : Représentation schématique des différents types de béton léger	09
Figure I.2 : Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats	11
Figure I.3 : Structure des bétons légers	13
Figure I.4 : Porosité du béton	19
Figure I.5 : La résistance à la compression 28j en fonction de la masse volumique.....	21
Figure I.6 : Trois types de porosité présente dans les matériaux	22
Figure I.7 : Conductivité thermique λ en fonction de la teneur en eau massique ω du matériau	23
Figure I.8 : Distribution porale cumulée du béton cellulaire autoclave	30
Figure I.9 : Exemple d'image binaire (taille réelle 17mm ×17mm) de béton cellulaire ($\rho=400\text{kg/m}^3$)	31
Figure I.10 : Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves en fonction du diamètre des pores	31
Figure I.11 : Distribution porale volumique du béton cellulaire autoclave	32
Figure I.12 : Conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique sèche du béton cellulaire	33
Figure I.13 : Evolution de la conductivité thermique du béton cellulaire en fonction de sa masse volumique jusqu'au non- expansé	33
FigureII.1 : Courbe granulométrique du sable de calcaire et du sable siliceux	39
Figure II.2 : Schéma illustrative de l'équivalent de sable	40
Figure III.1: Variations du temps d'écoulement en fonction du rapport E/L pour le sable calcaire.....	60
Figure III.2: Variations du temps d'écoulement en fonction du rapport E/L pour le sable siliceux.....	60
Figure III.3 : Variation de la résistance mécanique en fonction de l'Age (SC)	62
Figure III.4 : Variation de la résistance mécanique en fonction de l'Age(SS).....	62
Figure III.5 : Variation de la masse volumique apparente en fonction de dosage en aluminium pour le sable calcaire et siliceux	63
Figure III.6 : Variation de la masse volumique apparente en fonction de rapport C/L pour le sable calcaire et siliceux.....	63
Figure III.7 : Variation de la porosité totale en fonction de dosage en aluminium	64
Figure III.8 : Variation de la porosité accessible à l'eau en fonction de dosage en aluminium	65
Figure III.9 : Variation de la porosité totale en fonction de dosage en aluminium.....	65

Liste des figures :

Figure III.10 : Variation de la porosité accessible à l'eau en fonction de rapport C/L.....	66
Figure III.11 : Variation de la porosité totale en fonction de rapport C/L.....	66
Figure III.12: Variation de P_{acc}/P_t en fonction de rapport C/L de deux types de sable	67
Figure III.13 : Variation de la résistance à la compression en fonction de dosage en aluminium pour les différents types de sable.....	67
Figure III.14 : Relation entre la résistance à la compression et la porosité totale.....	69
Figure III.15 : Variation de la conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique apparente pour le sable calcaire.....	71
Figure III.16 : Variation de la conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique apparente pour le sable siliceux.....	71
Figure III.17: Variation de la conductivité thermique λ en fonction de La porosité totale pour le sable calcaire.....	72
Figure III.18 : Variation de la conductivité thermique λ en fonction de La porosité totale pour le sable siliceux.....	72
Figure III.19: Variation de la conductivité thermique λ en fonction de la résistance à la compression (SC, SS).....	72
Figure III.20 : Variation de la conductivité thermique λ pour les différentes mélanges élaborées le sable calcaire.....	73
Figure III.21 : Variation de la conductivité thermique λ pour les différentes mélanges élaborées le sable siliceux.....	73

Tableau I.1 : Les constituants et les additions du ciment	06
Tableau I.2 : Classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87.....	10
Tableau I.3 : Classification des bétons légers selon Kass J.L. et Compbell D (1972)	10
Tableau I.4 : différent classe de porosité	20
Tableau I.5 : Caractéristiques de quelques bétons légers	21
Tableau I.6 : Porosité ouverte des granulats et béton cellulaire et proportion capillaire de diamètre $>2\ \mu\text{m}$	22
Tableau I.7 : Valeurs de la conductivité thermique recommandées par Loudon et Stacey	24
Tableau I.8 : Classification du béton cellulaire selon la masse volumique et la résistance à la compression.....	28
Tableau I.9 : Résistance à la compression du béton cellulaire selon la densité	29
Tableau I.10 : Formules empiriques reliant la résistance à la compression et la porosité	30
Tableau I.11 : Caractéristiques thermiques de quelques bétons	34
Tableau II.1 : Caractéristiques physiques de sable calcaire et siliceux	41
Tableau II.2: Caractéristique chimique et physique de ciment.....	45
Tableau II.3: Caractérisation chimique et physique du la chaux.....	46
Tableau II. 4 : Composition chimique de l'eau de gâchage (mg/l).....	47
Tableau II.5: Condition d'essai de conservation des éprouvettes.....	48
Tableau III. 1 : Composition en pourcentage massique des différents mélanges élaborés SC.....	59
Tableau III.2 : Composition en pourcentage massique des différents mélanges élaborés SS.....	59
Tableau III.3 : Les résultats de la modélisation reliant la résistance à la compression et la porosité.....	69
Tableau III.4 : Les résultats de la conductivité thermiques à l'état sec et humide pour les deux sables étudiées.....	70

Liste de Photo

Photo I.1 : Différents granulats légers naturels	14
Photo I.2 : Différents granulats légers artificiels	16
Photo I.3 : Béton normal à gauche et béton léger à droite Ayants le même poids	18
Photo II.1 : Provenance de sable calcaire et siliceux.....	36
Photo II.2 : Méthode de récipient	37
Photo II.3 : Méthode l'éprouvette graduée	38
Photo II.4 : Méthode de l'équivalent de sable	40
Photo II.5 : Sac de Ciment.....	42
Photo II.6 : Densimètre de Chatelier	43
Photo II.7 : Perméabilimètre de Blaine	44
Photo II.8 : Diffractomètre aux rayons X de l'université de Laghouat.....	44
Photo II.9 : Sac de la Chaux.....	46
Photo II.10 : La chaux poudre.....	46
Photo II.11 : Poudre d'aluminium	47
Photo II.12 : Maniabilimètre B (180x90x90mm)	48
Photo II.13 : Conservation à l'air libre	48
Photo II.14 : Photos de l'essai d'écrasement	49
Photo II.15 : Malaxeur normalisé pour pate et mortier	50
Photo II.16 Les échantillons utilisés pour l'essai accessibilité à l'eau.....	51
Photo II.17 : dispositif de l'essai accessibilité à l'eau	52
Photo II.18 : Mesure de propriétés thermique à l'aide du system « Hot Disk ».....	54
Photo II.19 : La sonde Hot Disk	54
Photo II.20 : Dispositif de serrage.....	54
Photo III.1 : Forme des pores dans la matrice.....	61

Liste des symboles

$D_{\max}$: Diamètre maximal

G : Gravillon

S : Sable

SC : Sable calcaire

SS : sable siliceux

Ch : Chaux

AL : Aluminium

BGL: Béton de granulats légers

ρ : La masse volumique (kg/m^3)

Rc: Résistance à la compression

λ : Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)

λ_{sec} : Conductivité thermique du matériau à sec

λ_{hum} : Conductivité thermique du matériau à saturation

P : Porosité

E/C : Rapport eau/ciment

ρ_a : La masse volumique apparente

M : Masse du matériau

V : Volume totale de l'échantillon

Mt : Masse totale

M_R : Masse du récipient

ρ_{ab} : La masse volumique absolue

Ms : Masse des grains solides

V1 : Volume de l'eau

V2 : Volume total (grains + solide)

Mf : Module de finesse

Cu : Coefficient d'uniformité

Symboles

Cc : Coefficient de courbure

ESp : Equivalent de sable au piston

ESV : Equivalent de sable visuel

h1 : Hauteur de sable propre+ éléments fins (hauteur total des grains solide)

h2 : Hauteur propre seulement

M1 : Masse de (cellule+ benzène)

M2 : Masse de (cellule + benzène + ciment)

V1 : Volume initial de benzène

V2 : Volume final de benzène

S : Surface spécifique (cm^2/g)

K : Constante de de l'appareil

e : Porosité de la couche tassée

t : Temps mesuré en secondes

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

Ef : La diffusivité thermique

E/L : Rapport eau/liant

C/L : Rapport ciment/liant

L : Liant : ciment + chaux

Pt : Porosité total

Pacc : Porosité accessible

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 d'ouvrabilité, de performances mécaniques, de durabilité, d'aspect et d'environnement. Dans ce but. Plusieurs types de béton sont apparus ces dernières années, y compris le béton cellulaire léger, ce qui est l'objectif principal de ce travail en étudiant l'effet de la porosité sur propriétés physiques et le comportement mécanique et thermique du béton cellulaire élaborées à partir de deux types de sable locaux, un siliceux et l'autre calcaire en utilisant la poudre d'aluminium comme agent expansif qui réagit avec les liant employées qu'est dans notre cas la chaux et le ciment.

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

Dans l'optique d'une valorisation du sable calcaire et siliceux de la région de Laghouat (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 des maisons, 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 thermique d'un béton cellulaire à base de sable calcaire et siliceux obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent.

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

- Le premier chapitre est consacré à un revue sur la documentation relative aux ajouts minéraux et les bétons légers, en particulier le béton cellulaire et la 2^{ème} 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 thermique du béton cellulaire à base de liant (ciment, chaux) et des sables utilisées (calcaire, siliceux).

Le travail expérimental est subdivisé en deux volets:

- Le premier consiste en la recherche d'une composition optimale en se basant sur des essais rhéologiques basant sur les mélanges sable (siliceux ou calcaire) et Liant (ciment, chaux), les mélangés adoptées sont les mélanges ayant un temps d'écoulement compris entre 2s et 5s.

- Le deuxième consiste en l'étude d'un procédé d'allégement du béton des sables étudiés à composition optimale par entrainement d'air dans la matrice par réaction chimique avec la poudre d'aluminium et par la suite on mesure les résistances mécaniques et déterminer ces performances thermiques aux états extrêmes, l'état sec et saturé.

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

Chapitre I

Revue sur la documentation

I-Béton de sable

I-1Introduction :

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 certaines régions, il y a un certain intérêt pour un tel matériau. Le coût élevé du transport et des problèmes écologiques créés par l'extraction d'agrégats de la 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 spécificité béton de sable a été définie dans la norme NF P 18 500, adoptée 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 des fines 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 l'utilisation comme sable de construction du fait d'une teneur en fines ($d \leq 80 \mu m$) supérieure à 15% (limite normative actuelle). 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.

Pour améliorer et minimiser cette situation, il est important de valoriser 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 certaines recherches récentes.

Plusieurs recherches ont été menées dans 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 confection. Les résultats obtenus à partir de ces études montrent que la limite tolérée de contenu charges varient d'un pays à l'autre 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 le béton 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,...) utilisés dans le béton traditionnel peuvent également être incorporés au mélange. L'incorporation de gravillons d/D autorise l'appellation « béton de sable » tant que le rapport massique G/S reste inférieur aux normes préconisées (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 aux usages traditionnels du béton) ;
- Il se distingue d'un béton ordinaire par son dosage en sable(s) élevé, 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 bâtiments 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 eux les grains de sable et les granulats. Mis au point au début du XIXe 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 I) :

C'est le produit résultant de la mouture de clinker, obtenu par la cuisson, dans des conditions de durée et de températures 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 II) :

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

(Clinker) + (autres constituants) + (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 prise	Hydraulique	Pouzzolane	Inerte	Additifs
Clinker	Gypse Anhydrite	Laitier de haut fourneau Cendres volantes de lignite	Cendres volantes Argile calcinée Fumée 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-Romains et continue aujourd'hui avec les roches volcaniques poreuses mais ces ressources sont limitées aux régions d'activités volcaniques.

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. Hayde¹, 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. Straub¹ commença 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 granulat léger 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 granulat de schiste expansé. Richart et Jensen² (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 ont permis 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 le National Housing Agency³, des études furent entreprises simultanément dans les laboratoires du National Bureau Standards⁴ et de l'U.S Bureau of réclamations⁵ afin de déterminer les propriétés du béton fabriqué avec une gamme très large de granulats. Ces études et les premiers travaux de Richart et Jansen attirèrent l'attention et suscitèrent un regain d'intérêt à l'égard de l'allègement 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 disponibles, il est aujourd'hui possible de fabriquer des bétons légers à 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 100MPa 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 métalliques 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/m^3 [17] ; la commission l'American Concrete Institute limite [18]. 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).

Evidemment, 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

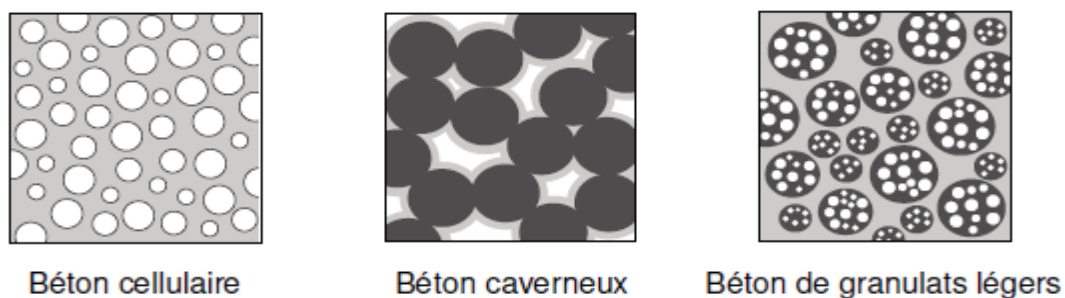


Figure I.1 : Représentation schématique des différents types de béton léger [19]

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, classées 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 (BGL) dont la masse volumique est comprise entre 1350 et 1900 kg/m³, comme son nom l'indique, ce béton est utilisé pour des applications structurales et présente une résistance à la compression minimale de 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 ACI 213R-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 ACI 213R-87[20]

Classification	ρ (kg/m ³)	Rc (MPa)
Béton léger de structure	1350-1900	>17
Béton léger de résistance modérée	800-1350	7-17
Béton de faible résistance	300-800	<7

Une classification fonctionnelle est recommandée par la RILEM [20], basée sur les travaux de Kass J.L. et Compbell 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 Compbell D (1972)[22]

Type de béton léger	De construction	De construction et d'isolation	D'isolation
Masse volumique (kg/m ³)	<1800	Non précise	Non précise
Résistance à la compression (MPa)	>15	>3,5	>0,5
Conductivité thermique (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 :**

Leurs masses volumiques apparentes sont comprises entre **300 et 1000 kg/m³**, leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes.

- **Des bétons porteurs isolants :**

Leurs masses volumiques apparentes sont comprises 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 :**

Leurs masses volumiques sont comprises 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.

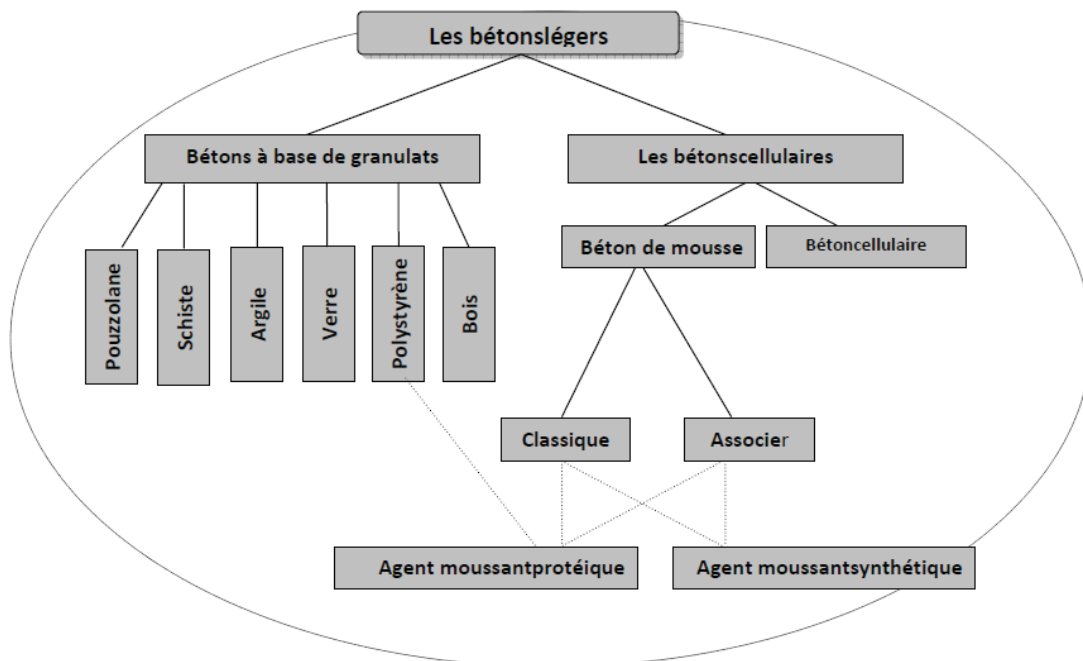


Figure I.2 : Classification des bétons légers d'après Lafarge Bétons Granulats [23]

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,
- Bétons caverneux,
- Bétons cellulaires,

II-3-1 Béton à agrégats légers

La masse volumique du béton peut varier d'un peu plus de 300 à environ 1850 kg/m³ et la Résistance à la compression 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 bulles 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 bons isolants 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].

