

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE KASDI MERBAH -OUARGLA



**FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES.
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE ET DE GENIE CIVIL**

Mémoire

En vue de l'obtention du diplôme de magistère

Filière : GENIE CIVIL, Option : GEOMATERIAUX

Présenté par : **SAITI ISSAM**

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

Thème

Étude d'un procédé d'élaboration d'un béton léger
cellulaire à base de sable de dune de la région de
GHARDAIA

Soutenu le 18 /12/2014 Devant la commission d'examen :

Mr. KRIKER Abdelouahed	Professeur U. Ouargla	Président
Mr. BENTABBA Med. Tahar	Professeur U. Ouargla	Examineur
Mr. KHENFER Med Mouldi	Professeur U. Laghouat	Examineur
Mr. GOUAL Mohamed Sayah	Professeur U. Laghouat	Rapporteur

Promotion 2014

ملخص:

هذا العمل هو جزء من مجال بحث واسع يتمثل في تثمين واستغلال المواد المحلية وكذا النفايات الصناعية الصلبة في تطوير مواد بناء خاصة. يتمحور هذا البحث حول إمكانية استعمال الرمال الكثبانية المتوفرة بكميات كبيرة في الصحراء الجزائرية و الإضافات المعدنية الناعمة المتحصل عليها من غربلة بقايا صناعة الأجر الطيني في مجال مواد البناء. الهدف الرئيسي من العمل المقدم، هو دراسة طريقة تصنيع خرسانة خفيفة خلوية باستعمال رمال الكثبان لمنطقة غرداية. شملت الدراسة أيضا إمكانية استغلال بعض بقايا الورشات و النفايات الصناعية في شكل مواد ناعمة متحصل عليها عن طريق الغربلة مثل الطين المفخور في الأفران كاستبدالات في الاسمنت من أجل تحسين الخصائص الميكانيكية للمزيج. الطريقة المقترحة لتحضير الخرسانة الرملية الخلوية هي طريقة التفاعل الكيميائي للجير الناتج عن تمييه الاسمنت مع مسحوق الألمنيوم. النتائج المتحصل عليها، توضح أن الطريقة المقترحة لتخفيف الخرسانة تعتبر إلى حد ما مقبولة من حيث تخفيض الناقلية الحرارية للمواد المنتجة، إلا أن نسبة انخفاض الكتلة الحجمية ليست بالمستويات المرجوة إذا ما قورنت بالخرسانة الخلوية المعقمة المنتجة صناعيا باستعمال الرمل المسحوق، الاسمنت و الجير الكلسي بنسب معينة. كما بينت النتائج إمكانية استعمال مسحوق الطين المفخور كاستبدالات في الاسمنت بنسبة تصل إلى 20% دون التأثير على الخصائص الميكانيكية للمنتج بقدر محسوس، و هذا يساعد في اقتصاد مادة الاسمنت من جهة و المساهمة في الحفاظ على البيئة من جهة أخرى.

Résumé :

Cette étude fait partie d'une thématique de recherche principale axée sur la valorisation et l'exploitation des ressources locales ainsi que certains résidus industriels solides pour la mise au point de matériaux de construction spéciaux. Ce travail est axé sur l'étude des potentialités d'utilisation des sables de dunes en abondance dans les régions du sud Algérien, ainsi que les fines minérales issues du broyage de déchets argileux dans le domaine des matériaux de construction. L'objectif principal du présent travail est l'étude d'un procédé d'élaboration d'un béton léger cellulaire en utilisant les sables de dunes de la région de Ghardaïa. L'étude a mis le point sur les possibilités d'utiliser les fines minérales d'argile calcinée comme substituant au ciment dans l'élaboration du béton de sable de dune. Le procédé d'allègement de la pâte minérale sable de dune-ciment adopté dans cette étude et la création d'une structure cellulaire dans la pâte fraîche par réaction chimique avec la poudre d'aluminium. Les résultats obtenus montrent que le procédé d'allègement adopté permet de diminuer la conductivité thermique des bétons cellulaires élaborés tout en gardant les propriétés mécaniques dans les limites préconisées par les réglementations en vigueur. Toutefois, le taux d'allègement obtenu reste en dessous des résultats attendus en comparant nos résultats avec ceux du béton cellulaire autoclavé produit industriellement en utilisant du sable broyé, du ciment et de la chaux avec des proportions bien déterminées. Les résultats ont montrés également la possibilité de substitution du ciment avec des fines d'argile calcinée jusqu'à un taux de 20% sans affecter les propriétés mécaniques de manière significative. Ceci, permet une économie dans le ciment d'un côté et la protection de l'environnement de l'autre.

Abstract:

This study is a part of a main research thematic focuses on the valorization and uses of local and some industrial by-production the development of special building materials. This work is focused on studying the potentiality of use of dune sand of southern Algerian and mineral fines coming from grading clay waste in the field of building materials. The main objective of this work is the study of a process of developing a lightweight cellular concrete using the dune sand of Ghardaïa region. The study has an update on the possibilities of using calcined mineral clay fines as cement replacement in the development of dune sand concrete. The lightening process of the mineral dune sand-cement paste adopted in this study is the creation of a cellular structure in the fresh paste by chemical reaction with the aluminum powder. The results show that the lightening process adopted reduces the thermal conductivity of elaborated cellular concretes, while keeping the mechanical properties within the limits recommended by the normative codes. However, the lightening rate obtained remains below the projected results in comparing our results with the densities of autoclaved aerated concrete (AAC) produced industrially using crushed sand, cement and lime with well-defined proportions. The results have also shown the possibility of substitution of cement with calcined fine clay, up to 20%, without significantly affecting the mechanical properties. This allows a saving in the cement on one side and the environment protection on the other.

REMERCIEMENTS

*Mes premiers remerciements vont à mon directeur de ce mémoire Monsieur **Mohamed Sayah GOUAL** qui m'a témoigné son soutien et sa confiance et qui m'a prodigué un enseignement toujours judicieux et rigoureux durant toutes les phases du mémoire. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère gratitude.*

*Je tiens à exprimer toutes mes profondes reconnaissances à Mme **Z. Damene** pour son suivi, ses conseils, sa disponibilité, son enthousiasme durant l'évolution de ce travail. Qu'elle trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.*

*Je tiens également à adresser mes vifs remerciements à Monsieur **Kriker Abdelouahed**, Professeur à l'université d'Ouargla, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de mémoire.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur **Bentabba Med. Tahar**, Professeur à l'université d'Ouargla et Monsieur **Khenfer Med. Mouldi**, Professeur à l'université de Laghouat pour avoir accepté d'examiner ce mémoire et pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail.*

Mes grands remerciements vont à l'ensemble du personnel du laboratoire de Génie civil de Laghouat.

Enfin, je ne saurais oublier de remercier tous ceux qui m'ont été un soutien qu'il soit moral ou matériel.

*Je remercie tout mes collègues et le personnel du Laboratoire des Travaux Publics de Sud et surtout Monsieur **A. Amieur** pour leur accueil et aide pendant mon travail.*

Enfin tout à fait enfin je tiens à adresser mes sincères remerciements ainsi que ma gratitude la plus dévouée à mes deux étoiles scintillantes (mes parents)-que le Bon Dieu me les garde aussi longtemps -pour leur dévouement et surtout pour leur amour et le sacrifice qu'ils m'ont accordés. A mes frères et sœurs pour leur soutien. Et pour conclure à toute personne ayant contribué de loin ou de près à mon éducation et ma formation.

Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Je remercie le dieu le tout puissant de m'avoir motivé à réaliser ce modeste travail.

Je dédie ce travail à :

- ❧ La plus précieuse perle que j'ai au monde ma chère grand-mère **MESSAOUDA** que dieu la garde pour moi et que je puisse l'honorer toute ma vie.
- ❧ Ma très chère mère, qui m'a accompagné durant les moments les plus rudes de ce long parcours de mon éducation, dont je devais incessamment être de grande compétence et motivation. Cependant, Je prie Dieu le Miséricordieux qu'il te portera récompense, car la mienne ne sera guère complète.
- ❧ A mon père qui a sacrifié sa vie afin de me voir grandir et réussir dans le parcours de l'enseignement. Celui qui a toujours resté à mes côtés dans les moments pénibles de ma vie.
- ❧ A Ma famille et mes proches.
- ❧ A mon frère et mes sœurs
- ❧ A Tous mes amis
- ❧ A Tous mes enseignants du primaire à l'université
- ❧ À ceux qui se sont sacrifiés et qui se sont donnés pour les études et dont je rends un vibrant hommage et surtout **Mme Damene.z** qui m'a soutenu tout au long de cette étude.

ISSAM SAITI.

Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des photos	
Liste des symboles et notions utilisé	
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
 CHAPITRE I .REVUE SUR LA DOCUMENTATION	
I.1. APERÇU GENERAL SUR LES BETONS DE SABLE	4
I.1.1. HISTORIQUE	4
I.1.2. DEFINITION DU BETON DE SABLE.....	5
I.1.3. CONSTITUANTS DU BETON DE SABLE.....	5
<i>I.1.3.1. Les sables</i>	5
<i>I.1.3.2. Les ciments</i>	5
<i>I.1.3.3. L'eau.....</i>	6
<i>I.1.3.4. Les fines d'ajouts</i>	6
<i>I.1.3.5. Les adjuvants.....</i>	6
<i>I.1.3.6. Les fibres</i>	7
<i>I.1.3.7. Les gravillons</i>	7
I.1.4. FORMULATION DES BETONS DE SABLE.....	7
I.1.5. PROPRIETES DU BETON DE SABLE	8
<i>I.1.5.1. Compacité.....</i>	8
<i>I.1.5.2. Maniabilité du béton frais.....</i>	9
I.1.6. COMPORTEMENT MECANIQUE DU BETON DE SABLE.....	10
I.1.7. DURABILITE	10
I.1.8. RETRAIT	11
I.1.9. FLUAGE.....	11
I.1.10. LES AJOUTS MINERAUX DANS LE BETON DE SABLE	12
I.1.11. LES ARGILES CALCINEES COMME AJOUTS MINERAUX	12
I.1.12. QUELQUE TRAVAUX ELABORES SUR LES ARGILES CALCINEES	13
I.2.REVUE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES BETONS LEGERS	17
I.2.1. DEFINITION	17
I.2.2. CLASSIFICATION DES BETONS LEGERS	17
I.2.3. PROPRIETES DES BETONS LEGERS	19
<i>I.2.3.1.Légèreté</i>	19
<i>I.2.3.2.Comportement et performances mécaniques.....</i>	21
<i>I.2.3.3.L'absorption</i>	23
<i>I.2.3.4. La sorption/ désorption</i>	24
<i>I.2.3.5.Durabilité.....</i>	25
<i>I.2.3.6. Propriétés thermiques.....</i>	25

I.3. LE BETON CELLULAIRE.....	27
I.3.1. HISTORIQUE	27
I.3.2. DEFINITION	27
I.3.3. AVANTAGES DU BETON CELLULAIRE.....	28
I.3.4. CLASSIFICATION DU BETON CELLULAIRE	29
I.3.5. PROPRIETES DU BETON CELLULAIRE.....	29
<i>I.3.5.1. La structure.....</i>	<i>29</i>
<i>I.3.5.2. La densité.....</i>	<i>30</i>
<i>I.3.5.2. La résistance a la compression</i>	<i>30</i>
<i>I.3.5.3. La résistance à la traction.....</i>	<i>31</i>
<i>I.3.5.4. Le retrait au durcissement.....</i>	<i>32</i>
<i>I.3.5.5. Absorption d'eau et capillarité du béton cellulaire.....</i>	<i>33</i>
<i>I.3.5.6. Conductivité thermique.....</i>	<i>34</i>
I.3.6. IMPACT ENVIRONNEMENTALE ET ECONOMIQUE DU BETON CELLULAIRE	35
I.4. SYNTHESE DU CHAPITRE	35