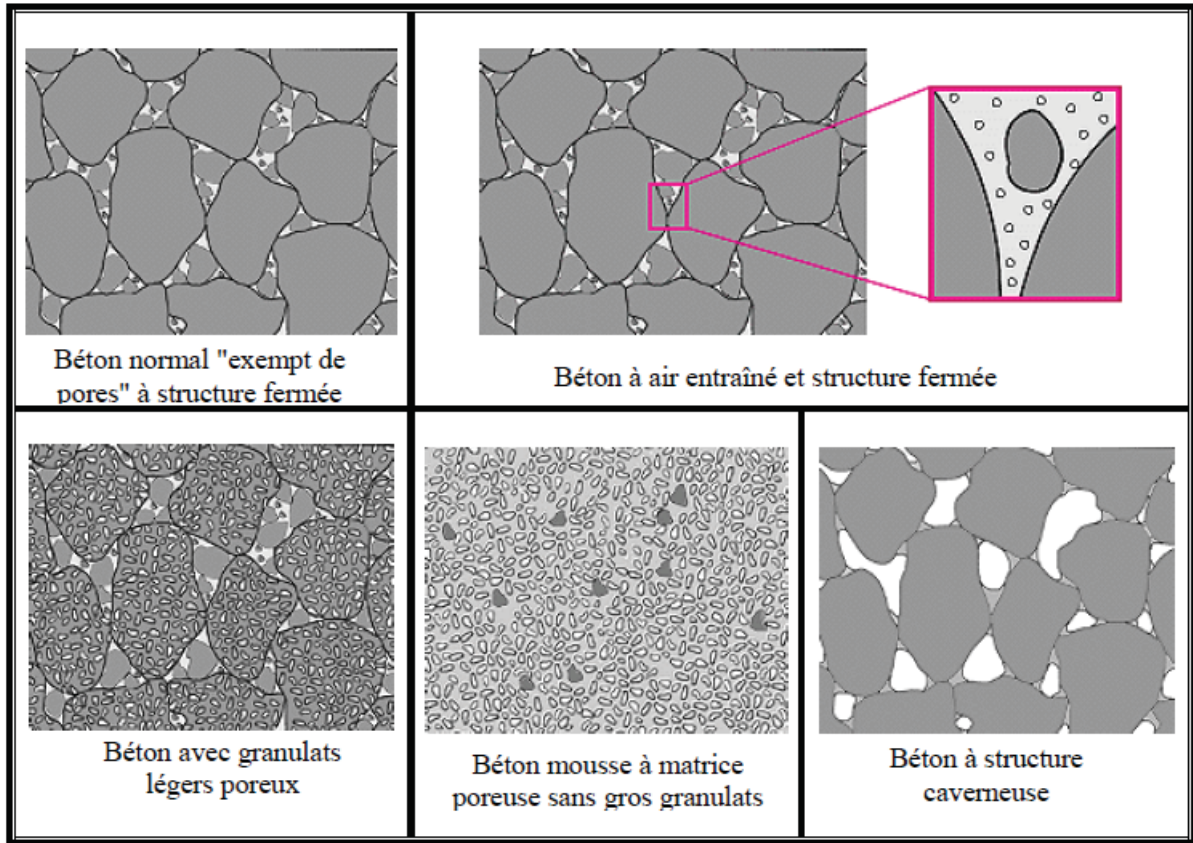


Figure I.3 : Structure des bétons légers [25]

❖ *Différents types de granulats légers*

Les granulats légers se différencient des autres granulats par leur faible masse volumique, celle-ci est inférieure à 1200 kg/m^3 selon Rilem [21], tandis que celle de la pierre naturelle est de 2700 kg/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 cendres volcaniques et le tuf. À 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 préparés qui n'ont subi que de traitements 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.



Pierre ponce



OPS



Diatomite



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 certaines 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 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 conséquent, 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 expansée et la vermiculite exfoliée.

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

c) Matériaux organiques

Produits organique, naturels ou artificiels, 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 environnemental et l'apport économique de ce type de granulats. Le polystyrène expansé (PSE) élément utilisé 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 alimentaires.

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 le gros granulat par rapport au mortier [30].

La photo I-2 présente quelques exemples de granulats artificiels



Argile expansée



Schiste expansé



Laitier refroidi à l'air



Laitier expansé



Cendre volante



PSE

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

II-3-2 Les bétons caverneux

Ces bétons sont composés d'un mélange de granulats normaux ou légers, enrobés de pâte de ciment le collant entre eux. La pâte de ciment ne remplit pas la totalité des vides interstitiels, et de l'air reste contenu entre les granulats. Il s'agit de bétons dont on a supprimé tout ou partie de l'élément fin et du liant correspondant servant à son enrobage. Ces bétons ont donc une porosité élevée; ils sont drainant [31]. Buts recherchés : béton économiques, gains de poids, bonne isolation thermique[32].

II-3-3 Les 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): où les alvéoles sont obtenues par l'adjonction d'un produit chimique générateur de gaz jouant le rôle d'une levure (poudre d'aluminium ou de zinc, eau oxygénée, ou carbures de calcium par exemple) [17].

- **Le béton mousse** (obtenue par réaction physique): où les cavités résultent de l'adjonction de substances 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 autres d'utiliser des portées plus longues ou de diminuer les sections des 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 volumiques,
- ✓ 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 coûts de transport et d'installation,
- ✓ Capables de jouer un rôle en tant qu'isolant thermiques et acoustiques compte 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 acoustiques d'un matériau de construction (matériau multi-usage),
- ✓ 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 instantanée et différée plus grandes),

*Les bétons légers sont néanmoins des matériaux 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 des valeurs élevées,

*Sensibilité aux variations hygrothermiques plus grandes,

*Un dosage en ciment plus élevé, ce qui explique un surcoût.

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.

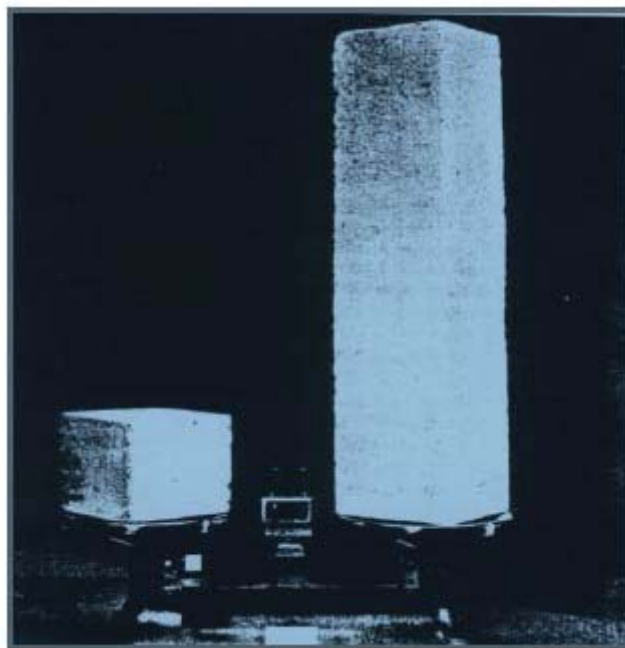


Photo I.3 : Béton normal à gauche et béton léger à droite
Ayants le même poids [11]

II-5 Propriétés mécaniques des bétons légers

II-5-1 Porosité

Le béton est constitué de plusieurs éléments solides (granulat, 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 granulat 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 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 liant (m^3)

V_{liant} : volume total occupé par la pâte de liant (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.

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

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

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

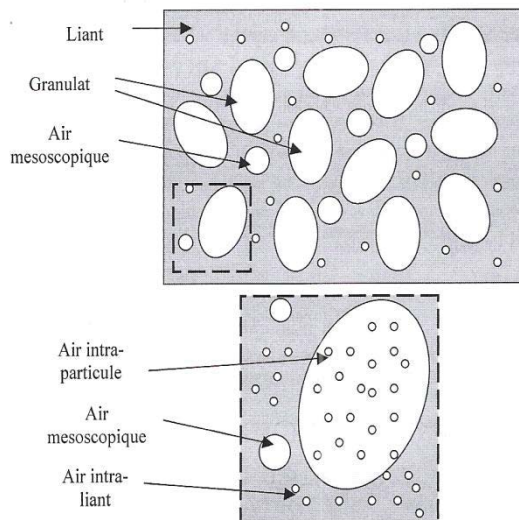


Figure I.4 : Porosité du béton

Tableau I.4: différentes classes de porosité [21]

Rayon des pores	Classe	Etat 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 mécaniques 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 contenant 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 de performances des bétons légers sont inférieurs à ceux des matériaux usuels de construction, puisque les granulats légers possèdent une porosité propre, qui 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 campagnes expérimentales ont mis en relation performances mécanique et 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 en compressions et la masse volumique (**figure I-5**)

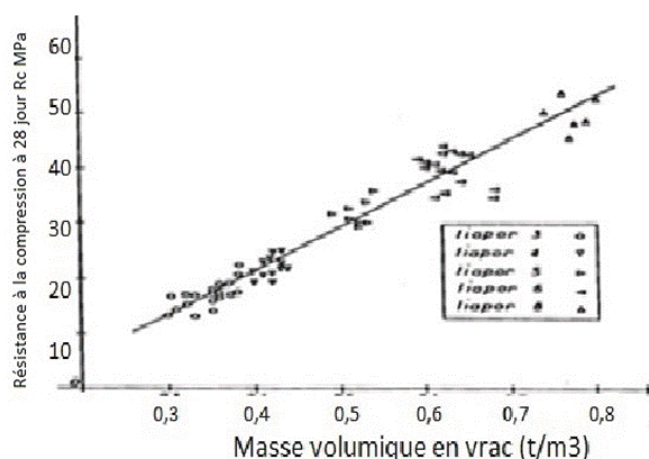


Figure I.5 : La résistance à la compression 28j en fonction de la masse volumique [22]

Tableau I.5 : Caractéristiques de quelques bétons légers

	Constituants			(kg/m³)	Porosité	R _C (MPa)	E(GPa)	R m/ml
	Nom	Masse (Kg)	Volume (m³)					
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%	-		
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			350-650	75à82%	5	2 à 3	2.10 ⁻³
	Air							
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. Les pores ne participent pas au phénomène d'absorption.

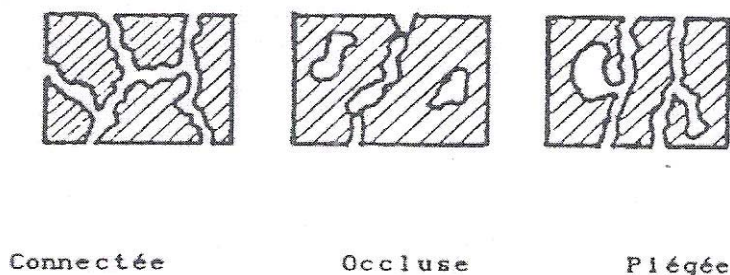


Figure I.6 : Trois types de porosité présente dans les matériaux

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 diamètre > 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.

II-8 Propriétés thermiques

La conduction thermique λ est le flux de chaleur par mètre carre, 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

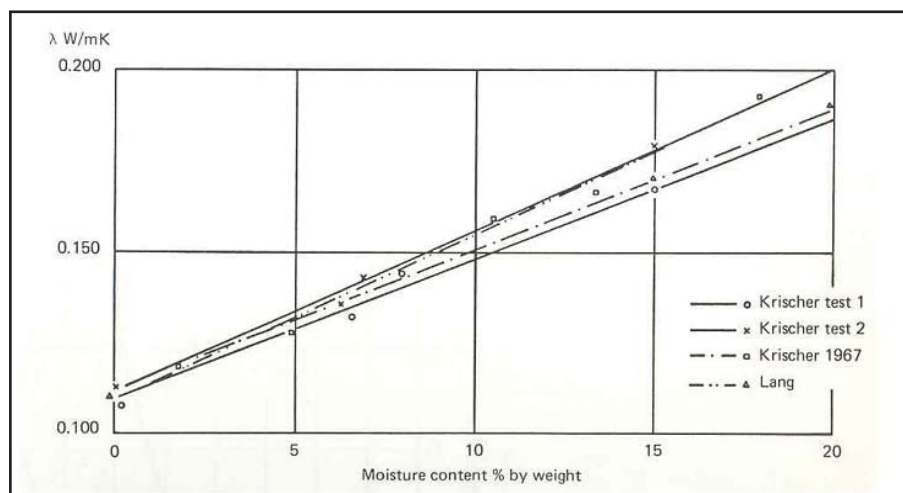


Figure I.7 : Conductivité thermique λ en fonction de la teneur en eau massique ω du matériau [13]

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

Conductivité ($\text{W m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)								
	Pour un protégé des intempéries				Pour un béton exposé aux intempéries			
Teneur En eau (%)	5	5	5	2.5	8	8	8	5
Masse volumique	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	0,794	0,706				0,808
1760		0,649	0,952	0,838				0,952
1920				1,056				1,194
2080				1,315				1,488
2240				1,696				1,904
2400				2,267				2,561

III- Le Béton cellulaire

III-1 Historique

La première invention, qui date de **1880**, est attribuée à **W. Michaelis**. Ce dernier a 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 parvenu 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 du béton cellulaire, composé d'un mélange de sable fin, de chaux et 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 étape 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 coupés 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 :

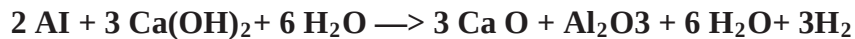
- poudre d'aluminium
- agent moussant
- Entraîneur d'air.

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 sont 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 et Inconvénients du béton cellulaire

- **Les avantages :**

- 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 découpes 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.

- **Les inconvénients :**

- Mais cette pose n'est pas rendue très aisée par le caractère friable du béton cellulaire. Si vous tentez de le couper, ou si vous le heurtez en le transportant, vous aurez de mauvaises surprises...
- D'autre part, le béton cellulaire nécessite une protection contre l'humidité à l'extérieur. Sinon, à long terme, le matériau se dégrade sous l'effet de la pluie, et absorbe toute l'humidité extérieure.
- Une préoccupation demeure concernant son réel impact sur la santé humaine : il serait possible que les composants agissent sur le corps humains à force d'y être exposé...
- Enfin, les propriétés d'isolation phonique du béton cellulaire ne sont pas exceptionnelles par rapport à des isolants classiques.

III-5 Classification du béton cellulaire

Basons 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 et la durée suggérée par plusieurs auteurs (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 **NBN B 21-002** ainsi que les normes européennes **EN 771-4** 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

Classe ρ	Critères	Classe f	R_c (MPa)
$\rho 0.4$	$300\text{kg/m}^3 \rho 400\text{kg/m}^3$	$f2$	$R_c \geq 2$
$\rho 0.5$	$400\text{kg/m}^3 \rho 500\text{kg/m}^3$	$f3$	$R_c \geq 3$
$\rho 0.6$	$500\text{kg/m}^3 \rho 600\text{kg/m}^3$	$f4$	$R_c \geq 4$
$\rho 0.7$	$600\text{kg/m}^3 \rho 700\text{kg/m}^3$	$f5$	$R_c \geq 5$
$\rho 0.8$	$700\text{kg/m}^3 \rho 800\text{kg/m}^3$	$f6$	$R_c \geq 6$

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 μm** [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 de pore de béton cellulaire varient considérablement avec la composition et le mode de cure.

III-6-2 La densité

Le béton cellulaire dépend de la densité ($300-1800 \text{ kg/m}^3$), 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 une augmentation de la densité [37,40]. La valeur moyenne des résistances mécaniques utilisant des éprouvettes cubiques de densité sèche de 400 kg/m^3 a été rapportée égale environ 2 MPa ; pour une densité sèche de 700 kg/m^3 , elle a été rapportée à environ 6 MPa [23]. Un autre rapport a montré que pour une gamme de densité de 500 à 700 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 30-80% entre 28 jours et 6 mois et marginalement 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 compressive est réduite environ 20 et 25% respectivement. La résistance de **BCNA** et **BCA** utilisant les cendres volantes comme un remplacement partiel/complet des fillers a prouvé que l'utilisation des cendres volantes a abouti à un rapport résistance/densité plus élevé [38, 39, 40,41].

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 21-002** et **NBN B 21 004**. Les cellules sont plus petites dans un béton cellulaire de forte densité, ce qui accroît la largeur de leur paroi, et par conséquent leur résistance. Cette caractéristique 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
R_c	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 R_c du béton cellulaire autoclave en fonction de la porosité, voir **tableau I.5**.