CHAPITRE II. CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

II.1. CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES	38
II.1.1. INTRODUCTION	38
II.1.2. SABLE DE DUNES.....	38
II.1.3. CIMENT.....	43
II.1.4. L'ARGILE CALCINEE.....	44
II.1.5. POUDRE D'ALUMINIUM	45
II.1.6. EAU DE GACHAGE	46
II.2. TECHNIQUES EXPERIMENTALES.....	47
II.2.1. ESSAI D'ECOULEMENT	47
II.2.2. ESSAIS DE FLEXION ET COMPRESSION SUR EPROUVETTES 40X40X160 MM.....	47
II.2.3. ESSAI DE CAPILLARITE (SORPTIVITE).....	48
II.2.4. ETUDE DE RETRAIT	50
II.2.5. MASSE VOLUMIQUE APPARENTE	52
II.2.6. MASSE VOLUMIQUE ABSOLUE.....	52
II.2.7. LA POROSITE TOTALE:.....	52
II.2.8. CARACTERISTIQUES THERMIQUES.....	53
<i>II.2.8.1. Technique de la Source Plane TPS</i>	<i>53</i>
II.2.8.1.1. Avantages de la méthode TPS.....	53
II.2.8.1.2. Démarche expérimentale.....	54
II.3. SYNTHESE DU CHAPITRE	55
RESUME DU PROGRAMME EXPERIMENTAL.....	56

CHAPITRE III. MATERIAUX ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

III.1.INTRODUCTION	58
III.2. MATERIAUX	58
III.2.1. COMPOSITION DES BETONS DE SABLE BSD	58
III.2.2. COMPOSITION DES BETONS DE SABLE BSDF	59
III.2.3. MODE DE PREPARATION DES ECHANTILLONS.....	59
a) Malaxage.....	59
b) Mise en moule.....	60
c) Mode de conservation.....	60
III.2.4. ELABORATION DU BETON CELLULAIRE	60
<i>III.2.4.1. Mode de malaxage et préparation des éprouvettes</i>	<i>61</i>
III.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX	61
III.3.1. ETUDE DE LA MANIABILITE DU BETON DE SABLE	61
III.3.2. ETUDE DE LA RESISTANCE A LA COMPRESSION DU BETON DE SABLE BSD	62
III.3.3. OPTIMISATION DU BETON AVEC AJOUTS DE FINES.....	63
<i>III.3.3.1. Etude de la résistance à la compression du béton de sable BSDF</i>	<i>63</i>
III.3.4. ETUDE DE BETON CELLULAIRE ELABORE	65
<i>III.3.4.1. La masse volumique à l'état sec</i>	<i>66</i>
<i>III.3.4.2. Porosité introduite</i>	<i>67</i>
a) Influence de la substitution de l'argile calcinée dans le ciment sur la porosité introduite.....	67
b) Influence de la substitution de l'argile calcinée dans le sable sur la porosité introduite	68
c) Influence du dosage en aluminium sur la porosité introduite	69
d) Corrélation avec la densité apparente sèche	69
<i>III.3.4.3. Résistance à la compression</i>	<i>70</i>
a) Influence de la substitution de l'argile calcinée dans le ciment	71
b) Influence de la substitution de l'argile calcinée dans le sable.....	72
c) Influence du dosage en aluminium.....	72
<i>III.3.4.4. Etude du retrait</i>	<i>73</i>
<i>III.3.4.5. Etude de l'absorptivité</i>	<i>75</i>
<i>III.3.4.6. Etude des caractéristiques thermiques</i>	<i>76</i>
a) Résultats de la conductivité thermique à l'état sec.....	77
b) Résultats de la conductivité thermique à l'état saturé	84
c) Résultats de la diffusivité thermique.....	86
III.4. SYNTHESE DU CHAPITRE	87
TABLEAU RECAPITULATIVE DES DIFFERENTS RESULTATS	88
CONCLUSION GÉNÉRALE	90
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	93

Liste des figures

CHAPITRE I .REVUE SUR LA DOCUMENTATION

Figure I.1. Différence entre béton de sable et béton ordinaire [3]	7
Figure I.2. Effet des dosages en fines sur la compacité du béton de sable [14]	9
Figure I.3. Temps d'écoulement en fonction du module de finesse [10]	9
Figure I.4. Variation du temps d'écoulement en fonction de (E/C).[3]	10
Figure I.5. Influence du rapport E/C sur la maniabilité d'un béton de sable unaire.[15]	10
Figure I.6. Retrait d'auto-dessiccation.[3]	11
Figure I.7. Retrait total.[3]	11
Figure I.8. Fluage d'auto-dessiccation. [3]	11
Figure I.9. Fluage total. [3]	11
Figure I.10. La résistance relative du mélange métakaolin-ciment par rapport à l'âge de cure, le type de métakaolin et le taux d'ajout de métakaolin (la résistance relative : le rapport de la résistance du métakaolin-ciment à la résistance du ciment portland seul) [29].	15
Figure I.11. La relation entre la résistance mécanique et le temps de cure des mélanges de kaolin calcinés-ciment pour différents rapports (eau/liant) [30]	16
Figure I.12. Classification des bétons légers	17
Figure I.13. Structures des bétons légers.	18
Figure I.14. Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves en fonction du diamètre des pores [41]	20
Figure I.15. : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment d'après [31],	21
Figure I.16. La résistance à la compression 28j en fonction de la masse volumique [42]	22
Figure I.17. Courbes de sorption et désorption du béton cellulaire de $\rho = 500\text{kg/m}^3$ à $T=20^\circ\text{C}$ [44]	24
Figure I.18. Conductivité thermique λ en fonction de la teneur en eau massique ω du matériau [44]	26
Figure I.19. Comparaison de retrait dû au séchage pour différents matériaux [57].	33
Figure I.20. Absorption capillaire pour différents matériaux [57]	34
Figure I.21. Conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique sèche du béton cellulaire [44].	34

CHAPITRE II . CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Figure II.1. Courbe granulométrique du sable de dune.	38
Figure II.2. Détermination de l'équivalent de sable.	39
Figure II.3. Diffractogramme aux rayons X du ciment.	43
Figure II.4. Diffractogramme aux rayons X des argiles calcinées.	44
Figure II.5. Dispositif de flexion par trois points.	47
Figure II.6. Ruptures en compression.	47
Figure II.7. schéma de l'essai de capillarité.	48
Figure II.8. Appareillage pour la mesure du retrait.	50

Liste des figures

CHAPITRE III MATERIAUX ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

Figure III.1. Evolution du temps d'écoulement en fonction du rapport E/C.	61
Figure III.2. Evolution de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C.	61
Figure III.3. La résistance à la compression relative des BSDF .	63
Figure III.4. L'évolution de la porosité introduite en fonction du dosage en poudre d'aluminium.	67
Figure III.5. L'évolution de la porosité introduite en fonction du dosage en poudre d'aluminium.	68
Figure III.6. L'évolution de la densité apparente en fonction du dosage en poudre d'aluminium.	69
Figure III.7. L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage en poudre d'aluminium.	70
Figure III.8. L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage en poudre d'aluminium.	71
Figure III.9. Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (BCr).	73
Figure III.10. Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (BC10).	73
Figure III.11. Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (BC15).	74
Figure III.12. Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (BC15S).	74
Figure III.13. Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sorptivité du béton cellulaire (BCr).	77
Figure III.14. Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sorptivité du béton cellulaire (BC10).	77
Figure III.15. Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sorptivité du béton cellulaire (BC15).	78
Figure III.16. Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sorptivités du béton cellulaire (BC15S).	78
Figure III.17. Evolution de la conductivité thermique en fonction du dosage en agent expansif.	82
Figure III.18. Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique des bétons cellulaires.	83
Figure III.19. Evolution de la conductivité thermique à saturation en fonction de la densité.	85

Liste des tableaux

CHAPITRE I .REVUE SUR LA DOCUMENTATION

Tableau I.1. Classification des bétons légers selon la masse volumique [32]	18
Tableau I.2. Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction [32].	19
Tableau I.3. Caractéristiques de quelques bétons légers [43]	23
Tableau I.4. Porosité ouverte des granulats et proportion capillaire de diamètre $>2 \mu\text{m}$	24
Tableau I.5. Caractéristiques thermiques de quelques matériaux [43]	26
Tableau I.6. Classification du béton cellulaire selon la masse volumique et la résistance à la compression.	29
Tableau I.7. Résistance à la compression du béton cellulaire selon la densité.	31
Tableau I.8. Formules empiriques reliant la résistance a la compression, la composition et la porosité [47]	31
Tableau I.9. Valeurs caractéristiques de la résistance à la traction par flexion	32

CHAPITRE II . CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Tableau II.1. Analyse chimique du sable de dunes	38
Tableau II.2 : Caractéristiques physiques du sable de dune.	42
Tableau II.3. Caractéristiques physiques du ciment utilisé.	42
Tableau II.4. Composition chimique du ciment utilisé.	43
Tableau II.5. Composition minéralogique du ciment utilisé.	43
Tableau II.6. Caractéristiques physiques des fines utilisées.	44
Tableau II.7. Analyse chimique des fines d'argiles calcinée	44
Tableau II.8 : Composition chimique de l'eau de gâchage.	45

CHAPITRE III MATERIAUX ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

Tableau III.1. Composition des mélanges à élaborer.	58
Tableau III.2. Composition des mélanges de béton de sable avec ajouts de fines BSDF .	62
Tableau III.3. La résistance à la compression des BSDF (Mpa).	63
Tableau III.4. Composition des bétons cellulaires BCr .	64
Tableau III.5. Composition des bétons cellulaires BC10 .	64
Tableau III.6. Composition des bétons cellulaires BC15 .	65
Tableau III.7. Composition des bétons cellulaires BC15S .	65
Tableau III.8: Masses volumiques des quatre compositions du béton cellulaire à l'état sec.	66
Tableau III.9: Résistances à la compression des bétons cellulaire élaborés.	70
Tableau III.10: Sorptivités de quelques matériaux en fonction de la densité.	79
Tableau III.11: Les valeurs de la conductivité thermique λ à sec.	80
Tableau III.12: les valeurs de la conductivité thermique λ saturé.	84
Tableau III.13: les valeurs de la diffusivité thermique α des béton cellulaires élaborés.	86
Tableau III.14: Récapitulative des différents résultats.	87

Liste des photos

CHAPITRE II . CARACTERISATION DES MATIERES PREMIERES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Photo II.1. Voluménoètre de LeChatelier.	40
Photo II.2. Perméabilimètre de Blaine.	41
Photo II.3. diffractomètre aux rayons X de l'université de Laghouat.	42
Photo II.4. Maniabilimètre B (180x90x90mm).	43
Photo II.5. Montage expérimentale utilisé dans l'essai d'absorption.	48
Photo II.6. Appareil de retrait utilisé.	50
Photo II.7. Mesure de propriétés thermique à l'aide du system « Hot Disk »	53
Photo II.8. La sonde Hot Disk .	54
Photo II.9. Dispositif de serrage.	54

CHAPITRE III MATERIAUX ET RESULTATS EXPERIMENTAUX

Photo III.1. Malaxeur normalisé pour pâte et mortier utilisé.	58
Photo III.2. Mode de conservation des éprouvettes.	59
Photo III.3: Dispositif expérimentale utilisé dans l'essai d'absorption d'eau par capillarité (sorptivité).	76

Notations employées

Φ_1 : porosité intrinsèque du liant.