Tableau I.10 : Formules empiriques reliant la résistance à la compression, la composition et la porosité [23]

	Rc ou σ (MPa)	Constantes de calage	Paramètres
Féret modifié (béton de mousse)	$RC=K (1(1+E/C+A/C j))^{\alpha}$	K, α	E/C : rapport eau/ciment A/C: rapport air/ciment
Schiller	$\sigma = Ks. \ln (\varepsilon_0 / \varepsilon)$	Ks	ε : porosité du béton cellulaire ε_0 : porosité critique à résistance nulle
Bal 'Shin	$\sigma = \sigma_0 (1 - \varepsilon)^n$	N	ε : porosité du béton cellulaire σ_0 : résistance à porosité nulle
Ryshkewitch	$\sigma = \sigma_0 \exp (-c\varepsilon)$	C	ε : porosité du béton cellulaire σ_0 : résistance à porosité nulle
Hasselman	$\sigma = \sigma_0 (1 - b\varepsilon)$	B	ε : porosité du béton cellulaire σ_0 : résistance à porosité nulle

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 μm) et les micropores (diamètre < 60 μm) avec une répartition de $\frac{3}{4}$ de macropores pour $\frac{1}{4}$ de micropores.

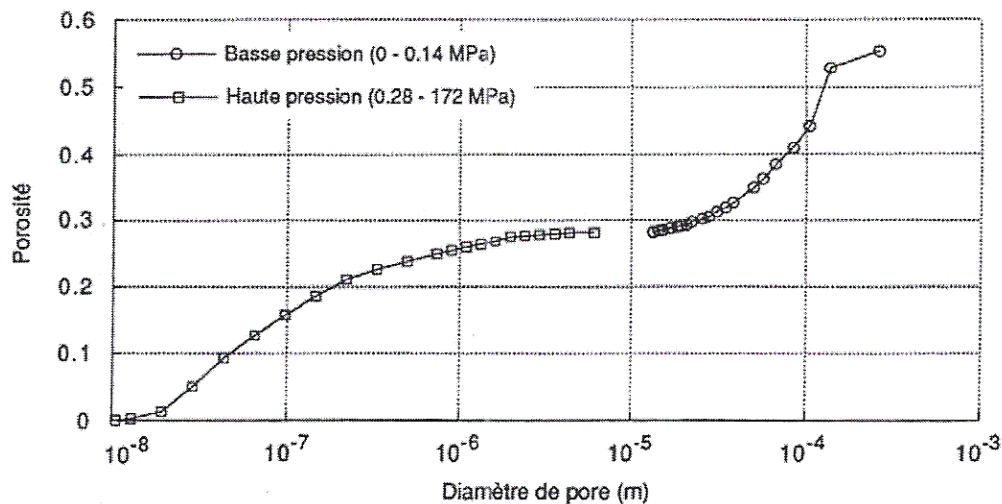


Figure I.8 : Distribution porale cumulée du béton cellulaire autoclave [42]

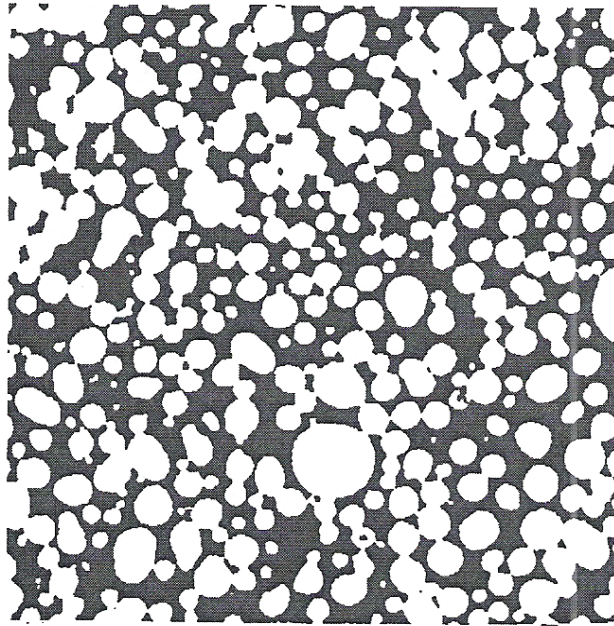


Figure I.9 : Exemple d'image binaire (taille réelle 17mm ×17mm) de béton cellulaire ($\rho=400\text{kg/m}^3$) [43]

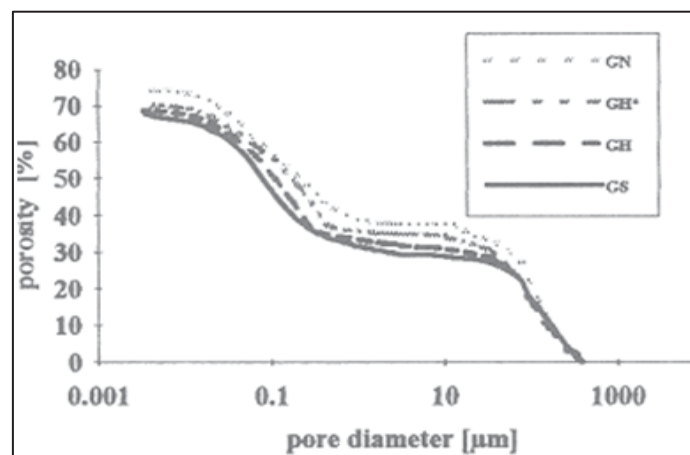


Figure I.10: Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves en fonction du diamètre des pores [22]

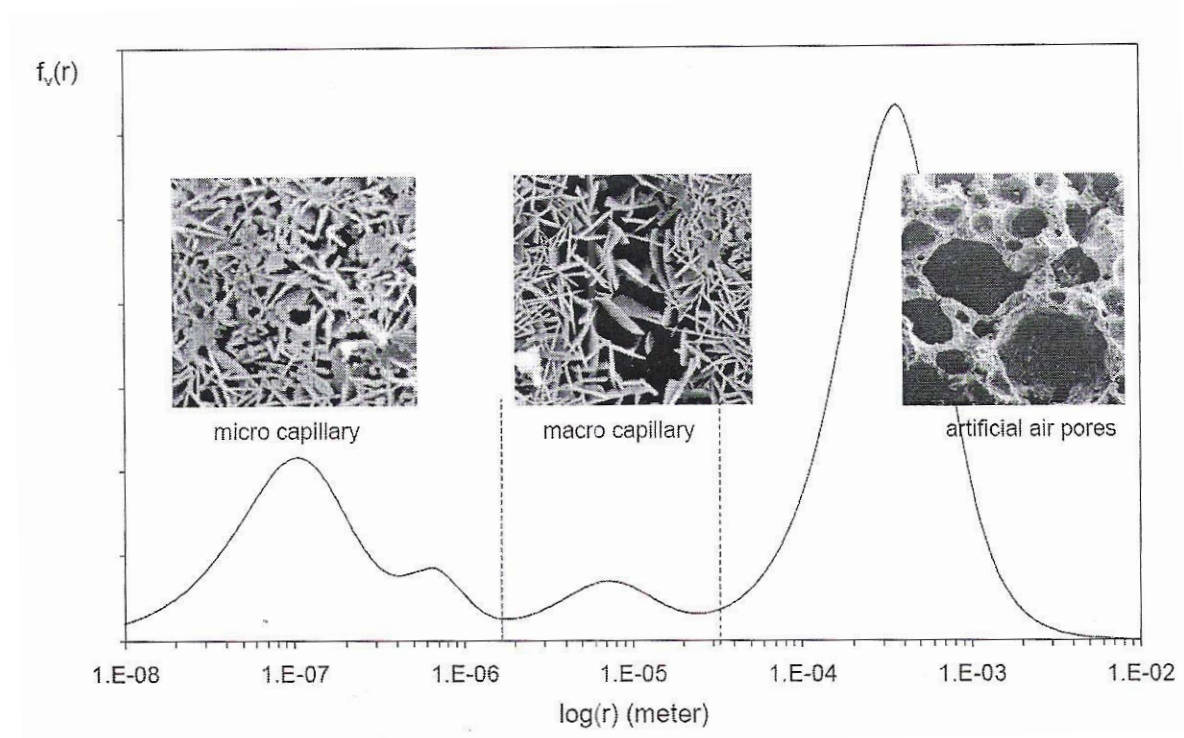


Figure I.11 : Distribution porale volumique du béton cellulaire autoclave [44]

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'autres facteurs comme le contenu d'humidité, le niveau de température, la structure poreuse et des matières premières 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** [23]. Comme attendu, la conductivité thermique augmente avec l'augmentation du contenu d'humidité [47]. La quantité des pores et sa distribution sont aussi des facteurs qui influent sur l'isolation thermique du béton cellulaire.

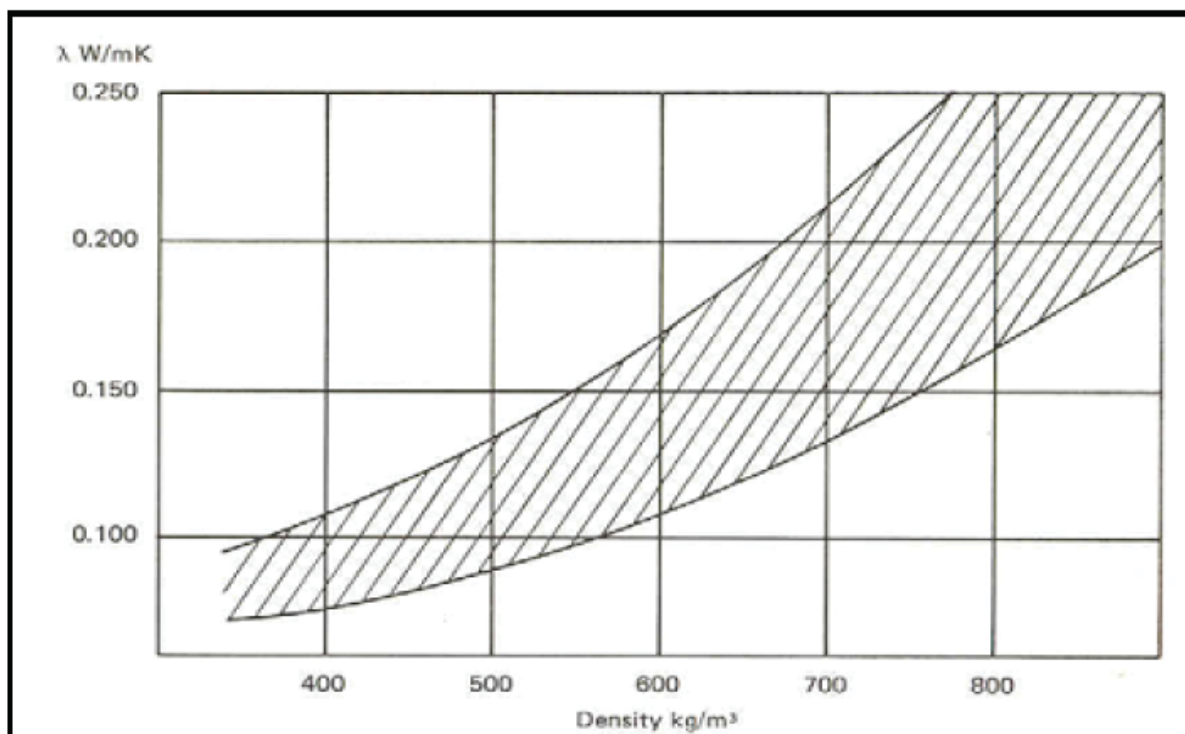


Figure I.12: Conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique sèche du béton cellulaire [23]

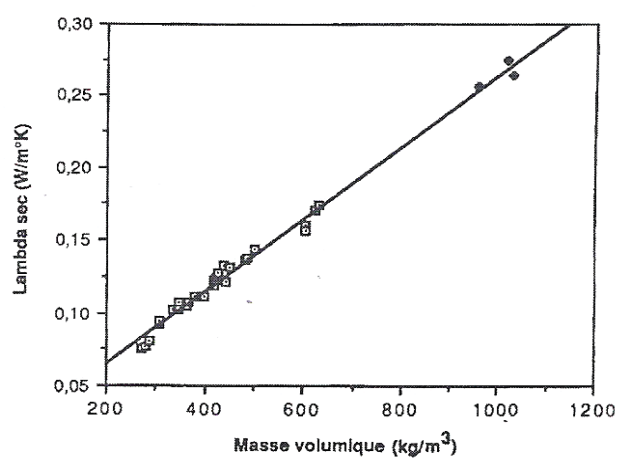


Figure I.13 : Evolution de la conductivité thermique du béton cellulaire en fonction de sa masse volumique jusqu'au non- expansé [48]

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

	ρ (kg/m ³)	Porosité (%)	C (J/kg. k)	λ (W/m. k)
Air	1,2	-	1000	0,026
Eau liquide	998	-	4180	0,602
Béton hydraulique	2330	8	1050	1,80 à 2,00
Béton argile expansé	1600	36	900	0,46
Béton cellulaire	350à650	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

Chapitre II

**Caractérisation des matières premières
et techniques expérimentales**

II-Caractérisation des matières premières et techniques expérimentales

II-1Caractérisation des matériaux

II-1-1Introduction

Dans ce chapitre nous définissons la composition et la provenance des matériaux pour la réalisation de ce travail, Nous précisons également les différentes méthodes d'essais utilisés ainsi que leurs modes opératoires et les références de leurs normes correspondantes afin de pouvoir convenablement interpréter les résultats obtenus par suite.

Les caractéristiques physico-mécaniques des mortiers sont étroitement liées à celles des différentes matières qui les composent, l'objectif de notre étude est d'évaluer expérimentalement les effets des fillers calcaire et siliceux sur les propriétés physico-mécaniques et thermiques du béton cellulaire à base de sable calcaire et sable siliceux (alluvionnaire).

II-1-2 Caractérisation des matières premières

II-1-2-1 Le sable

Sable calcaire :

Le sable calcaire 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)

Sable siliceux :

Le sable siliceux est issu des résidus de la station du pont d'Oued M'Zi. La provenance des matériaux est illustrée sur la Photo II.1 ci-dessous :



Photo II.1 : Provenance de sable calcaire et siliceux d'Oued M'zi

II-1-2-1-1 Masse volumique :

Les masses volumiques du sable employé sont mesurées selon la norme **NF P18-555**, on distingue alors :

Masse volumique apparente :

C'est la masse de l'unité de volume (compris les vides), elle est notée ρ_a et donnée par :

$$\rho_a = \frac{M}{V}$$

D'où M : masse du matériau

V : volume totale de l'échantillon.

Il s'agit de remplir un volume de 1dm^3 et on détermine la masse totale M_T , la masse de l'échantillon sera :

$$M = M_T - M_R. \text{ (} M_R \text{ est la masse du récipient)}$$



Photo II.2 : Méthode de récipient

Masse volumique absolue :

La masse volumique absolue est la masse de l'unité de volume absolue du sable. Pour la détermination de cette propriété physique, il existe plusieurs méthodes parmi ces derniers la méthode l'éprouvette graduée et celle du pycnomètre qui fréquemment utilisée car elle simple, le principe consiste à remplir une éprouvette graduée avec un volume V d'eau, ensuite à peser un échantillon M_s presque égale à 300g et à l'introduire dans l'éprouvette en éliminant toutes les bulles d'air, le liquide monte dans l'éprouvette jusqu'au nouveau volume absolue est alors déterminée par la formule suivante :

$$\rho_{ab} = \frac{M_s}{V_2 - V_1}$$

Avec :

M_s : Masse des grains solides.

V_1 : Volume de l'eau.

V_2 : Volume total (grains+ solide).



Photo II.3 : Méthode l'éprouvette graduée

II-1-2-1-2 Analyse granulométrique (NF P94-056) :

L'analyse granulométrique permet de classer et de définir la granulométrie des matériaux employés dans la construction, d'après la grosseur des grains et la forme de la courbe granulométrique. D'après cet essai on peut aussi identifier la finesse du granulat soumis à l'essai grâce au module de finesse (**NF P 18-360**) noté M_f et donné par la formule suivante :

$$M_f = \frac{\sum \text{refus cumulée en \% pondéral des tamis}(0,16 - 0,315 - 0,63 - 1,25 - 2,5 - 5\text{mm})}{100}$$

Le coefficient d'uniformité noté C_u et défini comme suit:

$$C_u = D_{60} / D_{10}.$$

Le coefficient de courbure, notée C_c et défini comme suite :

$$C_c = (D_{30})^2 / (D_{10} \times D_{60})$$

Le sable qui a été utilisé lors de cette étude, est un sable de concassage 0/1 mm, pour avoir (une bonne compacité, une bonne mise en œuvre surtout pour l'élimination de la partie expansé), provient de la station de concassage de Ouezzane.

Cette classification granulaire ce fait par l'analyse granulométrique par voie humide pour assurer l'élimination total des particules fines. Les résultats de l'analyse granulométrique du sable calcaire après le traitement sont donnés dans les deux tableaux suivants :

Pour une masse initiale : $M_1=1500\text{g}$ du sable calcaire

$M_2=1600\text{g}$ du sable siliceux

La courbe granulométrique du sable utilisé, est présentée sur la **Figure II-1** où nous constatons que le sable siliceux contient beaucoup plus des éléments que le calcaire, ce dernier sa courbe granulométrique est très proche du fuseau du sable normalisée.

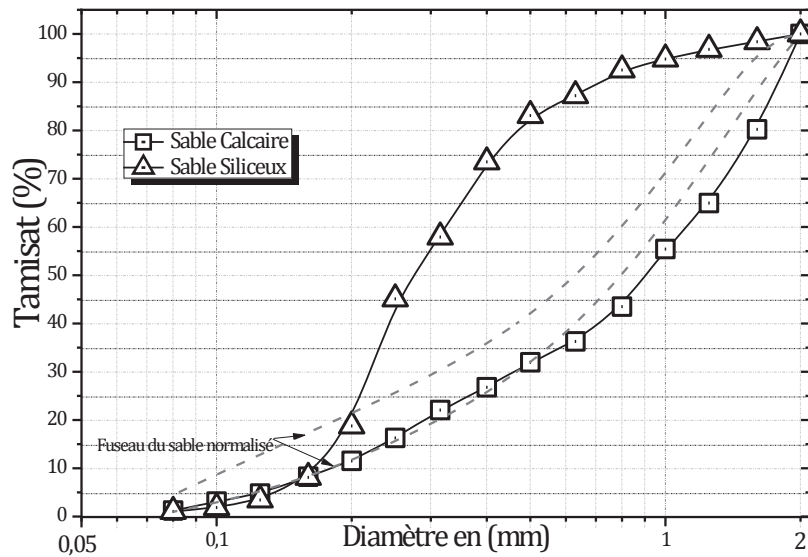


Figure II.1 : Courbe granulométrique du sable de calcaire et du sable siliceux

II-1-2-1-3 Equivalent de sable (NF P 18-597) :

Cet essai a pour but de mesurer la propreté des sables. L'essai consiste à séparer les flocules fins contenues dans le sable. Une procédure normalisée permet de déterminer un coefficient d'équivalent de sable qui quantifie la propreté de celui-ci.

L'essai est effectué sur la fraction 0/1 mm du sable à étudier. On lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on mesure les éléments suivants :

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

Hauteur h_2 : sable propre seulement.

On en déduit l'équivalent de sable qui, par convention est (figure II-2).

L'essai dit d'équivalent de sable-permet de déterminer le degré de propreté du sable.

$$ES = \frac{h_1}{h_2} 100$$

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine ESV (équivalent de sable visuel) ou ES (équivalent de sable au piston)

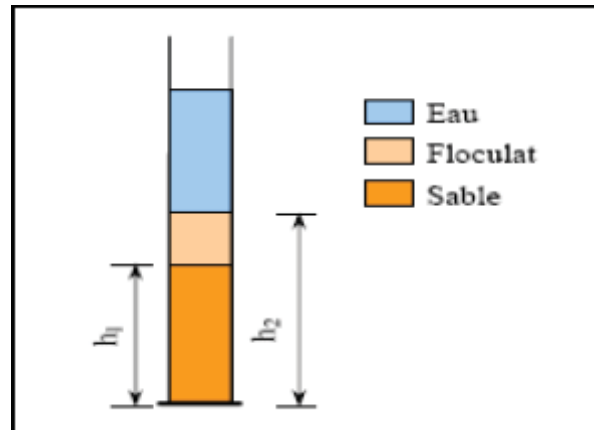


Figure II.2 : Schéma illustrative de l'équivalent de sable



Photo II.4 : Méthode de l'équivalent de sable

II-1-2-1-4 Les résultats des essais effectués sur le sable :

Les caractéristiques physiques des sables sont représentées dans le tableau II-1 :

Tableau II.1: Caractéristiques physiques de sable calcaire et siliceux

		Sable calcaire	Sable siliceux
Masse volumique apparente (g/cm ³)		1,61	1,51
Masse volumique absolue (g/cm ³)		2,61	2,5
Coefficient d'uniformité Cu(%)		6,588	2
Coefficient de courbure Cc(%)		1,111	0,945
Module de finesse Mf(%)		5,064	8,625
Diamètre<2mm (%)		100	100
Diamètre<80 μ m (%)		1,241	1,068
Equivalent de sable %	Visuel	81,625	82,85
	Piston	71,115	73,55

II-1-2-2 Le ciment:

Nous avons utilisé un seul type de ciment au cours de cette expérimentation. Il s'agit d'un ciment portland composé CPJ-CEM II /A 42.5 NA 442 (**MATINE**). Provenant de la cimenterie de LAFARGE usine de Msila.



Photo II.5 : Sac de Ciment

II-1-2-2-1 Masse volumique (NF P 18-555) :

Masse volumique absolue :

Nous utilisons pour le ciment l'essai de chatelier par contre pour les fillers on a utilisé le pycnomètre.

La masse volumique absolue du ciment est donnée par la formule suivante :

$$\rho_{ab} = \frac{M_2 - M_1}{V_2 - V_1}$$



Photo II.6 : Densimètre de Chatelier

Avec :

M_1 :Masse de (cellule+ benzène)

M_2 :Masse de (cellule+ benzène+ ciment)

V_1 : Volume initial de benzène

V_2 : Volume final de benzène

II-1-2-2-2 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 faire passer un volume d'air connu au travers d'une poudre de ciment, en utilisant un perméabilimètre Blaine (Figure II-5) ; 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:

$$s = k \frac{\sqrt{e^3} \cdot \sqrt{t}}{\rho(1 - e)\sqrt{n}}$$

S – Surface spécifique (cm^2/g).

k – Constante de l'appareil...

e – Porosité de la couche tassée.

t – Temps mesuré en secondes.

ρ _ Masse volumique (g/cm^3).

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



Photo II.7 : Perméabilimètre de Blaine

II-1-2-2-3 Analyse minéralogique par diffraction :

Cet essai concerne les matériaux cristallisés .il est réalisé à l'aide d'un diffractomètre de rayons X (Figure IV-6) .Celui-ci est équipé d'un tube a anode de cobalt de rayonnement $\lambda=1,789 \text{ \AA}$ et un compteur proportionnel .L'identification des minéraux s'effectue en comparant les diagrammes des échantillons étudiés avec les diagrammes standards des principaux minéraux .A noter que l'amplitude et le nombre de pics d'une certaine substance obtenus sur le diagramme de diffraction X ne reflète en aucun cas la surabondance de cette substance dans le composé.

Ceci dépend du degré de cristallisation et de l'orientation de la substance. Il existe une relation entre l'intensité des rais de diffraction d'une espèce minérale et sa concentration dans un mélange, cette relation permet une analyse quantitative des différents minéraux dans le mélange.

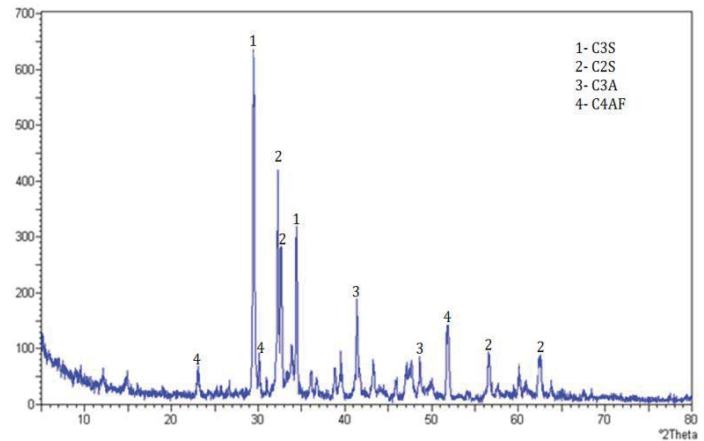


Photo II.8 : Diffractomètre aux rayons X de l'université de Laghouat

Les résultats de l'analyse minéralogique effectuée sont donnés sous forme graphique dans la Figure II-7 avec des résultats de la caractéristique physique : et ceux les résultats effectués sont regroupés dans le **Tableau II-2** :

Tableau II.2: Caractéristique chimique et physique de ciment

Caractéristiques de ciment	
Caractéristiques Chimiques	Teneur %
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	0,60 %
SO ₃	0,48%
Na ₂ O	0,10 %
Cl	/
CaO libre	0,92%
Insolubles	0,50 %
Perte au feu	3,15%
Caractéristiques physiques	
Masse apparente (g/ cm ³)	1,12
Masse spécifique (g/ cm ³)	3,10
SSB (cm ² /g)	2914
SS BET (cm ² /g)	2976
Temps de début de prise	02 h 15
Temps de fin de prise	04 h 20



II-1-2-3 La chaux:

La chaux est un liant. Son matériau de base est le calcaire (carbonate de calcium) contenant plus ou moins d'impuretés (telles que : argiles, magnésie, aluminates, silicates, oxydes métalliques). Il existe différentes sortes de calcaire dans la nature, comme le marbre, les coquillages etc. Suivant la composition du calcaire, on obtient différentes sortes de chaux :

- la chaux aérienne ;
- la chaux hydraulique ;

Ce calcaire est calciné pour donner de la chaux vive. La chaux vive est inutilisée telle quelle en tant que liant. On lui fait subir une réaction d'extinction pour obtenir de la chaux éteinte.

Selon la méthode d'extinction employée on obtient la chaux en poudre ou la chaux en pâte.



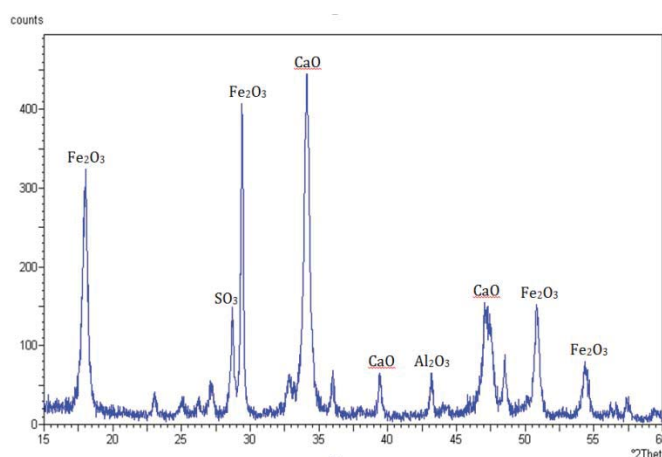
Photo II.9 : Sac de la Chaux



Photo II.10 : La chaux poudre

Tableau II.3: Caractérisation chimique et physique du la chaux

Caractéristiques de la chaux	Teneur
Caractéristiques Chimiques	(%)
CaO	>73,3
MgO	<0,5
Fe ₂ O ₃	<4,82
Al ₂ O ₃	<3,94
SiO ₂	<1,65
SO ₃	<0,6
Na ₂ O	0,4-0,5
CO ₂	<0,1
CaCO ₃	<10
Matériau insoluble (%)	<1
Caractéristiques physique	
Masse apparente (g/ cm ³)	0,633
Masse spécifique (g/ cm ³)	2,18
SSB (cm ² /g)	2893
SS BET (cm ² /g)	2976
Refus sur un tamis de 100 µm (%)	0



II-1-2-4 Aluminum:

Il s'agit de poudre commercialisation par la société **BIOCHEM**, dégraissée à 99 % de portée d'une granulométrie uniforme 75 µm, à noter que la qualité de l'aluminium influe considérablement sur la réaction chimique aluminium-chaux ainsi que sur que le volume de gaz dégagé et par voie de conséquence sur la densité du produit fini



Photo II.11 : Poudre d'aluminium

II-1-2-5 L'eau de gâchage:

L'eau de gâchage utilisée dans notre étude est une eau potable (eau du 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-2 Techniques expérimentales

II-2-1 Essai d'écoulement (NF P18-452) maniabilimètre B

L'essai d'écoulement effectué selon la norme NF P18-452 est choisi pour l'étude de la maniabilité du mortier à l'état frais. Le temps d'écoulement est mesuré à l'aide d'un maniabilimètre à mortier type B de dimensions (180x90x90mm) disponible au niveau du laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat. Il s'agit du temps nécessaire à un volume de mortier pour atteindre un trait repère tracé sur le maniabilimètre sous l'effet des vibrations entraînées par un moteur.



Photo II.12 : Maniabilimètre B (180x90x90mm)

II-2-2 Conservation des éprouvettes:

Les échantillons préparés sont conservés dans un seul environnement.

Environnement 1 : Conservation au laboratoire à l'abri des intempéries.

Tableau II.5:Condition d'essai de conservation des éprouvettes

Environnement	Conditions		Lieu de conservation
	Température(C°)	Humidité(%)	
Environnement 1	17-23°	20-35	Laboratoire de département de génie civil de Laghouat



Photo II.13 : Conservation à l'air libre

II-2-3 Essai de résistance à la compression

La détermination de la résistance à la compression du mortier a été effectuée selon la norme (NF P18-406). Les résultats obtenus à 28 jours représentent la moyenne de trois échantillons. Les mesures se font sur des éprouvettes de mortiers 4x4x16 cm démoulées à un jour et conservées dans les environnements étudiées jusqu'au moment de l'essai norme (NF P15-402). Le choix du moule a été justifié en fonction de D_{max} . Les essais mécaniques normalisés ont été réalisés à 28 jours. Chaque éprouvette donne un résultat de flexion et deux de compression. Chaque résistance à la compression correspond à la moyenne de six mesures.

Démarche de l'essai :

- Essayer les demi-prismes en compression sur les faces latérales de moulage à l'aide de l'appareil normalisé.
- Centrer chaque demi prisme latéralement par rapport aux plateaux de la machine à $\pm 0,5$ mm près et longitudinalement de façon que le bout du prisme soit en porte-à-faux par rapport aux plateaux d'environ 10 mm.

La presse utilisée pour ces essais a une capacité de 100 KN et la vitesse de chargement est fixée à 240 kg/s (conformément à la norme NFP 18-406 et aux recommandations CPC4 de la RILEM). La presse acquisition par ordinateur contrôle.



Photo II.14 : Photos de l'essai d'écrasement

II-3 Elaboration du béton cellulaire :

II-3-1 Procédé de malaxage:

C'est un facteur très important sur la maniabilité de la pâte du ciment, donc pour toute influence de ce paramètre on va procéder à la manière suivante :

- Introduction du sable +ciment à l'état sec
- Malaxer l'ensemble pendant 1min à petite vitesse
- Ajouter la quantité d'eau progressivement à 30s
- Malaxer l'ensemble pendant 1min 30s
- Arrêter le malaxeur et faire racler les parois (si nécessaire)
- Malaxer l'ensemble pendant 30s
- Arrêter le malaxeur et ajouter la poudre d'aluminium
- Malaxer encore une fois la pâte et la poudre d'aluminium pendant 15s à grand vitesse
- Faire remplir le moule sans vibration



Photo II.15: Malaxeur normalisé pour pate et mortier

II-3-2 La porosité totale:

La porosité d'un béton est par définition le pourcentage du volume des vides (V_v) par rapport

au volume total (V_t):
$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100 \text{ (\%)}$$

L'évaluation du volume des vides passe par l'évaluation de la masse sèche de l'éprouvette. Pour cela, l'éprouvette est séchée dans une étuve. La température d'étuvage dépend de la nature de matériaux utilisée. Elle est choisie de façon à éviter une microfissuration par expansion thermique des échantillons. La masse sèche de l'éprouvette est mesurée sur une balance au centième de gramme près. Pour pouvoir évaluer ensuite le volume des vides, il

existe deux techniques possibles, la technique de la saturation totale de l'échantillon et la technique de la masse volumique absolue.

■ **Technique de saturation totale :** (porosité accessible à l'eau)

L'échantillon est placé dans une enceinte fermée dans laquelle on établit le vide. L'échantillon est mis en dépression à l'air pendant une certaine durée (24 heures) environ dans le but de le saturer sous vide. On introduit alors de l'eau déminéralisée dans l'enceinte jusqu'à remplissage. Après une certaine durée (24 heures) environ, la perméabilité de béton cellulaire permet de supposer l'échantillon qu'est saturée le plus complètement possible. L'échantillon « saturée » est pesée.