V_{liant} : volume total occupé par la pâte de liant (m^3)

E_b : module d'élasticité du bétons .

ρ_b : masse volumique apparente du béton en t/m^3 .

σ_{jm} : Résistance à la compression du béton sur cubes à (j) jours (kg/cm^2).

M_f : module de finesse.

V : Vitesse de décantation de la particule en (cm/s).

ρ_{app} : masse volumique apparente (kg/m^3).

ρ_{abs} : masse volumique absolue (kg/m^3).

M : Masse du matériau.

ρ_s, ρ_0 : Masse volumique du solide et du fluide en (g/cm^3).

η : viscosité.

D : Diamètre de la particule.

g : Accélération de la pesanteur.

S : Surface spécifique (cm^2/g).

k : Constante de l'appareil Blaine.

e : Porosité de la couche tassée.

t : Temps mesuré en secondes.

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

C : Compacité.

P : Porosité.

G : gravier.

S : sable.

T : température ($^{\circ}\text{C}$).

HR : l'humidité relative %

ESp : équivalent de sable au piston

ESv : équivalent de sable visuel

SD : Sable de dune

R_t : résistance à la traction (MPa).

F_t : Charge à la rupture (N).

Symboles et notations employées

b : largeur de la section carrée du prisme (mm).

R_c : résistance à la compression (MPa)

$\Delta L/L$: variation dimensionnelle (mm)

L_f : La longueur finale.

L_i : La longueur initiale

L_0 : La longueur initiale après 24h de moulage.

ε : la porosité totale

V_v : volume des vides (m^3).

V_t : volume total

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

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

ρ_w : masse volumique de l'eau liquide (1 g/cm^3).

i : volume d'eau absorbé par unité de surface.

S_w : sorptivité ($\text{mm} \cdot \text{mn}^{-0.5}$).

t : temps de mesure (min).

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

a : Diffusivité thermique ($m^2 \cdot s^{-1}$)

λ_{sec} : conductivité thermique à l'état sec.

λ_{sat} : conductivité thermique à l'état saturé.

a_{sec} : Diffusivité thermique à l'état sec.

a_{sat} : Diffusivité thermique à l'état saturé.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

INTRODUCTION GÉNÉRALE

De nombreuses régions en Algérie, principalement les zones sahariennes, des montagnes de l'Atlas et des hauts plateaux entre les deux chaînes de l'Atlas, connaissent d'importantes variations de température du climat extérieur, tant journalières que saisonnières. Ce qui implique le chauffage des logements durant la saison froide et les climatiser durant la saison chaude. La consommation d'énergie sera importante, tant en hiver qu'en été, les coûts également.

Actuellement, le prix de l'énergie a d'ailleurs tendance à augmenter rapidement en Algérie et dans tous les pays en développement. La consommation d'énergie des maisons pourrait être largement diminuée si les toitures et les murs avaient une meilleure isolation thermique. Aujourd'hui, le coefficient de transmissibilité thermique des toitures et des murs des maisons algérienne est très élevé. Ces valeurs peuvent être sensiblement abaissées si on a recours à des matériaux thermiquement isolants. D'après une étude effectuée sur une maison de dimensions moyennes située à Ghardaïa [1], on arrive à une diminution de la consommation énergétique annuelle d'environ 40% si on utilise un double vitrage et en isolant les murs et la toiture de façon à ramener le coefficient de transmissibilité thermique de la toiture de la valeur 2.3 à 0.50 W/(m².K) et celui des murs de la valeur 1.9 à 0.80 W/(m².K) par l'utilisation de matériaux thermiquement isolants. C'est donc dans cette optique que se sont orientés nos travaux.

Par ailleurs, la tendance actuelle dans la recherche de nouveaux matériaux de construction est la valorisation des matériaux locaux pour la mise au point de matériaux performants et durables avec le moindre coût. En effet, le sud de l'Algérie est connu par ses dunes de sable qui occupent plus de 60% de la surface de l'Algérie. Dans l'optique de valorisation de ressources locales, l'idée de promouvoir l'utilisation du sable de dunes dans la fabrication de mortiers et bétons s'avère intéressante.

En effet, de nombreux travaux, dans des thématiques scientifiques diverses, ce sont focalisés sur les bétons de sables [2-7]. Ces bétons se distinguent des bétons ordinaires par l'emploi de granulats de faible diamètre ($\phi < 5$ mm) dont le béton de sable de dune fait partie. Ces bétons, contrairement aux mortiers ordinaires demandent un dosage en ciment proche des bétons classiques (300 à 400 kg/m³). Malgré ces dosages élevés, les performances mécaniques des bétons de sable de dune demeurent en dessous de celles des bétons ordinaires. Afin de pallier ce problème, des recherches se sont orientées vers l'utilisation de fines minérales comme substituants partiels du ciment ou du sable dans la fabrication des bétons et mortiers.

Dans l'optique d'une valorisation du sable de dune de la région de Ghardaïa, 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 et l'étude d'un procédé d'allègement d'une pâte minérale à base de sable de dune de la région de Ghardaïa et du ciment. La voie envisagée dans ce travail est la création d'une structure cellulaire dans la pâte par réaction chimique avec l'aluminium pulvérulent.

Sur ce, le travail expérimental est subdivisée en deux volets:

- Le premier consiste en la recherche d'une composition optimale de mélange Sable-ciment, qui confère au béton de sable de dune la résistance mécanique escomptée. Afin de rentabiliser l'utilisation du ciment, une étude de la substitution partielle du ciment par des fines d'argile calcinée dans la composition optimale a été abordée.
- Le deuxième consiste en l'étude d'un procédé d'allègement du béton de sable à composition optimale par entrainement d'air dans la matrice par réaction chimique avec la poudre d'aluminium.

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

- Le premier chapitre est consacré à des généralités sur le béton de sable, suivie d'une revue sur la documentation relative aux ajouts minéraux et les bétons légers, en particulier le béton cellulaire.
- Le deuxième chapitre constitue une description des techniques expérimentales utilisées et la caractérisation des matières premières.
- Le troisième chapitre a été consacré à l'analyse et discussion des résultats expérimentaux relatifs au comportement physico-mécanique et thermique du béton cellulaire à base de mélange de fines d'argile calciné et ciment en plus du sable de dune.

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

CHAPITRE I
RÉVUE SUR LA DOCUMENTATION

I. Revue sur la documentation

I.1. Aperçu général sur les Bétons de sable

I.1.1 Historique

Il y a plus de deux milles ans, les romains utilisaient comme liant la chaux vive obtenue par la cuisson du calcaire. Ils employèrent cette chaux mélangée à du sable après avoir constaté que lorsque ce sable était d'origine volcanique, ils obtenaient un produit très résistant, durable et capable de faire prise avec l'eau. De grands monuments tels les « **Panthéon** », les « **Colisée** » témoignent de la durabilité du premier matériau composite de l'histoire des techniques industrielles [2].

En union soviétique, le béton de sable est une technique connue depuis très longtemps. A l'origine, son développement tient à l'absence de granulats dans de nombreuses régions de ce pays, mais à l'heure actuelle, il est même préféré au béton traditionnel dans certains emplois; en particulier, les travaux de réhabilitation par projection (ponts, bâtiments, silos, égouts, etc.).

Mais, l'utilisation du béton de sable proprement dit, et à grande échelle, a commencé en France à la deuxième moitié du 19^{ème} siècle; suite aux travaux effectués par F.Coignet qui a procédé au mélange sans caillou, de sable et peu d'eau, de cendres, de scories de charbon brûlé, de terre argileuse cuite et pilée et de la chaux hydraulique afin de réaliser plusieurs ouvrages. Ceux-ci constituent les premières applications de cette technique dont certains sont encore en service [3].

Les possibilités qu'offrait ces matériaux et vu la rareté des agrégats en URSS; cette technique a été utilisée à grande échelle et ceci suite aux travaux effectués par le comte Nicolas de Rochefort en 1918. Durant les années vingt elle est tombée en sommeil et ce n'est que durant la deuxième guerre mondial qu'elle est devenue d'actualité [2] grâce à ses propriétés spécifiques, à la pénurie des gros granulats dans certaines régions et bien entendu à la disponibilité de gros gisements de sable [4]. Les Russes construisent des pistes aéronautiques et composantes du génie civil en béton de sable où ils ont développé une méthodologie de formulation et de mise en œuvre dans la préfabrication et projection [2].

En France, ce n'est qu'à partir des années soixante-dix qu'un réel regain d'intérêt s'est manifesté en faveur du béton de sable, notamment dans le sud-ouest. Les premières applications ont été réalisées avec succès à partir des années quatre-vingt [5], à l'initiative du laboratoire régional des ponts et chaussées de Bordeaux. Devant les succès de ces expériences, le projet **SABLOCRETE** a vu le jour en 1988.

En Algérie, malgré l'abondance de sable de dunes dans le sud du pays, ce matériau reste inconnu. Une tentative du **CNERIB** en 1988 a été vite abandonnée, et elle reste sans suite.

Le même sable (sable de dunes) a été utilisé au Golf d'Arabie pour la construction de murs de soutènement et pour la préfabrication des dalles et plancher [6].

I.1.2. Définition du béton de sable

La norme Française AFNOR NF P18 500 (juin 1995) [7] 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 à 0,7 (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.1.3. Constituants du béton de sable

I.1.3.1. Les sables

Les sables utilisables sont ceux conformes aux définitions des normes NFP18-541[8] ($ES \geq 75$ si le sable est roulé et $ES \geq 65$ s'il est concassé) [2]. Il peut s'agir d'un sable alluvionnaire, de ballastière ou de concassage 0/D. Aucun critère granulométrique n'est exigible a priori, la seule restriction d'emploi réside dans la propreté. Les sables de plage ou des dunes pourraient donc être utilisés [6].

I.1.3.2. Les ciments

Ceux utilisés sont conformes à la norme NFP15-301[8], ils sont utilisés comme liants hydrauliques, servent à combler les vides entre les grains de sable et jouent le rôle de fillers. Les

dosages en ciments sont du même ordre de grandeur que ceux des bétons classiques (entre 200 et 400 Kg/m³). Dans cette fourchette et pour un même usage que des bétons classiques, le dosage retenu pour le béton de sable est généralement plus élevé; dans la plus part des cas.

I.I.3.3. L'eau

Elle est conforme à la norme NFP18-303[8]. La proportion élevée d'éléments fins nécessite un volume de mouillage plus important, élevant le rapport E/C au-dessus de celui des bétons ordinaires; on utilise la valeur E/C la plus faible possible en augmentant la compacité et en utilisant des plastifiants (adjuvants réducteurs d'eau) [9]; l'incorporation de plastifiant réducteur d'eau et la sélection de fillers adéquats peuvent réduire la quantité d'eau dans des proportions non négligeables.

I.I.3.4. Les fines d'ajouts

Une qualité essentielle du béton de façon générale est sa compacité. Les paramètres essentiels qui vont jouer sur la compacité sont :

- La granulométrie du mélange et sa teneur en eau,
- L'énergie de mise en place [3].

Des fillers de dimensions majoritairement inférieures à 80 µm sont utilisés pour remplir les vides entre les grains de sable afin de réduire la quantité de ciment. Leur rôle assure deux fonctions principales : l'une grossière de remplissage, l'autre d'ordre physico-chimique devant améliorer l'enchevêtrement cristallin et la cohésion du mélange [9].