On obtient alors la masse de l'échantillon saturée ($m_{\text{sat}}(\text{g})$). En fait, la porosité est la somme de la porosité connectée ou ouverte (ensemble des pores reliés à l'extérieur) et de la porosité fermée ou vacuaire (celle qui n'est pas connectée avec l'extérieur). Seule la première est accessible aux fluides par occurrence l'eau. Par la technique de saturation totale de l'échantillon, on mesure donc la porosité ouverte accessible à l'eau. Le volume des pores accessibles à l'eau (V_e) sous vide est égal au volume d'eau qui a pénétré dans l'échantillon (V_{eau}), autrement dit $V_e = V_{\text{eau}}$. Si on note (V_v) le volume des vides et si on suppose la porosité fermée négligeable ou très faible, alors $V_v = V_e$.

$$\text{Par conséquent, } V_v = V_e = V_{\text{eau}} = \frac{m_{\text{eau}}}{\rho_{\text{eau}}} = \frac{m_{\text{eau}} - m_{\text{sec}}}{\rho_{\text{eau}}}$$

Avec :

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

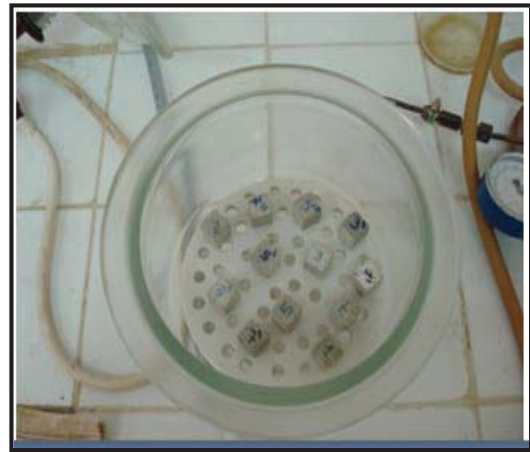


Photo II.16 : Les échantillons utilisés pour l'essai accessibilité à l'eau



Photo II.17 : dispositif de l'essai accessibilité à l'eau

■ **Technique de la masse volumique absolue :** (porosité totale)

La masse volumique de l'éprouvette est calculée à partir de la masse sèche de l'échantillon obtenue après étuvage, divisée par le volume de l'échantillon.

On définit:

$$\rho_{\square\square\square} = \frac{\square_{\text{sec}}}{V_t - V_v} \text{ Masse volumique absolue l'échantillon.}$$

$$\rho_{\square\square} = \frac{\square_{\text{sec}}}{V_t} \text{ Masse volumique relative de l'échantillon.}$$

$$n = \frac{V_v}{V_t} \times 100 = \left[\frac{V_t - \square_{\text{sec}}}{V_t} \right] \times 100 = \left[1 - \frac{\square_{\text{sec}}}{\rho_{\square\square\square} V_t} \right] \times 100 = \left[1 - \frac{\rho_{\square\square}}{\rho_{\square\square\square}} \right] \times 100 = \left(\frac{\rho_{\square\square\square} - \rho_{\square\square}}{\rho_{\square\square\square}} \right) \times 100$$

On retrouve ici une autre définition équivalente de la porosité souvent citée dans la littérature:

$$n = \left(\frac{\rho_{\square\square\square} - \rho_{\square\square}}{\rho_{\square\square\square}} \right) \times 100 = \left(1 - \frac{\rho_{\square\square}}{\rho_{\square\square\square}} \right) \times 100 = 100 - 100 \frac{\rho_{\square\square}}{\rho_{\square\square\square}} = 100 - \frac{\square_{\text{sec}}}{V_t} \times \frac{100}{\rho_{\square\square\square}}$$

La porosité s'obtient ainsi par simple pesée de l'éprouvette sèche, à condition de connaître la masse volumique absolue ρ_{abs} , c'est-à-dire la masse volumique du matériau qui compose l'éprouvette.

Pour la matrice contient des fines calcaire, $\rho_{\text{abs}} \cong 2,59 \text{ g/cm}^3$.

Pour la matrice contient des fines siliceux, $\rho_{\text{abs}} \cong 2,56 \text{ g/cm}^3$.

Pour la matrice témoin, $\rho_{\text{abs}} \cong 2,57 \text{ g/cm}^3$.

Le seul inconvénient de cette technique est qu'il faut avoir déjà à la base une estimation précise de la masse volumique absolue ρ_{abs} (g/cm^3). Pour estimer la masse volumique absolue en utilisant le pycnomètre. Elle consiste à réduire un échantillon de béton cellulaire en poudre (de diamètre inférieur à 40 microns). On évalue ensuite la masse et le volume de la poudre, en supposant sa porosité négligeable.

II-4 Caractéristiques thermiques

Les propriétés isolantes des matériaux de construction se quantifient au travers de deux paramètres usuels: la conductivité thermique « λ » et la diffusivité « E_f ». Ceux-ci dépendent des caractéristiques intrinsèques des constituants, de la microstructure du matériau et des conditions de conservation (rôle de l'eau). Cette partie est consacrée à l'étude du phénomène de conduction en milieu sec et saturée de manière expérimentale. Dans notre travail expérimental on a pu réaliser l'essai thermique permettant de calculer la conductivité thermique λ et la diffusivité thermique E_f . La **diffusivité thermique** « E_f » d'un matériau exprime la vitesse de propagation d'une perturbation thermique dans un milieu, elle est exprimée en (m^2/s). Tandis que la **conductivité thermique** « λ » exprimée en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, traduit l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur [32]. Pour cette mesure il existe plusieurs méthodes d'essais sont :

-la méthode de la Source Plane TPS

-la méthode du fil chaud

-la méthode de Hot Disk

Nous avons utilisé dans notre cas la méthode de Hot Disk

II-4-1 Technique de la Hot Disk

II-4-1-1 Démarche expérimentale

La conductivité thermique, la diffusivité thermique et la chaleur spécifique par unité de volume de chaque mortier durcis, ont été déterminées en utilisant la technique Hot Disk TPS 500 de Thermal Constant Analyzer Test System (**Photo II.18**) disponible au niveau du laboratoire de génie civil, division : Développement et Valorisation des Matériaux Locaux « Durabilité et Transfert thermique ».

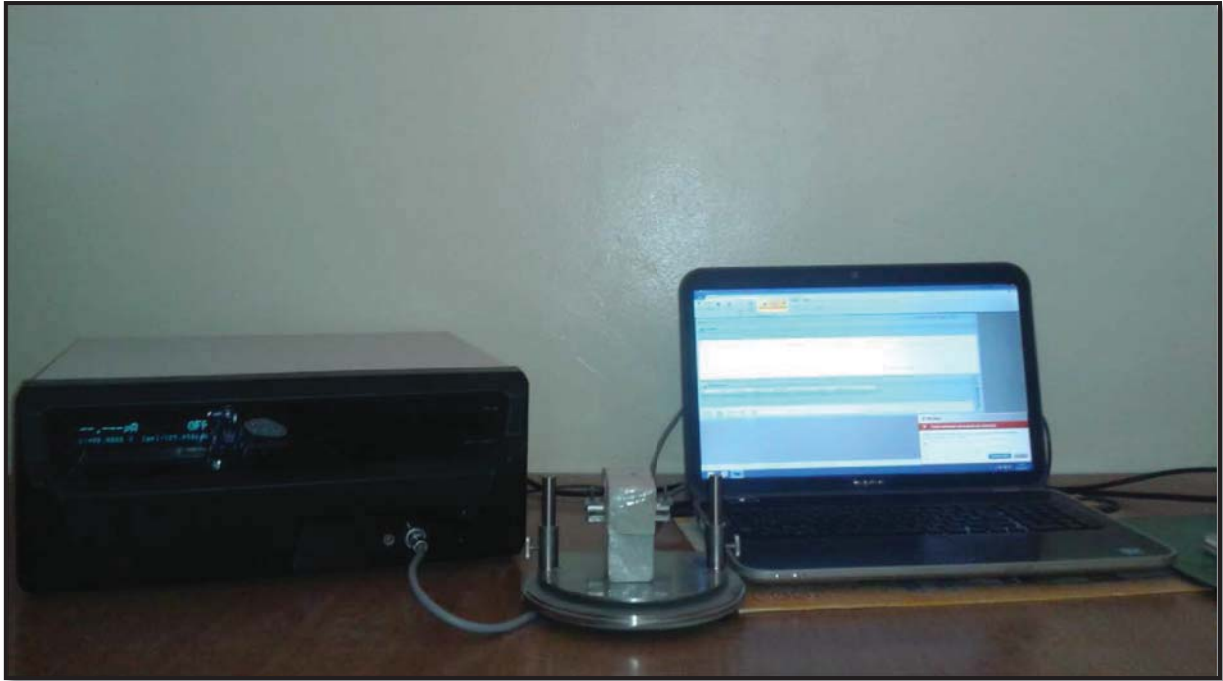


Photo II.18: Mesure de propriétés thermiques à l'aide du système «Hot Disk»

L'essai consiste à serrer la sonde de dimensions (40x60mm) entre deux échantillons des mêmes dimensions (40x40x80mm) selon un dispositif sandwich tenus entre un support (voir **Photo II.20**) afin d'empêcher de bouger les échantillons, ensuite on délivre un flux de chaleur d'une puissance égale à (0,25W) pour l'état saturé des échantillons et (0,55W) pour l'état sec. On obtient par la suite le graphe des températures expérimentales T_0 enregistrées à chaque seconde.



Photo II.19 : La sonde Hot Disk



Photo II.20 : Dispositif de serrage

La durée totale du régime transitoire varie de 40 à 80 secondes selon chaque état (saturé ou sec). Le thermographe enregistrant l'élévation de la température dont on a montré que l'évaluation des paramètres thermiques peut être effectuée en utilisant une plage de points de mesures située entre 60 à 160 de chaque série de mesure.

Chapitre III

Résultats 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% (limite normative actuelle). 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 calcaire 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 [08].

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 sera donc divisée en deux grands volets : le premier sera consacré à l'optimisation de la matrice à partir des additions fillers calcaires et les résultats des caractéristiques mécaniques qui sont utilisées par la suite. Dans le deuxième volet, on présentera les méthodes d'élaboration des bétons calcaire cellulaires et les résultats des caractéristiques physicomécaniques et thermiques.

III-2 Dosage en constituants des mortiers élaborés

La composition du mélange sable (calcaire, siliceux), 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 [01]. La composition du mélange des matériaux secs a été choisie en se basant sur des travaux faite précédemment 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 [27]et[29].

Les pourcentages massiques en sable (SS, SC) et en liant (L) sont :

$$\frac{S}{S + L} = 65\% \quad , \quad \frac{L}{S + L} = 35\%$$

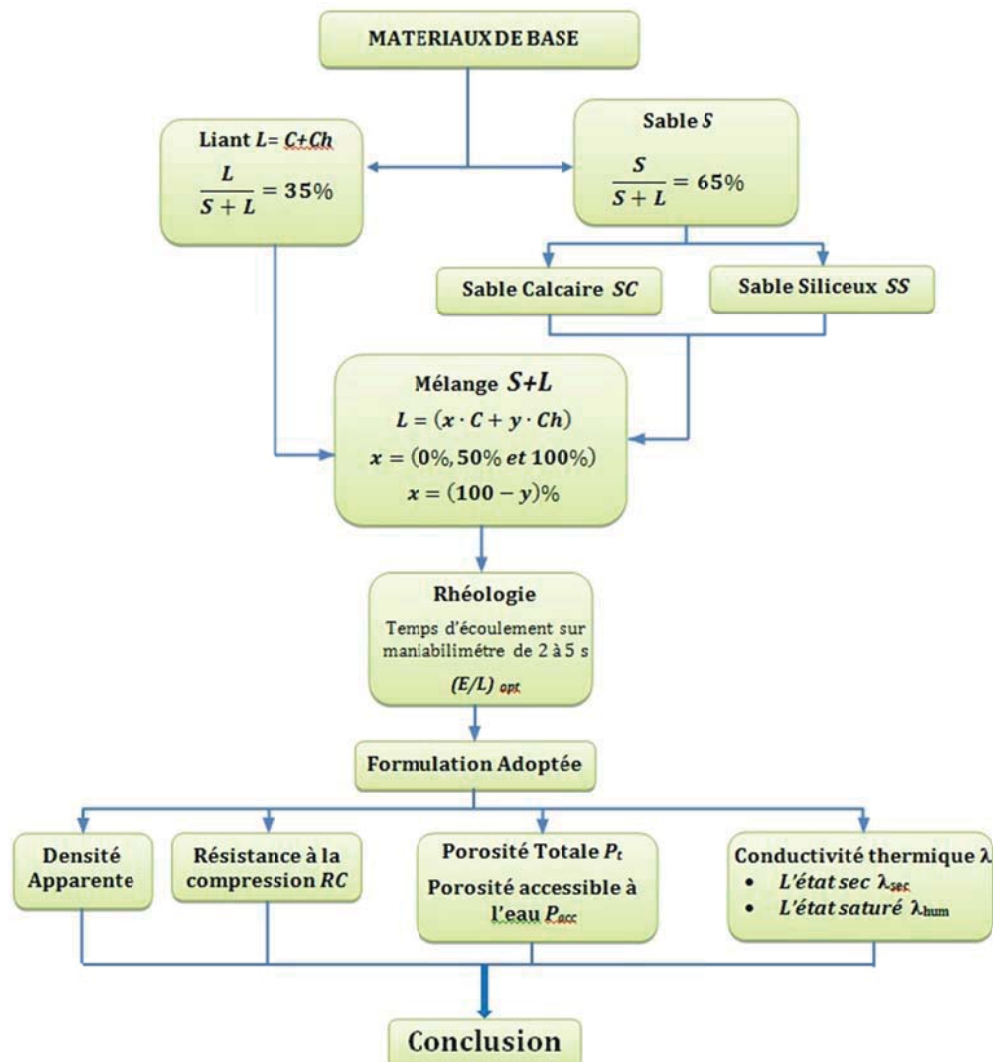
Par contre, les quantités d'eau ont été déterminées sur la base des deux considérations suivantes :

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 [09].

Donc le dosage en constituant optimal a été déterminé à la base de trois paramètres essentiels (voir organigramme) :

- Le rapport E/L .
- Le rapport chaux, liant C/L (L : liant = Ciment +Chaux).
- Le temps d'écoulement doit être compris entre 2 et 5s.



Organigramme de programme expérimental

III-3 Etude d'ouvrabilité

La quantité d'eau a été déterminée sur la base des essais d'ouvrabilités sur la pâte (ciment, chaux, sable calcaire, sable siliceux) pour des rapports E/L qui varient de (40% à 100%) avec un pas de 5% par rapport à la masse du liant.

En premier lieu l'étude du temps d'écoulement a été réalisée par un maniabilimètre de type B (Photo II.11).

Afin d'étudier l'influence de la chaux sur le comportement rhéologique, mécaniques 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 élaborés SC

Composition	Sable calcaire (SC)%	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	0,4-0,65
B 50%C+50%Ch	65	35	50	50	0,6-0,78
C 100%Ch	65	35	0	100	0,75-1,00

Tableau III.2 : Composition en pourcentage massique des différents mélanges élaborés SS

Composition	Sable Siliceux (SS)%	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	0,7-0,85
B 50%C+50%Ch	65	35	50	50	0,8-1
C 100%Ch	65	35	0	100	0,45-0,6

L'étude de l'écoulement a été réalisée par l'essai de la consistance des mortiers (Chap II-2-1)

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 les figures III- 1, III-2.

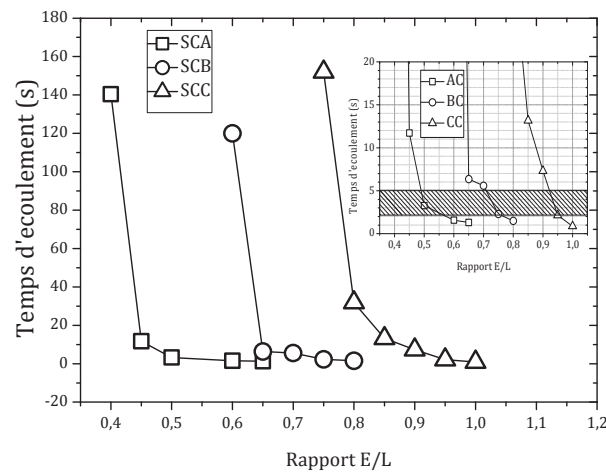


Figure III.1: Variations du temps d'écoulement en fonction du rapport E/L pour le sable calcaire.