La forme des grains et la nature géologique des fillers influent sur la quantité d'eau requise pour obtenir un mélange maniable.

I.I.3.5. Les adjuvants

Les adjuvants employés devront être conformes aux normes NFP 18-340[8]. Généralement on utilise des plastifiants ou super plastifiants dont l'objectif est d'améliorer la maniabilité du béton de sable en réduisant la quantité d'eau ce qui augmente les caractéristiques du béton. Ils ont un rôle essentiel dans la technique des bétons de sable; ils dé floclent les éléments fins et permettent de limiter le dosage en eau; le rapport E/C dans les bétons de sable est plus élevé que dans les bétons traditionnels: diminuer ce rapport permet d'augmenter les performances (accroissement de la compacité et résistances) et de réduire les risques de retrait excessif [9].

D'autre adjuvant tels que les entraîneurs d'air sont ajoutés pour créer un réseau de microbulles d'air qui assurent la protection du béton de sable vis-à-vis du gel et des fondants utilisés en période hivernale. Leur utilisation est obligatoire dans les zones froides [3].

I.1.3.6. Les fibres

Les fibres formées de matière résistante à la traction sont additionnées afin d'obtenir un matériau doté d'une certaine résistance à la traction.

Elles sont surtout utilisées dans le but d'améliorer le comportement du béton aux jeunes âges ainsi que ses caractéristiques mécaniques. On utilise, dans le cas échéant, des fibres organiques (polyester, polypropylène ...etc.), métalliques, de végétaux, treillis, alvéoles [9] pour limiter les effets de retrait de prise et éviter la fissuration qui en résulte. Le dosage et la nature sont des paramètres très importants pour assurer l'efficacité de ces ajouts.

I.1.3.7. Les gravillons

Le béton de sable peut contenir un certain pourcentage de gravillons et prend la dénomination de « béton de sable chargé ». En effet, tant que les gravillons sont dispersés dans le sable (**figure I.1**), et ne constituent pas un squelette structuré, le comportement reste généralement le même [3]. Les gravillons utilisés doivent être conformes aux spécifications de la norme NFP 18-541.

L'ajout de gravillons, en faible dosage, a pour objectif d'améliorer certaines caractéristiques du béton de sable telles que la maniabilité, le retrait, le fluage et la résistance mécanique.

En pratique, on pourra considérer qu'on a un béton de sable tant que le rapport pondéral (G/ S) reste inférieur à 0,7 [10], alors qu'il est compris entre 1,4 et 1,7 pour les bétons traditionnels.

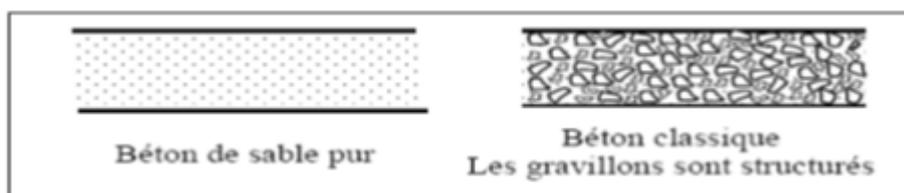


Figure I.1. Différence entre béton de sable et béton ordinaire [3]

I.1.4. Formulation des bétons de sable

Le béton de sable de dune est un matériau nouveau encore au stade de la recherche. Le principal problème posé par son emploi est la conception de méthode de compositions compatibles avec les divers usages qu'on en fait.

Les performances d'un béton de sable sont extrêmement dépendantes de la qualité et de la rigueur de la formulation. Quelques exemples de formulations théoriques [11], qui fournissent des ordres de grandeurs très plausibles des dosages des différents constituants, ont été proposés pour des matériaux bien déterminés. La démarche, dans la plupart des cas de ces formulations, demeure très empirique. Elle consiste à optimiser la compacité du béton et à estimer ensuite ses performances potentielles. L'estimation de la résistance a été menée en vue d'une optimisation du dosage en fillers.

Le formulateur dispose alors de la possibilité, pour un jeu de constituants donné, de faire varier le dosage en ciment pour affiner la résistance, en demeurant à la compacité optimale.

Ces méthodes théoriques de formulation, malgré les limitations faites de nombreuses hypothèses qui la jalonnent, constituent une base pour la mise au point d'une formule de béton de sable qui doit ensuite être validée et ajustée expérimentalement.

Il existe d'autres méthodes expérimentales qui peuvent différer en fonction de l'approche théoriques adoptées à la base. Toutefois, l'objet reste le même : formuler un béton de sable qui soit le plus compact possible en accord avec les autres caractéristiques recherchées (possibilité de pompage, facilité de moulage et aptitude à la projection). [12]

Les approches de formulation des bétons de sable sont complétées par, la méthode de formulation théorique basée sur l'optimisation de la compacité de squelette granulaire, et la méthode expérimentale basée sur la réalisation de gâchées successives.

I.1.5. Propriétés du béton de sable

I.1.5.1. Compacité

La compacité est une qualité essentielle qui influe sur les performances du béton. L'optimisation de la compacité relève d'une démarche visant à minimiser la quantité d'eau à ajouter au mélange sec et à optimiser la teneur des ajouts.

- **Effet de la granulométrie du sable sur la compacité**

D'après plusieurs études expérimentales [3], il a été montré qu'un sable alluvionnaire ($D_{\max} \cong 5\text{mm}$) nécessite moins de fines qu'un sable de dune ($D_{\max} < 1\text{mm}$). Ceci pourra s'expliquer par le fait que la porosité dépend de la granulométrie du sable qui est une fonction de la nature du sable, et plus le sable est poreux (le cas d'un sable dunaire) plus on a besoin de fines. Bien que dans ce cas cet inconvénient soit compensé par l'ajout de fines qui améliore la compacité, le béton de sable reste toujours moins compact que le béton ordinaire [13].

• **Effet de l'addition des fines**

En fonction de la finesse, du dosage en fines et du dosage en ciment, on a pu remarquer qu'il existe un dosage optimal à partir duquel la compacité commence à diminuer (**figure I.2**).

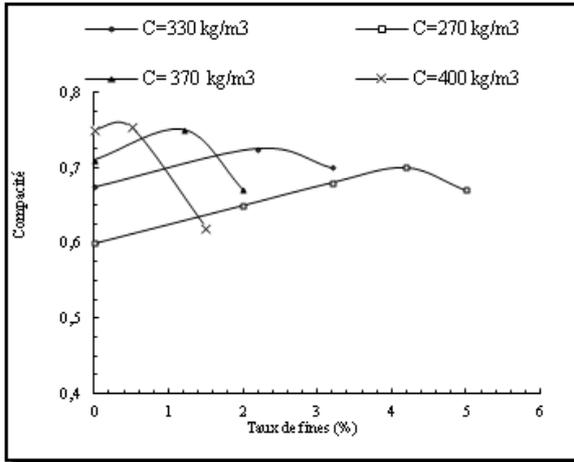


Figure I.2. Effet des dosages en fines sur la compacité du béton de sable [14]

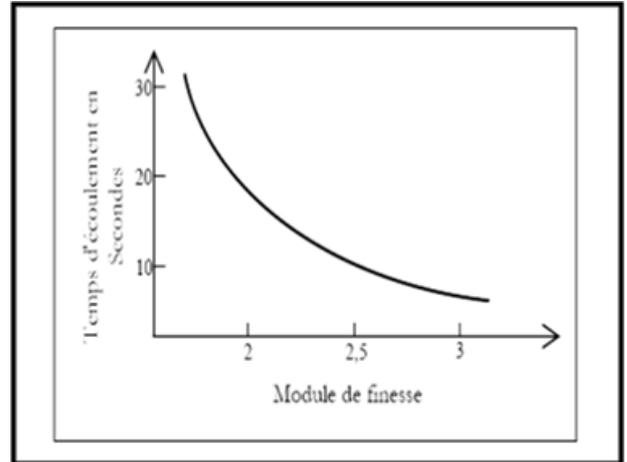


Figure I.3. Temps d'écoulement en fonction du module de finesse [10]

I.1.5.2. Maniabilité du béton frais

La maniabilité est l'une des caractéristiques de grande importance, elle dépend essentiellement de la qualité et de la quantité d'eau utilisée.

La granulométrie du sable influe sur les besoins en eau de mélange; plus le sable est riche en éléments grossiers plus la maniabilité s'améliore comme le traduit la **figure I.3** qui exprime une relation entre le module de finesse et la maniabilité.

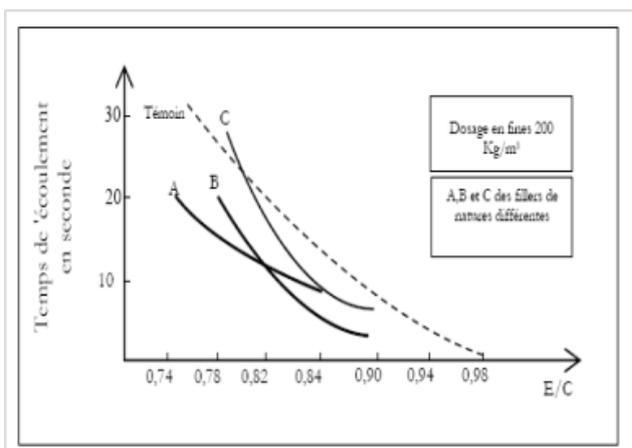


Figure I.4. Variation du temps d'écoulement en fonction de (E/C) [3].

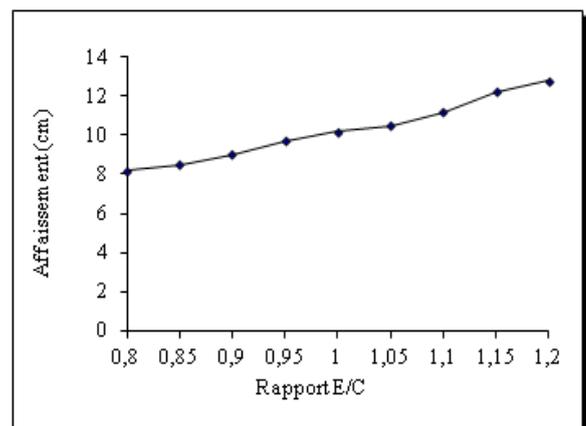


Figure I.5. Influence du rapport E/C sur la maniabilité d'un béton de sable dunaire [15]

La **figure I.4** montre clairement que la maniabilité est améliorée quand le rapport E/C augmente. Cependant, pour un rapport E/C fixe, la maniabilité dépend de la nature des fines d'ajout.

La faible étendue granulaire du béton de sable et donc la grande homogénéité combinée à une bonne maniabilité attribuent au béton de sable un meilleur comportement que les bétons traditionnels, vis-à-vis de la ségrégation.

En suivant les règles de formulation, basée sur une optimisation complète de la compacité, les bétons de sable doivent présenter une bonne ouvrabilité, de l'ordre de 7 à 10 secondes au maniabilimètre LCL à mortier [3].

D'après la **figure I.5** ci-dessous, la maniabilité des bétons de sable dunaire augmente considérablement si on augmente E/C.

I.1.6. Comportement mécanique du béton de sable

Les performances mécaniques ne sont pas les seuls critères de jugement de la qualité d'un béton, même si la classification des bétons selon des performances mécaniques reste un repère dans l'esprit des utilisateurs. Aussi, même s'il est vrai que les résistances des bétons de sable sont en général inférieures à celles des bétons classiques d'une part, et que la cinétique de montée en résistance est plus lente ce qui peut en limiter l'usage pour des ouvrages mis en charge précocement, d'autre part, il est aisé d'obtenir des bétons de sable à hautes performances mécaniques, même à court terme.