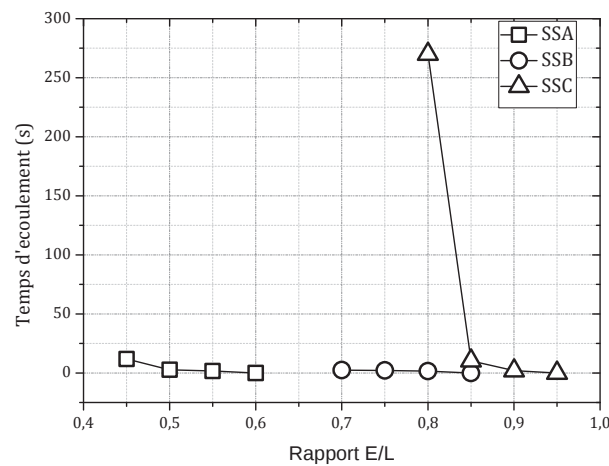


Figure III.2: Variations du temps d'écoulement en fonction du rapport E/L pour le sable siliceux.

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 2 et 5 secondes. Donc nous avons retenu cette plage de temps d'écoulement pour les mélangés élaborés que ont des temps d'écoulement inférieur à 2s ou supérieur à 5s donnent respectivement des pâtes assez fluides ou assez fermé. Cela nécessite une mise en moule sans vibration pour les pâtes fermes ce qui est déconseille dans l'élaboration des bétons cellulaire à des bétons des résistances médiocres inferieures aux valeurs recommandées pour les bétons légers.

III-4 Comportement mécanique d'un béton cellulaire :

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 RILEM [49].

Les mesures ont été effectuées à l'âge de 3, 14 et 28 jours, 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 (de 0,98 à 1,03) 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 1) .

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.

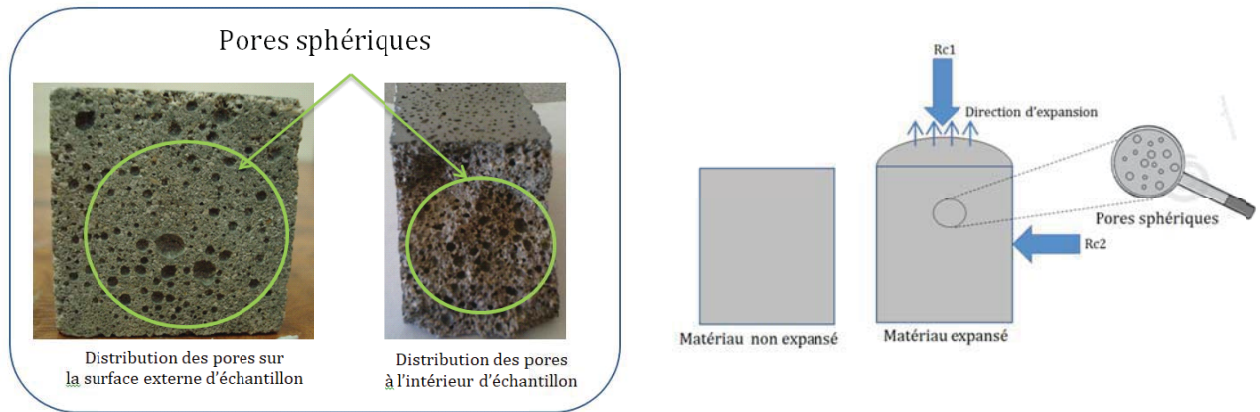


Photo III.1 : Forme des pores dans la matrice

Bien que la résistance à la traction ne soit pas aussi importante que la résistance à la compression pour les bétons en général, notamment, pour les bétons cellulaires, nous avons jugé que c'est ne pas utile de présenter les résultats de la résistance à la traction et nous avons contenté a la résistance à la compression.

Les résultats de la résistance à la compression des différentes compositions et âge a 28 jours sont représentés dans les figures III.3 et III.4 pour le sable calcaire et le sable siliceux respectivement en fonction de type des sables employé.

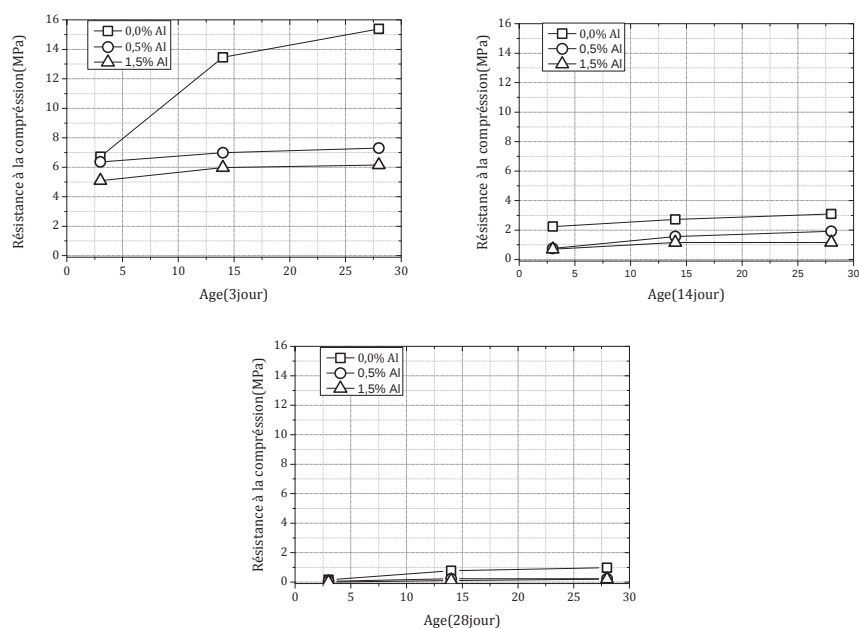


Figure III.3: Variation de la résistance mécanique en fonction de l'Age(SC).

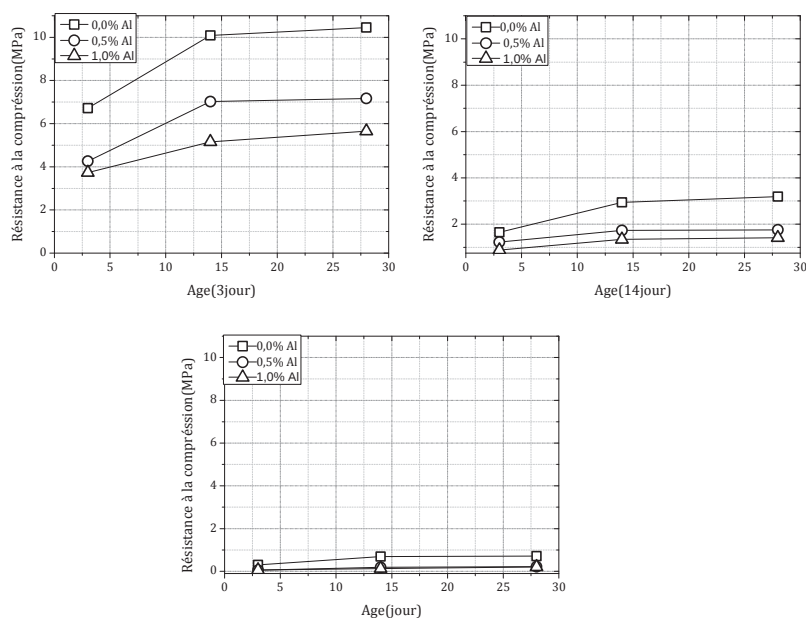


Figure III.4 : Variation de la résistance mécanique en fonction de l'Age(SS).

III-5 Influence de dosage en aluminium et le dosage en liant sur la densité:

La variation de la masse volumique apparente ou la densité en fonction de dosage de l'agent expansif et en fonction du dosage en liant sont montrées dans la figure III-5 et III-6 respectivement.

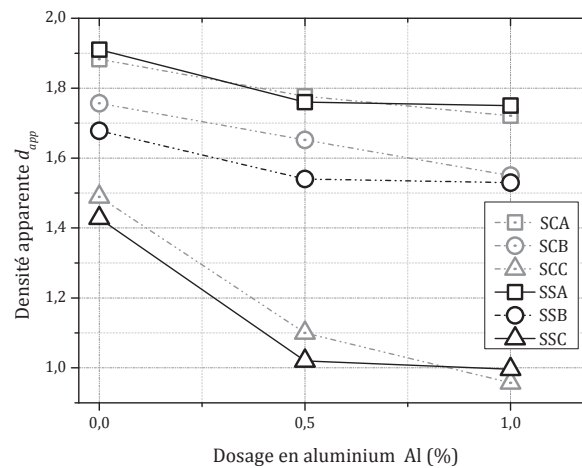


Figure III.5 : Variation de la masse volumique apparente en fonction de dosage en aluminium pour le sable calcaire et siliceux

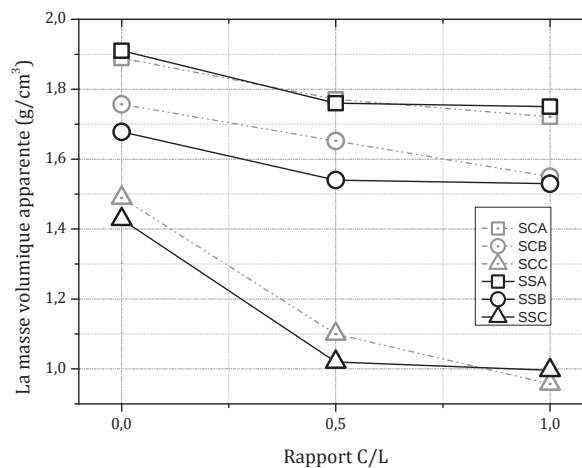


Figure III.6 : Variation de la masse volumique apparente en fonction de rapport C/L pour le sable calcaire et siliceux.

La figure III.5 permet de constater que la masse volumique apparente du matériau diminue lorsque le pourcentage en aluminium augmente ceci pour les deux types de sable étudiées et que les vides créés par l'hydrogène libéré par la réaction de l'aluminium apportent bien un allègement du matériau.

Nous constatons clairement que nous avons deux parties, la première partie où le dosage en aluminium égal à 0,5% il y a une forte diminution de la densité, cette diminution est vraie pour l'ensemble des bétons élaborés, dans la seconde partie pour le dosage 1% en Al on remarque que cette diminution devient moins importante, nous pensons que cette diminution est due à la saturation de notre liant en aluminium [49].

Dans la figure et III.6 qui représente la variation de la densité apparente en fonction de dosage en liant pour les différents bétons élaborés, nous remarquons que l'allure des courbes sont

semblable à celle de la figure III-5, cette ressemblance due au dosage en chaux qui joue un rôle important sur la diminution de la densité apparente [49], [50].

III-6 Influence de dosage en aluminium sur la porosité totale et la porosité accessible à l'eau:

Les résultats expérimentaux de la figure III.7 et III.8 ci-dessous donnant la variation de la porosité totale et la porosité accessible à l'eau des différentes compositions et pour les différentes teneurs en aluminium. Ces résultats montrent que la **Pt** et **Pacc** 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 totale et la porosité accessible en fonction du pourcentage de chaux dans le liant est plus marquée pour les compositions sans aluminium et diminue graduellement avec l'augmentation de la teneur en aluminium dans le mélange.

Dans les mêmes figures la variation de la porosité totale et la porosité accessible par l'eau en fonction du dosage en aluminiums .On remarque pour l'ensemble des valeurs de la porosité totale varie entre 0,289 et 0,628 pour les bétons élaborées à partir de sable siliceux et de 0,303 à 0,602 pour les sable le calcaire ; De même pour la porosité accessible varie entre 0,224 et 0,425 pour les bétons élaborées à partir de sable siliceux et de 0,219 à 0,358 pour les sable le calcaire.

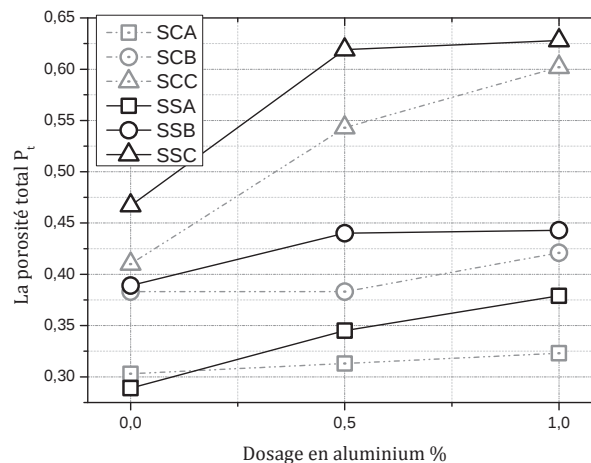


Figure III.7 : Variation de la porosité totale en fonction de dosage en aluminium

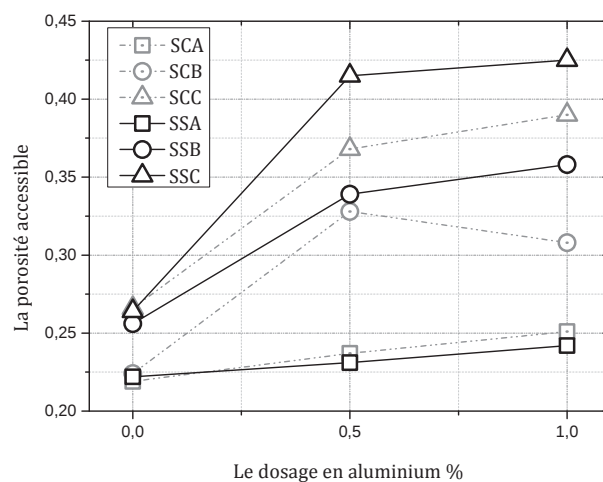


Figure III.8 : Variation de la porosité accessible à l'eau en fonction de dosage en aluminium.

L'histogramme présenté sur le graphique de la figure III.9 qui présente la variation du rapport (P_{acc}/P_t) en fonction de la teneur en chaux montre que le taux de porosité accessible par rapport à la porosité totale varie sensiblement mais avec des petites valeurs ceci est vraie pour les deux types de sables.

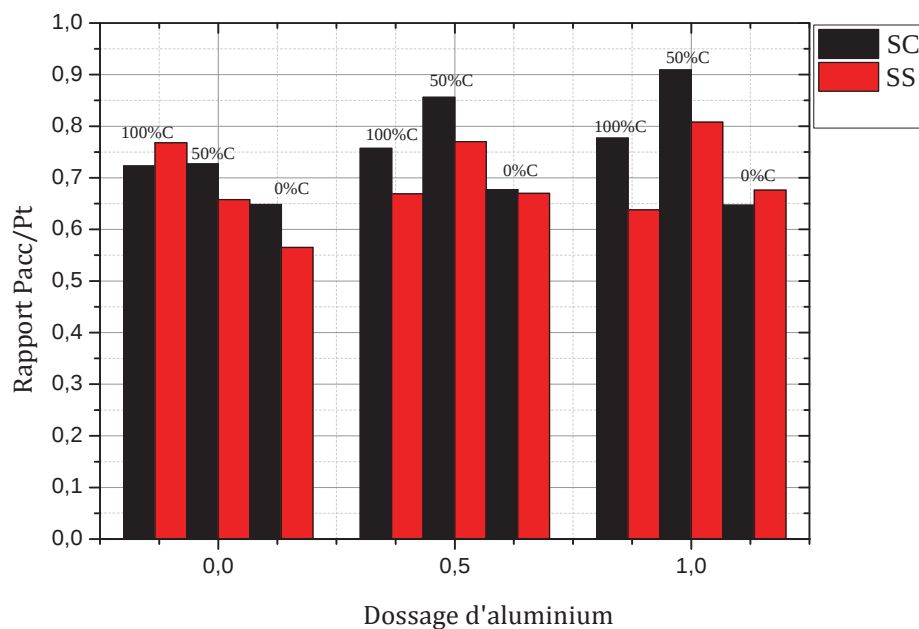


Figure III.9: Variation de la porosité totale en fonction de dosage en aluminium.

III-7 Influence de rapport C/L sur la porosité totale et la porosité accessible à l'eau :

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 a forte porosité comme le cas des bétons cellulaire, et plus la durabilité du matériau est affectée, Cependant, l'identification de la porosité ouverte ou accessible dans un matériau est plus indispensable pour l'étude de sa durabilité que la porosité totale.

Dans la figure III.10 et III.11 ci-dessous qui présente la variation de la porosité totale et la porosité accessible par l'eau en fonction du dosage en liant (C/L). Ils montrent dans la majorité des cas étudiées que la porosité accessible croît avec la teneur en chaux dans la matrice liante, et que la teneur en aluminium a tendance à accentuer cette porosité, D'autre part ceci nous laisse penser que la porosité introduite elle-même est accessible et que les pores sont interconnectés.

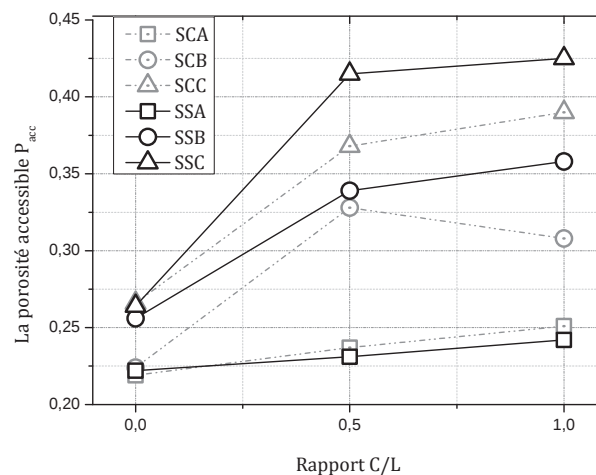


Figure III.10 : Variation de la porosité accessible à l'eau en fonction de rapport C/L.

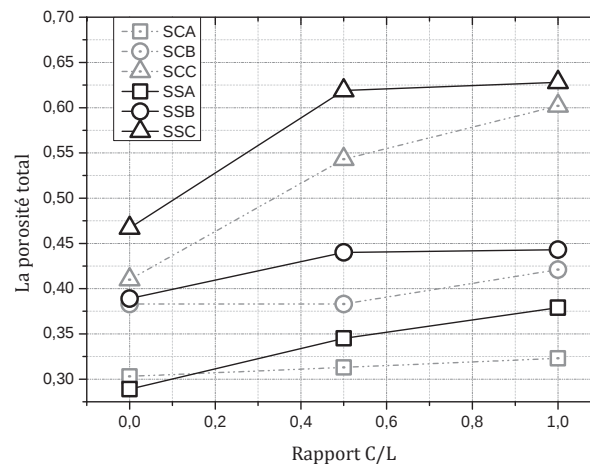


Figure III.11 : Variation de la porosité totale en fonction de rapport C/L

Dans l'histogramme de la figure III.12, l'augmentation du rapport (P_{acc}/P_t) en fonction du dosage en chaux est liée également au caractère d'avidité de la chaux à l'eau ; En comparant la porosité accessible P_{ac} à la porosité totale P_t des différentes compositions élaborées, on remarque que le taux de porosité accessible par rapport à la porosité totale se situe entre 56,5 et 76,8% pour le sable **SA** et entre 64,7 et 77,7% pour le sable **SC**, ceci met en évidence qu'il y a une très grande partie des pores sont ouverts ou interconnectés pour les deux sables étudiées.

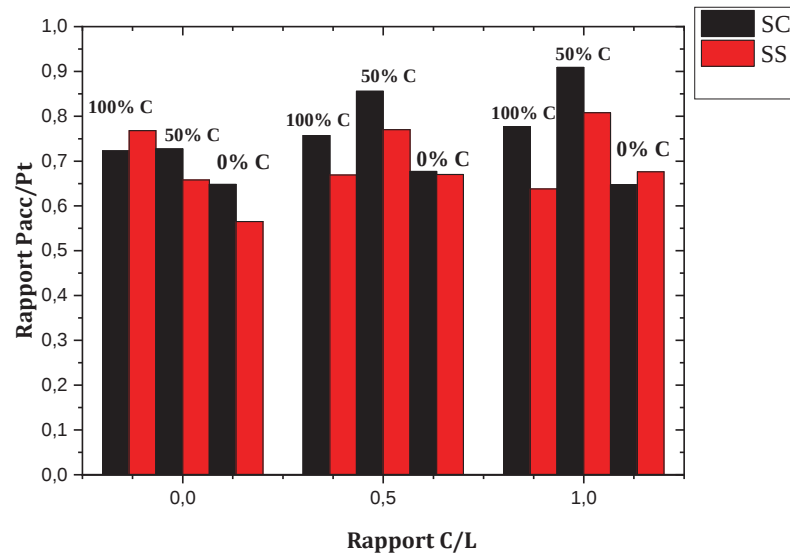


Figure III.12 : Variation de P_{acc}/P_t en fonction de rapport C/L de deux types de sable

III-8 Influence de dosage en aluminium sur la résistance à la compression :

La variation de la résistance à la compression en fonction de dosage en aluminium a été illustrée dans la figure III.13

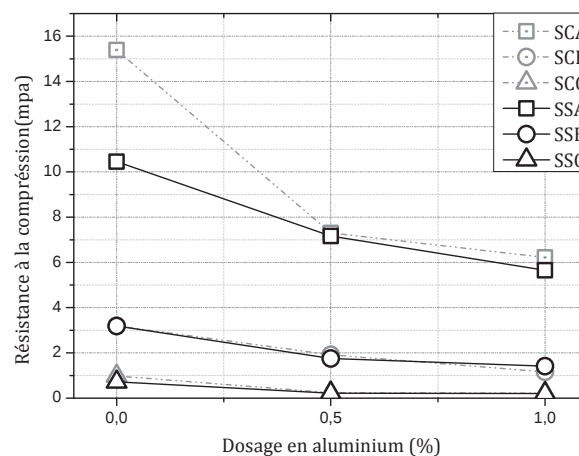


Figure III.13 : Variation de la résistance à la compression en fonction de dosage en aluminium pour les différents types de sable

Les résultats de la figure III.13 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 réduction de densité par l'augmentation de la porosité dans la matrice, [51] Pour le même pourcentage d'aluminium, la résistance à la compression diminue de plus de 60% lorsque le dosage de chaux (C/L) varie de 0 à 100% et 98% lorsque le dosage d'aluminium dépasse 0,50% , Nous avons constaté aussi qu'un pourcentage en aluminium supérieur à 0,50% est pratiquement inconcevable puisqu'il conduit à une chute de la résistance accompagné d'un phénomène d'effritement du béton cellulaire, ceci est remarqué pour les deux sables employées

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

III-9 La modélisation (formules empirique) reliant la résistance à la compression et la porosité :

Nous avons essayé de tirer des relations mathématiques reliant la résistance mécanique à la porosité du matériau en utilisant les modèles communément utilisés [49], [50]et [52], Il s'agit des modèles de *Bal'Shin* ; *Ryshkewitch*, ; *Schiller* et *Hasselman* dont les expressions mathématiques sont données par :

- **Modèle de Bal'Shin** : $R_c = R_{c_0} (1 - P_t)^\alpha$
- **Modèle de Ryshkewitch** : $R_c = R_{c_0} . e^{-\beta . P_t}$
- **Modèle de Schiller** : $R_c = \gamma \ln \left(\frac{P_{cr}}{P_t} \right)$
- **Modèle Hasselman** : $R_c = b - a . P_t$

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.14 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 *Hasselman* contrairement aux modèles *Ryshkewitch* et de *Bal'shin* qui donnent cependant des résultats relativement corrects dans la plage de porosité habituellement quantifiée [50] et [53].

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 [49], Plus le matériau est dense plus sa résistance mécanique est élevée, La résistance mécanique en compression varie de 0,210 MPa à 10,46 MPa pour le sable siliceux pour des porosités allant de 0,628 à 0,289 et pour les sables calcaire La résistance mécanique en compression varie de 0,200 MPa à 15,40 MPa pour des porosités allant de 0,390 à 0,224.

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 tableaux III.3 et 4 pour les deux sables étudiées.

Tableau III.3 : Les résultats de la modélisation reliant la résistance à la compression et la porosité

Modèle	Coefficients calculés							Coefficient de corrélation	R ²
	R_{c0}	α	β	γ	a	b	ε		
Bal'Shin	983,6	11,40	---	---	---	---	---	0,939	0,882
Ryshkewitch	983,16		14,43	---	---	---	---	0,952	0,907
Schiller	---	---	---	17,533	---	---	0,618	0,715	0,511
Hasselmann	---	---	---	---	- 30,11	16,78	---	0,771	0,595

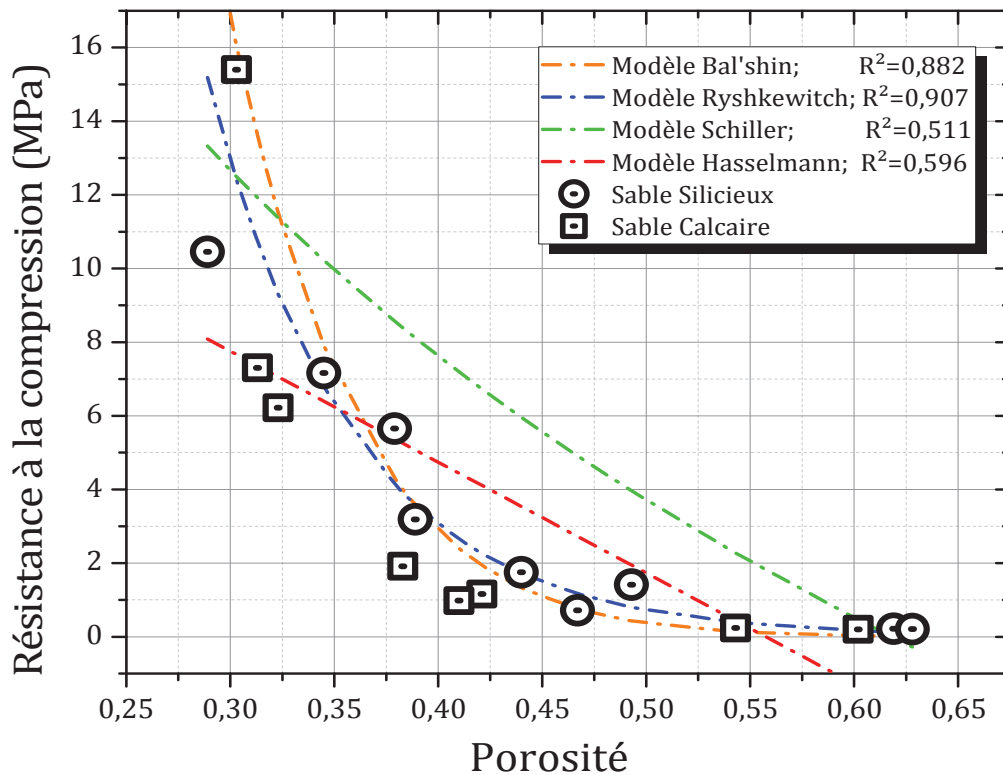


Figure III.14 : Relation entre la résistance à la compression et la porosité totale.

III-10 Caractérisations thermiques

Le pouvoir isolant des matériaux est caractérisé par leur conductivité thermique λ et leur diffusivité thermique E . La conductivité thermique « λ » exprimée en $\text{W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 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 [54].

III-11 Influence de la masse volumique sur la conductivité thermique :

Les résultats expérimentaux de la figure III.15 et 16 qui correspond aux deux sables calcaires et siliceux respectivement, confirment une relation tout à fait évidente entre la conductivité thermique λ soit à l'état sec ou humide avec la densité apparente qui se caractérise par le dosage massique de la chaux et la teneur en aluminium ; Plus le matériau est dense plus sa conductivité thermique est élevée.

Nous constatons aussi que les valeurs de la conductivité thermique des bétons à base de sable calcaire est moins importantes que les valeurs à celle de des sables siliceux soit aux l'état secs ou humides, mais cette différences est plus importante à l'état humide.

Une diminution considérable de la valeur de la conductivité thermique λ soit l'état sec ou humide est enregistrée dans les compositions a forte dosage en chaux ou là teneur en ciment est faible ; Avec cette composition nous avons enregistrés des faibles valeurs de la densité et de la conductivité thermique mais avec des résistances médiocres inférieures aux valeurs recommandées pour les bétons légers.

Les valeurs enregistrées de la conductivité thermiques à l'état sec et humide sont résumé dans le tableau III-4

Tableau III.4: Les résultats de la conductivité thermiques à l'état sec et humide pour les deux sables étudiées.

Type de sable	L'état sec λ_{sec} ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{K}$)	L'état humide λ_{hum} ($\text{W/m} \cdot ^\circ\text{K}$)
Sable Calcaire	$\lambda_{\text{min}} = 0,099$ $\lambda_{\text{max}} = 0,926$	$\lambda_{\text{min}} = 0,744$ $\lambda_{\text{max}} = 1,671$
Sable Siliceux	$\lambda_{\text{min}} = 0,368$ $\lambda_{\text{max}} = 1,490$	$\lambda_{\text{min}} = 0,393$ $\lambda_{\text{max}} = 2,022$

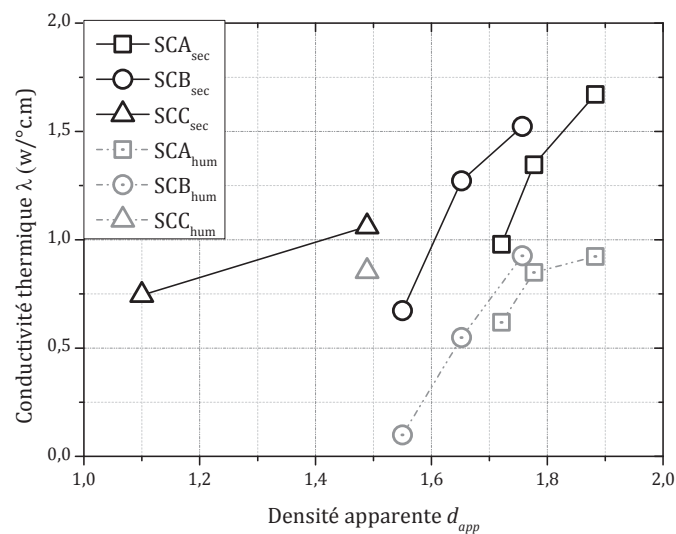


Figure III.15 : Variation de la conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique apparente pour le sable calcaire

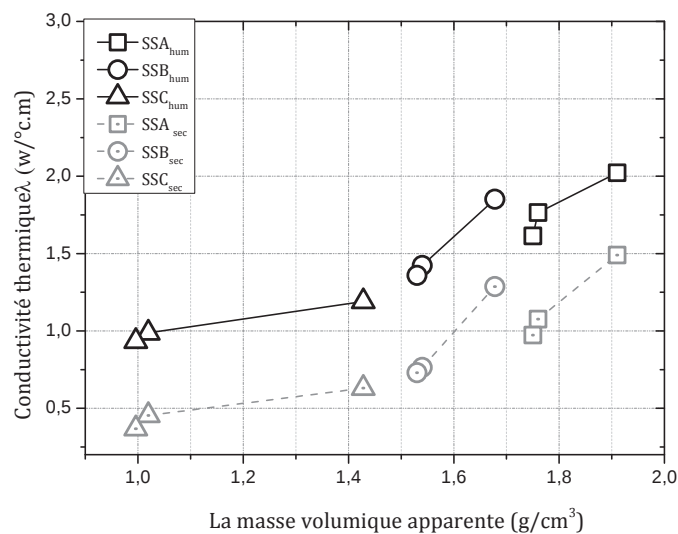


Figure III.16 : Variation de la conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique apparente pour le sable siliceux

III-12 Influence de la porosité totale sur la conductivité thermique :

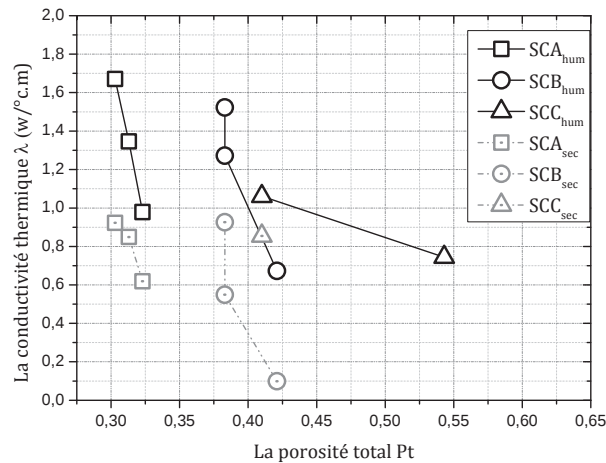


Figure III.17 : Variation de la conductivité thermique λ en fonction de La porosité totale pour le sable calcaire

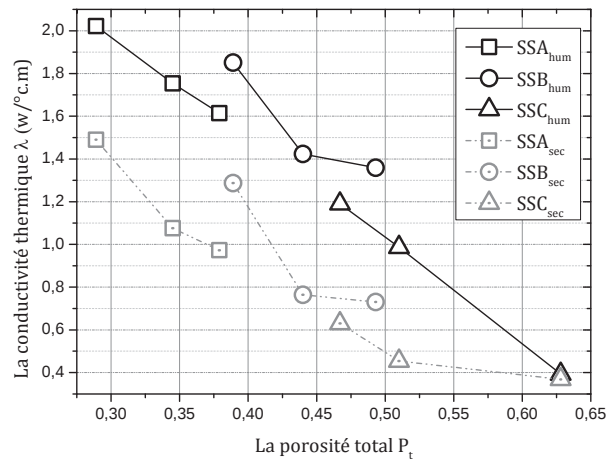


Figure III.18 : Variation de la conductivité thermique λ en fonction de La porosité totale pour le sable siliceux

Nous remarquons dans les figures 17 et 18 confirment une relation tout à fait évidente entre la conductivité thermique λ soit à l'état sec ou humide qui se caractérise par le dosage massique de la chaux et la teneur en aluminium, Plus le matériau est dense plus sa conductivité thermique est élevée.