La résistance dépend d'un certain nombre de paramètres tels que : La finesse des fines d'addition, la nature de fines d'addition, la dimension du D_{max} ...

I.1.7. Durabilité

Les paramètres tels que porosité, répartition géométrique des pores et perméabilité sont des paramètres physiques de premier ordre de la durabilité.

D'une façon générale, les bétons de sable sont plus poreux que les bétons traditionnels. Leur pores sont plus nombreux, plus petits et davantage monodimensionnels. Cette distribution poreuse particulière contribue pour une bonne part à leur bon comportement vis à vis des essais de durabilités [3,16].

I.1.8. Retrait

Il existe deux sortes de retraits :

Le retrait endogène : ce retrait est caractérisé par une cinétique semblable aux autres gammes de béton, une différence de l'ordre de 10% environ par rapport à ce dernier.

Retrait de dessiccation (retrait de séchage): ce retrait a lieu en milieu ambiant et peut atteindre des valeurs deux fois plus importantes que celles des bétons classiques du moins pendant les deux premiers mois, ensuite il y'a une tendance à la stabilisation. Ce phénomène semble être lié à la taille et à la distribution des pores dans les bétons [17].

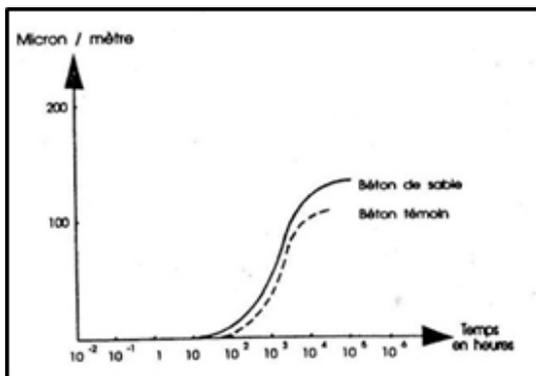


Figure I.6. Retrait d'auto-dessiccation [3]

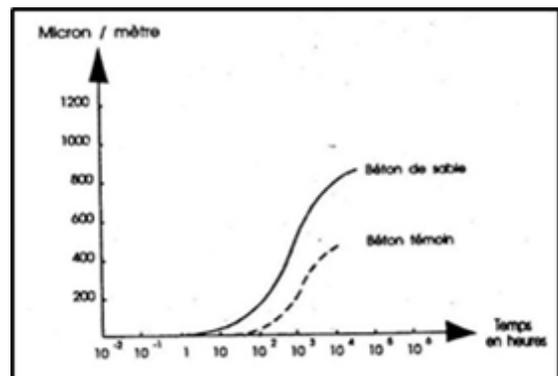


Figure I.7. Retrait total [3]

I.1.9. Fluage

La cinétique de fluage propre n'est pas très différente des bétons ordinaires aux bétons de sable, alors que le fluage de dessiccation du béton de sable a une cinétique extrêmement rapide, deux fois plus importantes.

Les valeurs du fluage du béton de sable, sont deux fois que celles du béton ordinaire (figures I.8 et I.9). Ces résultats correspondent à un niveau de résistance en compression de 25MPa. [9,12].

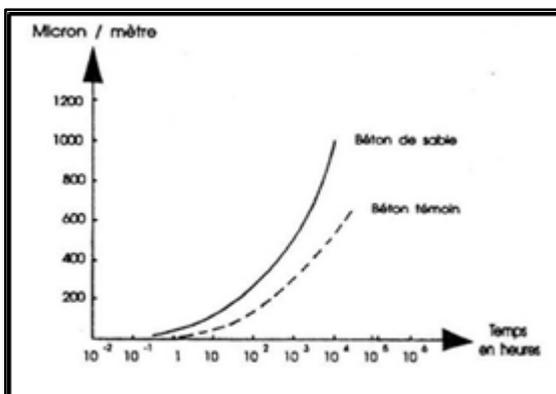


Figure I.8. Fluage d'auto-dessiccation. [3]

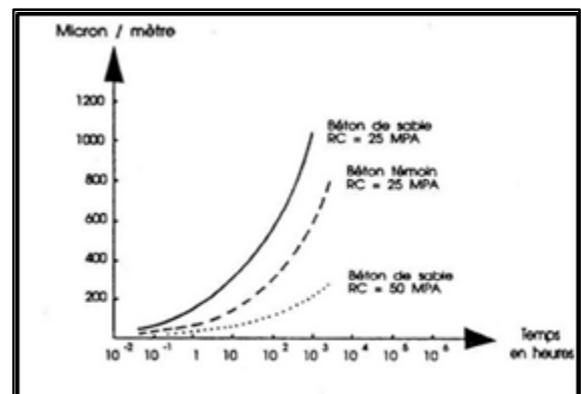


Figure I.9. Fluage total. [3]

I.1.10. Les ajouts minéraux dans le béton de sable

L'ajout des fines dans le béton de sable est nécessaire pour améliorer la compacité en complétant l'ossature granulaire et ainsi réduire le dosage en ciment onéreux.

Les performances des bétons de sable dépendent du dosage en ciment et de celui en fillers ainsi que la nature pouzzolanique ou non de ces derniers. Les fillers peuvent, non seulement combler les vides, mais aussi influencer la résistance des mortiers d'une façon favorable.

Les poudres réactives [18] telles que fumée de silice, laitiers de haut fourneau, poudres de basalte, silixites, cendres broyées de balles de riz [19], cendres volantes [20] tufs volcaniques, diatomites, etc... agissent par un double effet : correction granulométrique et effet pouzzolanique.

Le rôle des fillers dans le béton de sable assure deux fonctions principales : l'une grossière, de remplissage, l'autre complexe, d'amélioration de l'enchevêtrement cristallin et de la cohésion du mélange. Ces deux fonctions se retrouvent d'ailleurs au niveau de la rhéologie du béton de sable frais [10].

Les ajouts minéraux peuvent être naturels ou artificiels et sont classés en actifs et inertes comme suit :

1. Les ajouts minéraux actifs : la pouzzolane, la fumée de silice, les cendres volantes, le laitier de haut fourneau.....etc.
2. Principaux ajouts minéraux inertes: fillers calcaires, la poussière.....etc.

I.1.11. Les argiles calcinées comme ajouts minéraux

L'introduction de matériaux à propriétés pouzzolaniques comme les argiles calcinées, en remplacement d'un pourcentage du ciment Portland dans les mortiers et bétons peut être envisagée car ces ajouts sont utilisés pour réagir avec la Portlandite pour produire des hydrates de nature proche de ceux du ciment.

La réglementation ASTM 618-71 sur le ciment indique qu'une pouzzolane est un matériau siliceux ou silico-alumineux, ne possédant pas ou peu de propriétés liantes en lui-même, mais qui, lorsqu'il est finement broyé et en présence d'eau, peut réagir chimiquement avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) à température et pression ordinaires pour former un liant.

Les pouzzolanes sont classées en deux groupes : naturelles et artificielles. Les pouzzolanes naturelles proviennent surtout des roches volcaniques dans lesquelles le constituant amorphe est le verre produit lors du refroidissement suivant la fusion. Les pouzzolanes artificielles les plus couramment utilisées sont les cendres volantes de centrales thermiques, les fumées de

silice, la bauxite calcinée, les cendres de balles de riz et des latérites calcinées [21]. Des travaux [22,23] ont montré que les argiles calcinées étaient des pouzzolanes de synthèse réactives.

La réaction pouzzolanique est une réaction de dissolution-précipitation en milieu aqueux entre l'hydroxyde de calcium et un matériau pouzzolanique. Diverses études ont été menées sur l'analyse des différents produits de réaction d'un mélange argile calcinée, hydroxyde de calcium et eau, les composés majoritairement présents sont la géhlénite hydratée, des aluminates tétracalciques hydratée et des silicates de calcium hydratés [24]. La réaction pouzzolanique peut se résumer comme suit :

Pouzzolane + chaux + eau \Rightarrow Silicate de calcium hydraté, Silico-aluminates de calcium hydratés.

L'ordre de réactivité est directement lié à l'état de désorganisation du réseau cristallin après activation thermique, qu'il a été possible d'observer par analyse diffractométrique. Des argiles calcinées issues d'une kaolinite ordonnée présentent une cinétique de réactivité plus lente que celles issues d'une kaolinite désordonnée [25].

I.1.12. Quelques travaux élaborés sur les argiles calcinées

- **Tironi.A, Terzza.M, et al [26]** Dans leur recherche ont essayé d'examiner quatre méthodes de test pour l'évaluation de l'activité pouzzolanique sur sept argiles calcinées (cinq kaolinites et deux bentonites). Les argiles naturelles ont été calcinées et examinées par deux tests directs (Frattini et chaux saturé) et deux tests indirects (Indice d'activité de résistance et la Conductivité électrique).

Ils ont trouvé que : le test de Frattini (direct) et l'indice d'activité de résistance (indirect) sont les méthodes les plus précises et fiables d'évaluer la réaction pouzzolanique d'argiles calcinées utilisable comme ajout au ciment.

La surface spécifique importante des argiles calcinées (980-2300 m²/kg) a une grande influence sur l'activité pouzzolanique à court terme, tandis que l'activité à long terme est liée à la composition chimique et minéralogique des phases amorphes présentes dans les argiles calcinées.

La résistance à la compression à 28 jours peut être maintenue et augmentée en substituant dans le ciment 30 % des argiles calcinées contenant une grande proportion d'impuretés (plus de 40 % de quartz). Une bonne corrélation existait entre l'activité pouzzolanique mesurée par la résistance de mortiers et le contenu de minéral argileux dans les argiles.

- Dans une tentative **Badogiannis.E, Tsivilis.S, et al [27]** ont testé l'effet de métakaolin sur la durabilité du béton. Huit mélanges ont été utilisés pour produire le béton à haute performance, où

le métakaolin remplace le ciment dans des pourcentages de 10 % ou 20 % du poids de ciment témoin. La durabilité de béton à base de métakaolin a été évaluée au moyen de la résistance à la pénétration de chlorure, la perméabilité à gaz, la sorptivité, la porosité et la distribution de taille des pores. Le métakaolin abaisse significativement la perméabilité de chlorure, la perméabilité à gaz et la sorptivité. L'addition de métakaolin affine le système de pore de béton, menant à une taille de pore moyenne et améliore la distribution de taille de pore ce qui conduit à l'amélioration de durabilité.

-**Chachkhouk.A, Samet.B, et al [28]** ont calciné l'argile tunisienne de différentes provenances à 600, 700 et 800 °C. L'activité pouzzolanique des argiles calcinées est évaluée par la résistance à la compression exécutée sur des mini-cylindres d'hydroxyde de calcium d'argile calciné. Ils ont montré que les argiles riches en kaolinite peuvent avoir la plus haute résistance et donc la meilleure activité pouzzolanique et que la présence de l'illite, de la montmorillonite et le Moscovite n'améliore pas l'activité pouzzolanique malgré le taux élevé de silice, d'alumine et de fer.