Nous remarquons aussi que la conductivité thermique diminue en fonction la porosité total, cette variation ou cette allure des courbes est presque identique pour l'ensemble des échantillons élaborées soit à l'état sec ou humide, ceci est valable pour les deux type de sable employées.

III-13 Influence de la résistance à la compression sur la conductivité thermique :

Nous avons constaté dans la figure III.19 pour l'ensemble des bétons élaborés soit en *SC* ou *SS* l'allure des courbes qui présente la relation entre la résistance à la compression et la conductivité thermique est très semblable ce qui explique que la valeur de la conductivité thermique est liée directement aux caractéristiques thermiques du sable employé .

On note aussi tous les compositions élaborés à une teneur en aluminium égal à 1% est pratiquement inconcevable puisqu'il conduit à une chute de la résistance et au phénomène d'effritement du béton cellulaire au-delà des limites recommandées pour un béton léger ce qui a été prouvé par d'auteur auteurs [54].

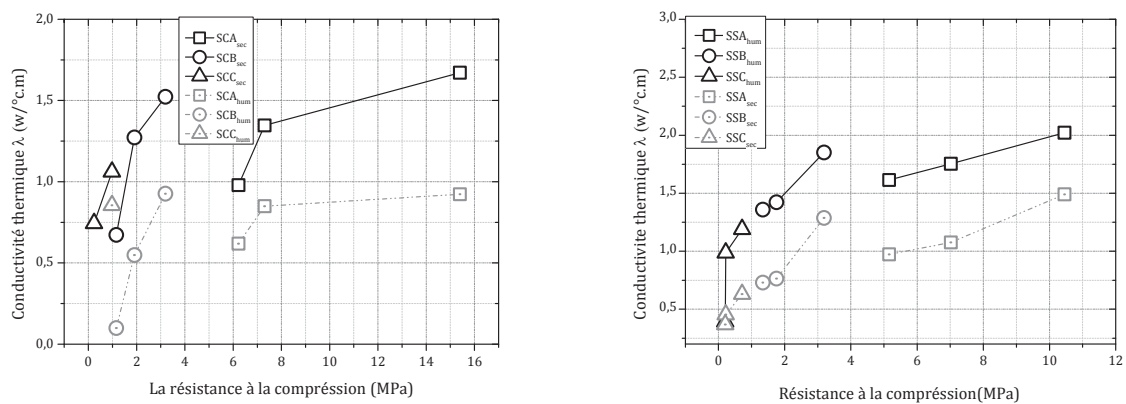


Figure III.19 : Variation de la conductivité thermique λ en fonction de la résistance à la compression (SC, SS)

III-14 Influence de la conductivité thermique :

Dans les histogrammes de la figure III.20 et III.21, on remarque que la conductivité thermique à l'état saturé est plus importante que l'état sec, cette importance augmente plus avec le pourcentage de la chaux et l'aluminium dans les compositions élaborées pour les deux type de sables étudiées, ceci est dû au réseau poreux important qui se remplit avec l'eau aux états saturés. D'autre part nous constatons aussi que les valeurs de la conductivité thermique pour les bétons élaborée à base de *SS* est légèrement plus important que celle élaborée à base de *SC* d'un rapport de qui varie entre 36,38 à 38,05% à l'états sec et de 17,35 à 39,34% l'état humide.

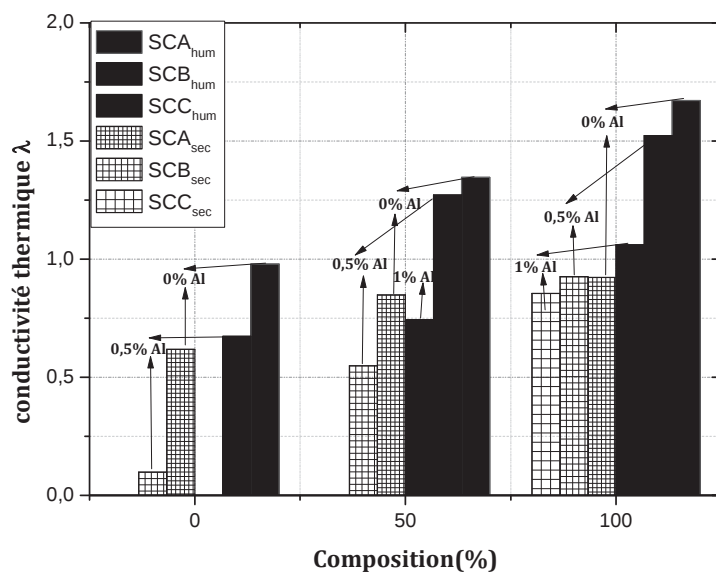


Figure III.20 : Variation de la conductivité thermique λ pour les différentes mélanges élaborées le sable calcaire

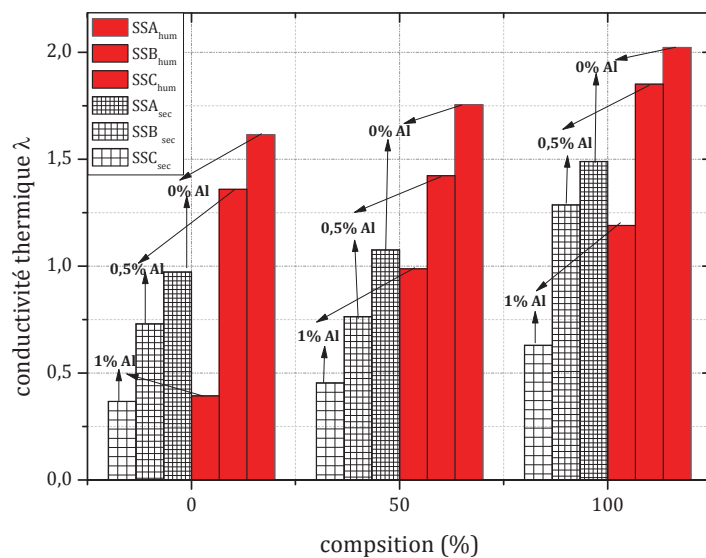


Figure III.21 : Variation de la conductivité thermique λ pour les différentes mélanges élaborées le sable siliceux

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

Ce travail avait pour objectif l'étude de l'effet de la porosité sur le comportement physico-mécanique et thermique d'un béton cellulaire à base de sable calcaire et siliceux obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent. Il s'agit de montrer les potentialités d'utiliser les ressources locales, notamment le sable calcaire et le sable siliceux, le liant (ciment, chaux) en vue de 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 et siliceux. Le deuxième volet consiste en l'allégement de la pâte optimale par l'incorporation de différentes proportions d'aluminium en vue d'améliorer 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 ou sable siliceux), on a utilisé un maniabilimètre de type B pour le rapport E/L qui varie de (40% à 100%) avec un pas de 5% par rapport à la masse du liant jusqu'à avoir un temps d'écoulement compris entre 2 et 5 secondes. Ce rapport qui nous a permis 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 diminue lorsque le pourcentage en aluminium augmente. L'ajout de la poudre d'aluminium au mélange apporte bien un allégement du matériau et permet d'atteindre des densités comprises entre 1883 et 957 kg/m³ pour le sable calcaire et 1910 et 996 kg/m³ pour le sable siliceux pour des dosages en aluminium de 0 ; 0,5 et 1%.
- Les résultats de la résistance à la compression ont été effectués à l'âge de 3, 14 et 28 jours. Les résultats de la résistance à la compression des différentes compositions sont variés de 0 à 6,71 à l'âge 3 jours, de 0,11 à 13,46 à l'âge 14 jours et 0,20 à 15,39 à l'âge 28 jours pour le sable calcaire et pour le sable siliceux, 0,05 à 6,71 à l'âge 3 jours, de 0,13 à 10,1 à l'âge 14 jours et 0,20 à 10,45 à l'âge 28 jours. 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 augmentent avec la teneur en chaux et la teneur en agent expansif, ces derniers varient entre 0,28 et 0,62 pour la porosité totale pour les bétons élaborés à partir de sable siliceux et de 0,30 à 0,60 pour le sable calcaire ; De même pour la porosité accessible varie entre 0,22 et 0,42 pour les bétons élaborés à partir de sable siliceux et de 0,21 à 0,35 pour le sable calcaire.
- Pour les modèles communément utilisés 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 variés de 0,21 MPa à 10,46 MPa pour le sable siliceux pour des porosités allant de 0,62 à 0,28 et pour les sables calcaire. La résistance mécanique en compression varie de 0,20 MPa à 15,40 MPa pour des porosités allant de 0,39 à 0,22, ces résultats montrent qu'il n'existe pas une grande différence entre les résultats en fonction de la nature de sable employés ; ce qui concerne les modèles nous avons remarqué que les modèles de *Bal'Shin* et *Ryshkewitch* sont proche à notre composition quel que soit la nature de sable.

- Les résultats de mesure des propriétés thermiques montrent que la conductivité thermique a 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. Nous constatons aussi que ces valeurs des bétons à base de sable calcaire est moins importantes que les valeurs à celle de des sables siliceux soit à l'état secs ou humide (saturé), mais cette différences est plus importante à l'état humide. Les valeurs enregistrées pour les bétons élaborées sont de 0,09 à 0,92 w/m.°K à l'état sec et 0,74 à 1,67 w/m.°K pour l'états humide le sable calcaire est de 0,36 à 1,49 w/m.°K à l'états sec et 0,39 à 2,02 w/m.°K à l'états humide pour la sable siliceux .
- 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 pour les deux type de sables étudiées, nous posons que cette augmentation due essentiellement au forte réseau poreux dans la matrice causé au processus d'allègement.
- **Recommandations et perspectives de recherches :**
 - Pour les futures recherches, nous recommandons d'utiliser d'autres procédés d'allègement pour améliorer les performances thermiques des bétons de sables
 - Elargir la gamme de variation du pourcentage d'aluminium.
 - L'étude du comportement thermique des matériaux élaborés dans des conditions hygrothermiques variables.
 - Dans notre recherche, il y avait des résultats que nous n'avons pas atteints en raison de la composition de la chaux pour la perte d'échantillons.

BIBLIOGRAPHIE

- [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 Satandard NF P 18-500** (Juin 1995): Bétons de sables, 12 p.
- [3] **G. Escadeillas** : "Les ciments aux fillers calcaires : Contribution a 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. Gabrovek, V. Kaucic.**(2001) : "The effects of limestone addition clinker type and fineness on properties of Portland cement". Cem. Concr. Res 31, pp 135–140.
- [5] **Normes AFNOR** :
 - O Essais physico-mécaniques sur les bétons et mortiers (1981-1997).
 - O NF P 18-541: Granulats pour béton hydraulique. Juin 1995.
 - O NF P 15-301: Ciment courant. Juin 1994.
 - O NFP 18-303 : Eau de gâchage pour béton. Aout 1999.
 - O NFP 18-340 : Adjuvant spéciaux pour béton. Décembre 1998.
 - O EN 196-1 : 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, P 813,815.
- [9] **J. BARON, J.P. OLLIVIER et J.C. WEISS**, (1999) :« Les bétons, bases et données pour leur formulation », Edition Eyrolles,Troisième tirage, P 3-12.
- [10] **Société des ciments de Ain-El-Kebira**, (2004) : « Chimie des ciments 2 », P 5, 11, 46-47.
- [11] **P. Pimienta , J.Chandellier, M. Rubaud, F. Dutruel, H. Nicole** (1994):Etude de faisabilité des procèdes de construction à base de Béton de Bois, Cahier du CSTB, Livraison 346, N°2703.
- [12] **Bentchikou. M** (2008): Contribution à l'étude et à l'élaboration de matériaux composites Pour l'isolation thermique (Cas de béton de fibres de papiers recyclés) ; Thèse de doctorat de l'ENP d'Alger
- [13] **Veronique Cerozo** (2005) : propretés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base des particules végétales ; approche expérimental et modalisation. Thèse de doctorat
- [14] **Yang Ke** (2008) : Caractérisation du comportement mécanique des bétons de granulats légers (expérience et modélisation) ; Thèse de doctorat de l'université de cergy-pontoise

- [15] **Arnould.M et Virlogeux .M** (1986):granulats de béton légers, Presses de l'école nationale des ponts et chaussées ; Paris.
- [16] **A. Ledhem** (1997) : Contribution à l'étude d'un béton de bois, Mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite argile-ciment-bois, Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon.
- [17] **Ziregue Ahmed** (2005) : Valorisation de coproduits industriels influence de différents facteurs d'allègement 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 ou PSE.
- [19] **Dreux G et Festa J.** (1995): Nouveau guide du béton. Eyrolles.
- [20] **Encyclopédie du bâtiment**(1970) : les techniques de construction ;édition Eyrolles.
- [21] **Roger Iacox-Albert Fuentes**(1982):**Traité de béton Armé; Editions Eyrolles, Paris**
- [22] **JACOBS & MAYER** (1992):Porosity and permeability of autoclaved aerated concrete October 14-16.
- [23] **NARAYANAN.N and RAMAMURTHY.K, OOb**(2000): Structure and properties 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 de 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, Thèse de 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:Etude des constituants principaux vol ,23.N°6,PP.441-445,
- [29] **A.Laukaitis,R.Zurauskas,J.Keiene**(2005):The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties ;Cement concrete composite 27(2005) pp .41-47.

- [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** (9-11 février 2009): Elaboration et caractérisation d'un béton à base de sable dunaire et de sous –produits industriels ; université de Guelma (Algérie)
- [32] **Bing Chen, Juanyu Liu** (2004):Propreties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cement and ConcreteResearch* 34, pp.1259-1263
- [33] **GUEDDOUDA.M.K et al** (9-11 Février 2007): Caractérisation et stabilisation des sols expansifs ; colloque international, Sols et Matériaux à Problèmes ; Tunisie, pp.27-34.
- [34] **Adam M. Neville**(2000), propriétés des bétons, Traduit par le CRIB, Editions Eyrolles, Paris,.
- [35] **Jos Cox, Albert Ingelaere, Jacques Sizaire, Pascal Meulders, Elly Van Overmeire** : Le béton cellulaire.
- [36] **S.Tada, S.Nakano** (1983): Microstructural approach to properties of moist cellular concrete. Wittmann FH Amesterdam: Elsevier pp71-89
- [37] **C.Lian, Y. Zhuge, S.Beecham** (2011): The relationship between porosity 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 materials* 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 en présence d'un gradient de température. Caractérisation expérimentale d'un béton cellulaire. Thèse de doctorat, Université de Grenoble1, saint-Martin- d'Hères. France.
- [43] **J.P.Laurent** (1991): La conductivité thermique 'à sec' des bétons cellulaires autoclavés :

- un modèle conceptuel. Matériaux et constructions 24 pp221-226.
- [44] **Roels, S.** (2002). Modelling unsaturated moisture transport in autoclaved aerated concrete: a microstructural approach, Norwegian university of science and technology
- [45] **Christian Guegan, Philippe Legras, Jean Francois Mazzoleni, Christian Colin, Thomas Breiner et Nicolas Foussier** (2005): «Mémento du béton cellulaire».
- [46] **S.Tada** (1992) : Pore structure and moisture characteristics of porous inorganic building materials. Wittmann FH Amsterdam pp53-63
- [47] **J.P.Laurent** (1991): La conductivité thermique ‘à sec’ des bétons cellulaires autoclavés : un modèle conceptuel. Matériaux et constructions 24 pp221-226.
- [48] **Crausse P., Laurent J.P., Perrin B.,**(1996) :“Influence des phénomènes d’hystérésis sur les propriétés hydriques de matériaux poreux, comparaison de deux modèles de simulation du comportement thermohydrique de parois de bâtiment”, Revue générale de Thermique, Vol. 35, pp. 95-106.
- [49] **Richard Cabrillac, 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.
- [50] **E, P, Kearsley and P, J, Wainwright**(2002), The effect of porosity on the strength of foamed concrete ;Cement and Concrete Research 32 233-239
- [51] **ACI 213R-87**(1994), Guide for structural lightweight aggregate concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part I: Materials and General Properties of Concrete, Detroit, Michigan.
- [52] **Watson K,L** ,(1981),A simple relationship between the compressive strength and porosity of hydrated portland cement, Cement and Concrete Research, vol,11, pp473-476,
- [53] **Aimad Oukhlef** , (2011), Détermination de la distribution de tailles de pores d’un milieu poreux , Thèse de doctorat ;l’École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris, France.
- [54] **Joumana YAMMINE**, (2007), Rhéologie des bétons fluides à hautes performances : relations entre formulations, propriétés rhéologiques, physico-chimie et propriétés