-**Badogiannis.E,Kakali.G, et al [29]** étudiaient les propriétés et la procédure d'hydratation de ciment contenant du métakaolin pendant des périodes jusqu'à 180 jours. Quatre métakaolins tirés du kaolin grec pauvre et un métakaolin commercial de haute pureté ont été utilisés. Les métakaolins ont été additionnés dans les mortiers de ciment avec des pourcentages de 0 %, 10 % et 20 % par rapport au poids de ciment. L'évolution de la résistance, la quantité d'eau et le temps de prise ont été déterminée pour tous les échantillons. Les résultats montrent clairement que le métakaolin possède un effet très positif sur la résistance de ciment après 2 jours et spécialement à 28 et 180 jours. Le mortier avec le mélange ciment-métakaolin demande significativement plus d'eau que celui avec le ciment seul, l'augmentation de la demande d'eau augmente avec le contenu de métakaolin. Finalement, ils ont conclu que les échantillons contenant 10 % de métakaolin (commercialisé ou tiré du Kaolin grec) sont généralement plus favorables pour le développement de résistance mécanique de ciment, du temps de prise et de l'hydratation.

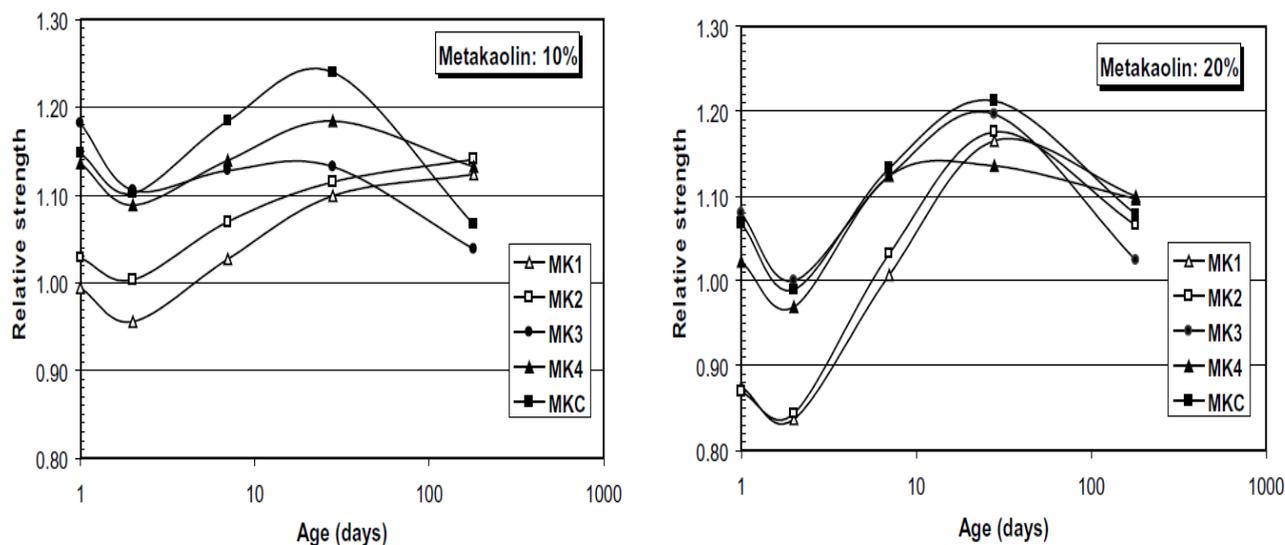


Figure I.10. La résistance relative du mélange métakaolin-ciment par rapport à l'âge de cure, le type de métakaolin et le taux d'ajout de métakaolin (la résistance relative : le rapport de la résistance du métakaolin-ciment à la résistance du ciment portland seul) [29].

-**Vu.D.D, Stroeven.P, et al [30]** dans leur étude ont traité les effets de substitution partiel de ciment Portland par le kaolin calciné sur la résistance à la compression aussi bien que sur les caractéristiques de durabilité de mortier et du béton. Ils présentent le développement de la résistance à la compression des mélanges dans lesquels le rapport eau/liant a été varié entre 0,40 et 0,53 et la substitution du kaolin variait de 0 % à 30 % du poids du ciment. Les résultats de cette étude estiment le pourcentage optimum de substitution de ciment Portland par le kaolin calciné et le gain de résistance mécanique associé. De plus, pour étudier la durabilité. Des échantillons ont été stockés pour une durée d'une année dans une basse concentration d'une solution de sulfate de sodium. Les résultats affirment un gain de résistance mécanique en raison du mélange (ciment-kaolin calciné) et une durabilité améliorée dans cet environnement.

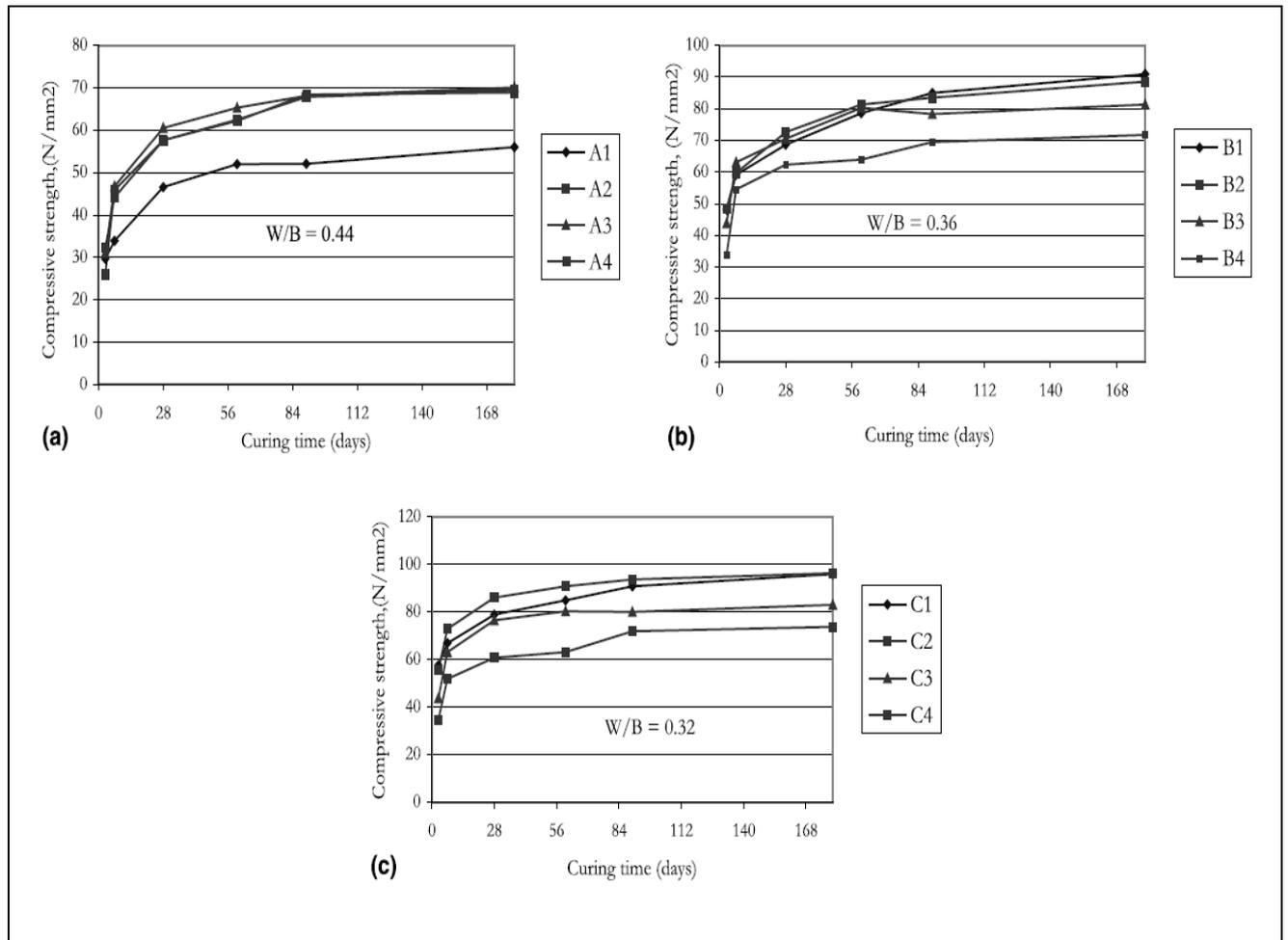


Figure I.11. La relation entre la résistance mécanique et le temps de cure des mélanges de kaolin calcinés-ciment pour différents rapports (eau/liant) [30].

I.2.Revue bibliographique sur les bétons légers

I.2.1.Définition

Le béton confectionné avec des granulats naturels provenant de roches dures a une masse volumique qui varie peu parce que la densité de la plupart des roches varie peu [31].

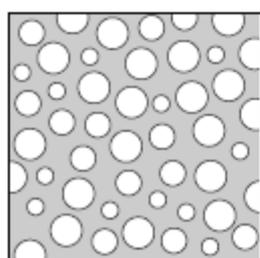
Bien que le volume des granulats dans le béton affecte sa masse volumique, ce n'est pas un facteur important. Ainsi en pratique, la masse volumique d'un béton de densité normale varie de 2200kg/m^3 à 2600kg/m^3 . En conséquence, le poids propre des éléments de béton est élevé et peut représenter un fort pourcentage de la charge sur la structure.

La commission des bétons légers **RILEM** [32] propose de définir les bétons légers comme étant des bétons dont La masse volumique apparente sèche est inférieure à 1800Kg/m^3 . D'autres auteurs adoptent des définitions un peu différentes : l'**American Concrete Institute** [33] limite la masse volumique apparente des bétons légers à 1800Kg/m^3 après séchage à l'air pendant 28 jours.

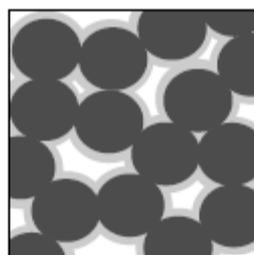
I.2.2.Classification des bétons légers

Il existe Les trois endroits possibles pour incorporer de l'air dans le béton [16]:

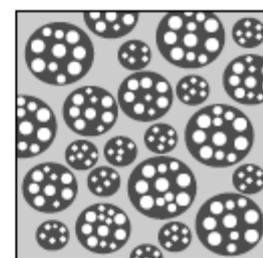
- la matrice : le béton, dans ce cas, est appelé « *béton cellulaire* ». Les bulles d'air sont créées, lors du malaxage, soit par réaction chimique, soit par action physique.
- entre les gros granulats: le béton, dans ce cas, est appelé « *béton caverneux* » (ou sans fines, ç-à-d sans sable).
- dans les granulats : le béton, dans ce cas, est appelé « *béton de granulats légers* ».



Béton cellulaire



Béton caverneux



Béton de granulats légers

Figure I.12. Classification des bétons légers

De nouveaux types de granulats légers sont actuellement utilisés : le verre expansé (meilleure résistance et faible absorption d'eau) [34], le polystyrène (possibilité de mise en œuvre par pompage) [35, 36] et les granulats de bois [37, 38].

La **figure I.14** montre quelques exemples de structures de bétons légers appartenant aux différentes catégories des bétons légers [16].

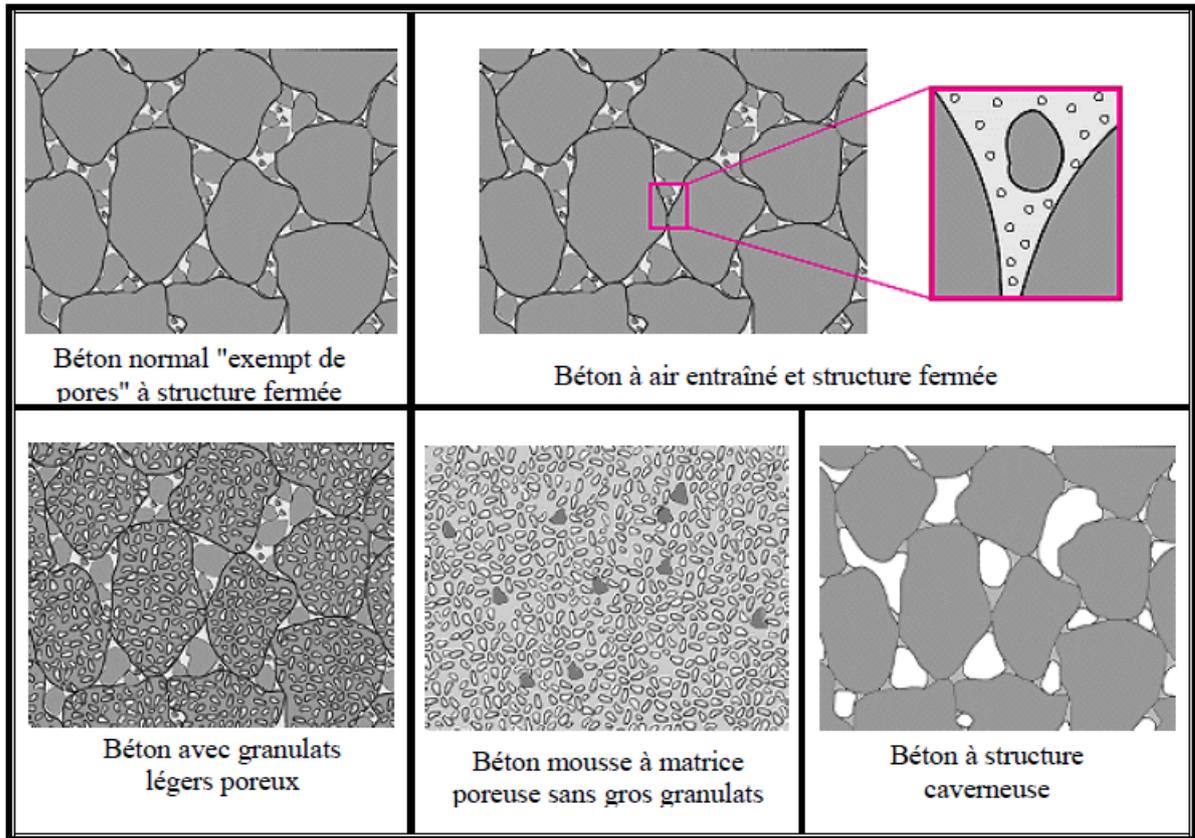


Figure I.13. Structures des bétons légers.

Puisque l'augmentation du volume d'air dans le béton s'accompagne d'une diminution de la résistance du matériau, le guide [39] distingue alors trois catégories de bétons légers, classées selon la masse volumique du matériau durci, comme l'indique le **tableau I.1**.

Tableau I.1. Classification des bétons légers selon la masse volumique [32]

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

De même **Kass J.L et Compbell D** [40], en Australie, ont adopté une classification fonctionnelle des bétons légers selon leur utilisation dans la construction Cette classification a été recommandée par la suite par les RILEM [32], selon le **tableau I.2** :

Tableau I.2. Classification des bétons légers selon l'utilisation dans la construction [32].

Type de béton léger	De construction	De construction et d'isolation	D'isolation
Masse volumique ³ (kg/m ³)	< 1800	Non précise	Non précisée
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 :**

Leur masse volumique apparente est comprise entre **300 et 1000 kg/m³**, leurs résistances en compression sont souvent faibles et leurs caractéristiques thermiques sont bonnes.

- **Des bétons porteurs isolants :**

Leur masse volumique apparente est comprise entre **1000 et 1400 kg/m³**, leurs résistances mécaniques sont nettement meilleures que celles des précédents et leurs caractéristiques thermiques sont acceptables. On les utilise généralement pour des éléments préfabriqués

- **Des bétons de structure :**

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

I.2.3. Propriétés des bétons légers

I.2.3.1. 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. 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.

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 (Å) à quelques millimètres selon l'origine de ces porosités.

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

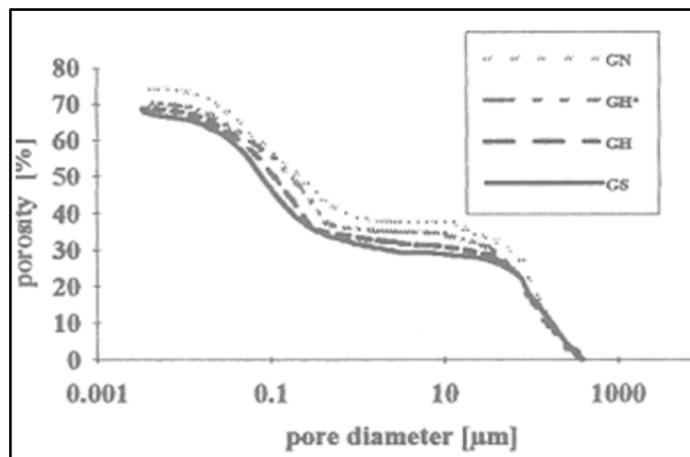


Figure I.14. Répartition de la porosité de trois bétons cellulaires autoclaves en fonction du diamètre des pores [41]

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 ϵ_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 entraineur d'air varie entre $5 \mu\text{m}$ et $1000 \mu\text{m}$ [41].

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

$$\epsilon_1 = \frac{V_{\text{vide}}}{V_{\text{liant}}}$$

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.

$$\epsilon_{meso} = \frac{V_{vide}}{V_t}$$

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 occupe par le matériau (m^3)

I.2.3.2. Comportement et performances mécaniques

Il existe une relation entre les résistances mécaniques et le dosage en ciment en particulier la résistance à la compression. Le ciment ayant une densité beaucoup plus élevée que celle des granulats légers et de l'eau, pour n'importe quel granulats particulier, la résistance augmente avec l'augmentation de la masse volumique, mais, selon le type de granulat, un béton de 20 MPa peut nécessiter entre 260 et 330 Kg de ciment par mètre cube, alors qu'un béton de 40 MPa en exigera de 420 à 500 kg/m^3 . Des résistances à la compression plus élevées exigent des dosages en ciment très élevés par exemple, un dosage en ciment de $630kg/m^3$ est nécessaire pour obtenir une résistance de 70 MPa.

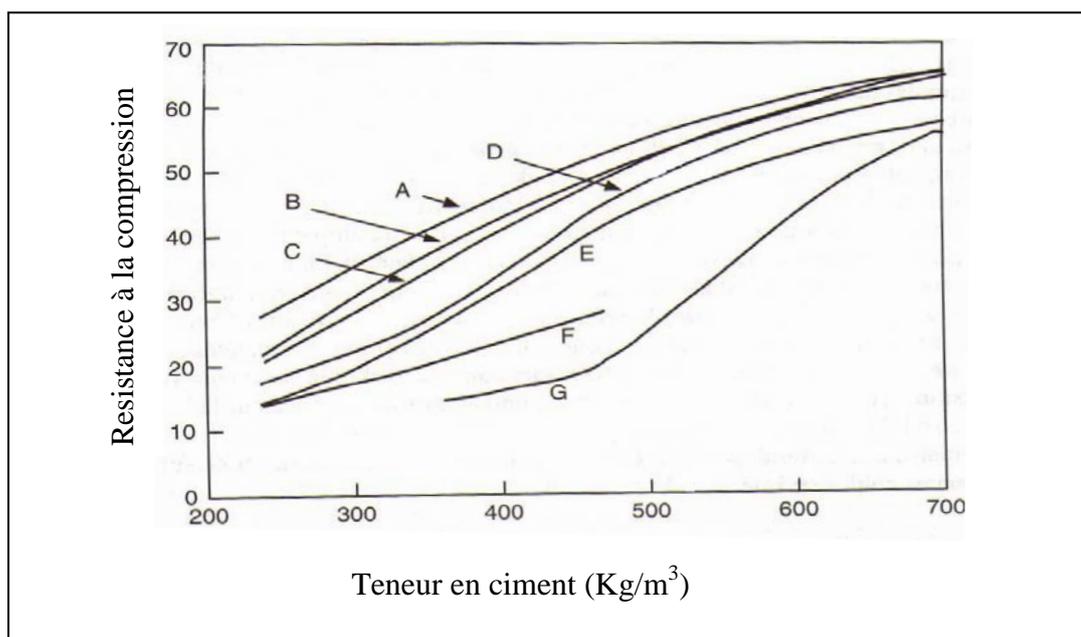


Figure I.15. : Relation entre la résistance à la compression à 28 jours (mesurée sur cube) et le dosage en ciment d'après [31], avec : *A: cendres volantes frittées et granulat fin ordinaire, B: laitier de haut fourneau en boulettes et granulat fin ordinaire, C : cendres volantes frittées, D : schiste fritté, E: ardoise expansée F: argile expansée et sable, G: laitier expansé*

Les niveaux des performances des bétons légers sont inférieurs à ceux des matériaux usuels de construction, puisque les granulats légers possèdent une porosité propre ϵ_g , qui les rend déformables. D'une manière générale, la résistance en compression à 28 jours et le module

d'élasticité E augmentent lorsque la porosité des granulats ϵ_g diminue.

Dans le cas du béton cellulaire, la grande proportion de vides d'air dans le matériau est un facteur essentiel dans le niveau de performances. On distingue deux types de pores: les **macropores** (diamètre supérieur à $60 \mu\text{m}$) et les micropores (diamètre $< 60 \mu\text{m}$) [41].

Des études expérimentales montrent qu'il existe une relation linéaire entre la résistance à la compression et la masse volumique. Dans le cas de granulats d'argile expansée de type Liapor, Arnould [42] a obtenu une relation Linéaire entre la résistance à la compression et la masse volumique figure I-16.

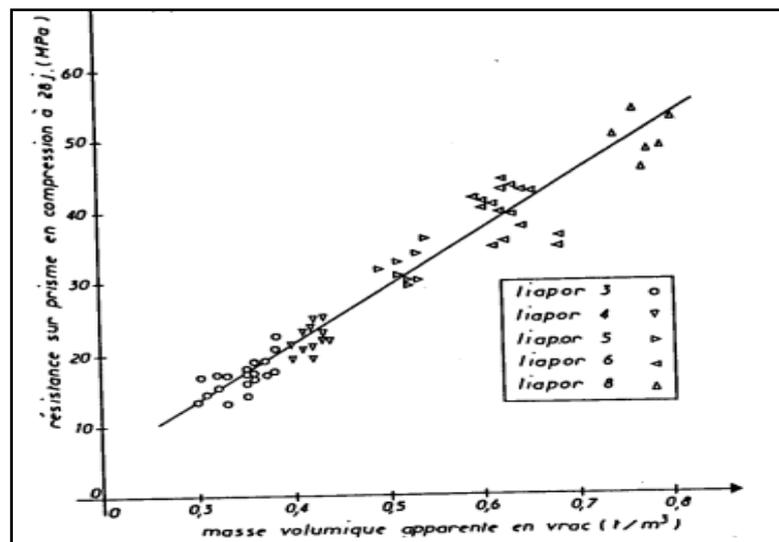


Figure I.16. La résistance à la compression 28j en fonction de la masse volumique [42]

Comme pour le béton de densité normale, la fumée de silice améliore l'évolution de la résistance du béton léger. D'autres ajouts peuvent être aussi incorporés dans le béton léger.

De façon générale, pour un béton de même résistance, le dosage en ciment doit être plus élevé dans un béton léger que dans un béton de densité normale ; le dosage supplémentaire en ciment peut dépasser 50% dans le cas des résistances élevées [42]. Le tableau I.3 qui suit résume quelques caractéristiques des bétons légers.

Tableau I.3. Caractéristiques de quelques bétons légers [43]

	Constituants			$\rho(\text{kg/m}^3)$	Porosité ε	$R_c(\text{MPa})$	E(GPa)	$\varepsilon(\text{m/m})$
	Nom	Masse(Kg)	Volume(m^3)					
Granulats	Granulat minéral (grés, granite)			2600	< 1%	-	60	-
	Argile expansée			850	60à70%	6à9	-	
	Copeau de bois en vrac			275	75 %	-	10à12	
	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*	-	-					

I.2.3.3.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.

Cependant, l'absorption n'est possible que si les capillaires du réseau poreux communiquent pour permettre le transfert de l'eau : on parle alors de porosité ouverte ou connectée. Lorsque le matériau contient des pores emprisonnés comme dans le cas du béton cellulaire, on parle de pores occlus. Ces pores ne participent pas au phénomène d'absorption.

Une étude expérimentale menée par Vaquier dans [42] 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, voir **Tableau I.4.**

Tableau I.4. Porosité ouverte des granulats et proportion capillaire de diamètre $>2 \mu\text{m}$

	Porosité ouverte (%)	% pores diamètre $>2 \mu\text{m}$
Ponce	55,0	68,0
Argile expansée	53,9	11,7
Schiste expansé	37,0	34,7
Cendre frittée	37,0	17,6

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.

I.2.3.4. La sorption/ désorption

Les matériaux possèdent la capacité de condenser l'eau présente dans le milieu extérieur à l'état vapeur. C'est le phénomène de sorption-désorption. Il se quantifie en mesurant les variations de masses des échantillons en fonction des conditions thermodynamiques de conservation (température T fixe et hygrométrie extérieure H_R variable).

Les courbes de sorption-désorption représentent usuellement la teneur massique en eau w du matériau sous une humidité H_R variant entre 0 et 100 %.

La figure suivante représente les courbes de sorption et désorption du béton cellulaire.

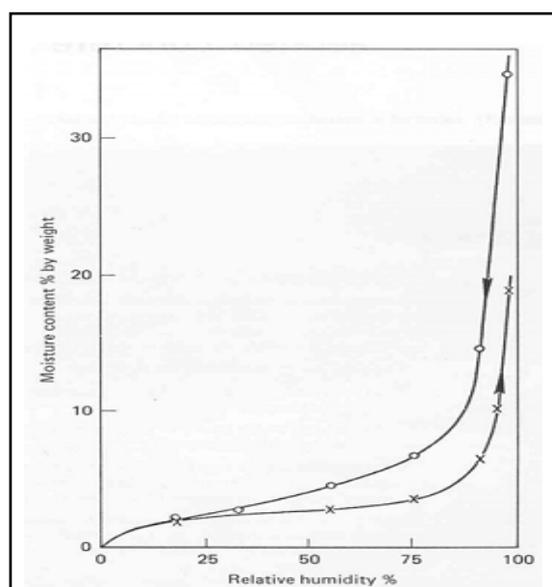


Figure I.17. Courbes de sorption et désorption du béton cellulaire de $\rho = 500\text{kg/m}^3$ à $T=20^\circ\text{C}$ [44]

I.2.3.5. Durabilité

Le réseau poreux d'un granulat léger est généralement discontinu, la porosité des granulats eux-mêmes ne modifie pas la perméabilité du béton, qui est contrôlée par la perméabilité de la pâte de ciment. La faible perméabilité du béton léger est le résultat de plusieurs facteurs : le faible rapport eau/ ciment de la pâte est le résultat de plusieurs facteurs : la qualité élevée de l'interface pâte-granulats, ce qui empêche l'écoulement autour des granulats ; la compatibilité entre les modules d'élasticité des granulats et de la matrice cimentaire engendre très peu de microfissuration sous l'application d'une charge ou par suite d'une variation de température. De plus, la réserve d'eau contenue dans les granulats permet la poursuite de l'hydratation du ciment et la réduction de la perméabilité [45].

La susceptibilité à la détérioration de béton légers exposé à de très basses température (-156°C) dépend des propriétés de la pâte de ciment hydraté, tout comme le béton de densité normale. Ce n'est que si les granulats eux-mêmes sont saturés qu'il peut y avoir désorganisation : leur expansion peut rompre l'adhérence avec la matrice environnante [45].

Les bétons légers permettent un plus grand mouvement de l'humidité que les bétons de densité normale. Ils ont un important retrait initial de séchage, d'environ 5 à 40 % plus élevée que celui du béton ordinaire, mais le retrait total peut même être encore plus important avec certains granulats légers ; les bétons confectionnés avec des granulats d'argile, de schiste et de laitier expansés sont dans la gamme des plus faibles retraits.

I.2.3.6. Propriétés thermiques

La conduction thermique λ est le flux de chaleur par mètre carré, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un degré entre ses deux faces. Cette propagation d'énergie se produit dans un solide par agitation des molécules constitutives du matériau. La conductivité thermique λ est donc une grandeur intrinsèque du matériau, qui dépend uniquement de ses constituants et de sa microstructure.

Un béton usuel à base de granulats rigides, contient de l'air, du 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 W/(m.K) tandis qu'un béton d'argile expansé ($\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de 0,60 W/(m.K) [43].

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 $1^{\circ}C$. 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 [43]. Des caractéristiques thermiques de certains matériaux sont illustrées dans le **tableau I.5**.

Tableau I.5. Caractéristiques thermiques de quelques matériaux [43]

	ρ (kg/m^3)	Porosité ε (%)	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

Un dernier élément concernant les propriétés thermiques des bétons légers est lié au pouvoir absorbant de ces matériaux, qui peuvent contenir des quantités d'eau non négligeables. L'eau étant un excellent conducteur, elle induit une augmentation de la conductivité thermique du béton, en se substituant à l'air isolant. 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, voir figure **I.18**.

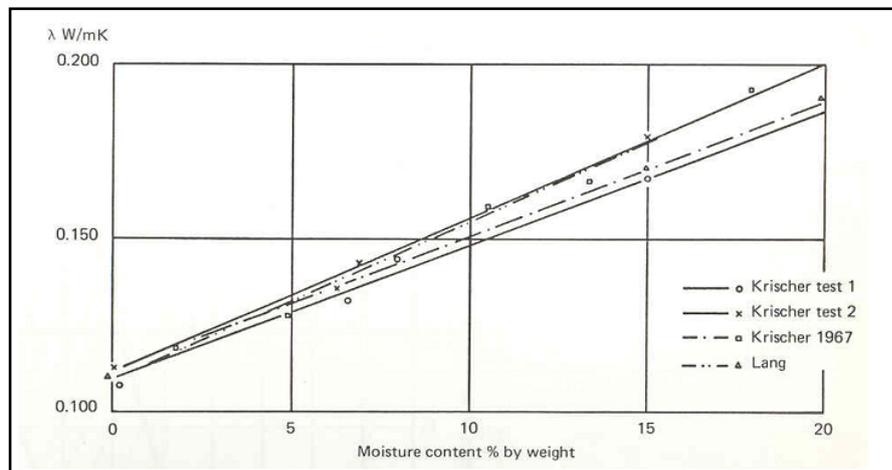


Figure I.18. Conductivité thermique λ en fonction de la teneur en eau massique ω du matériau [44]

I.3. Le Béton cellulaire

I.3.1. 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 [46]**.

I.3.2. 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 :

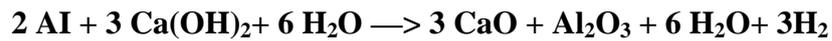
- poudre d'aluminium
- agent moussant
- Entraîneur d'air.

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).

I.3.3. Avantages du béton cellulaire

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

I.3.4. 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) [47]. 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 [47].

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.6. 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 kg/m ³ ρ 400kg/m ³	f2	$R_c \geq 2$
$\rho 0.5$	400 kg/m ³ ρ 500kg/m ³	f3	$R_c \geq 3$
$\rho 0.6$	500 kg/m ³ ρ 600kg/m ³	f4	$R_c \geq 4$
$\rho 0.7$	600 kg/m ³ ρ 700kg/m ³	f5	$R_c \geq 5$
$\rho 0.8$	700 kg/m ³ ρ 800kg/m ³	f6	$R_c \geq 6$

I.3.5. Propriétés du béton cellulaire

I.3.5.1. La structure

La structure du béton cellulaire est caractérisée par sa matrice microporeuse solide et macroporeuse. Les macropores sont formés en raison de l'expansion de la masse causée par le dégagement du gaz et les micropores apparaissent dans les parois entre les macropores. Les macropores sont des pores avec un diamètre de plus de 60 μ m [47]. 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 [48] 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.

I.3.5.2.La densité

Le béton cellulaire dépend de la densité (300-1800 kg/m³), il est essentiel que ses propriétés soient qualifiées avec la densité. En spécifiant la densité, les conditions d'humidité, (c'est-à-dire, séchage à l'étuve ou à l'air libre) doivent être indiqués. Le béton cellulaire avec une vaste gamme de densité pour des applications spécifiques peut être fabriqué avec la variation de la composition qui à son tour influe sur la structure, la taille et la distribution des pores. Une structure cellulaire stable et de préférence sphérique est nécessaire pour des propriétés structurelles et fonctionnelles optimales [49]. 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 [50-54]. En termes conventionnels, la densité du béton cellulaire est liée à sa compacité et porosité.

I.3.5.2.La résistance à la compression

La résistance à la compression du béton cellulaire augmente avec une augmentation de la densité [50,55]. La valeur moyenne des résistances mécaniques utilisant des éprouvettes cubiques de densité sèche de 400 kg/m³ a été rapportée égale environ 2 MPa ; pour une densité sèche de 700 kg/m³, elle a été rapportée à environ 6 MPa [47]. 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 [46]. 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 attribué 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 aboutit à un rapport résistance/densité plus élevé [51, 54, 55, 56].

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.7. 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.8**.

Tableau I.8. Formules empiriques reliant la résistance a la compression, la composition et la porosité [47]

	R _c (MPa)	constantes de calage	paramètres
Féret modifié (béton de mousse)	$\sigma = K (1 + E/C + A/Cj)^n$	K, n	E/C : rapport eau/ciment A/C: rapport air/ciment
Schiller	$\sigma = K_s \cdot \ln(\varepsilon_0 / \varepsilon)$	K _s , P _{cr} : porosité Correspondant à $\sigma = 0$	ε : porosité du béton cellulaire
Balshin	$\sigma = \sigma_0 (1 - \varepsilon)^n$	σ_0 : résistance a porosité 0	ε : porosité du béton cellulaire

I.3.5.3.La résistance à la traction

La résistance à la traction du béton cellulaire est normalement égale 1/6 à 1/4 de la résistance à la compression. Un gradient d'humidité dans l'échantillon de test a un grand effet sur le résultat de test de la résistance à la traction. La mesure de cette propriété est encore plus sensible pour les conditions de test que la mesure de la résistance à la compression [57].

Pour le béton cellulaire, la résistance caractéristique à la traction pure représente 12% de la résistance en compression. (R_t = 0,12 R_c). La résistance caractéristique à la traction par flexion est

de 22% de la résistance en compression : $R_t = 0,22 R_c$ (**prEN 12602**), les valeurs de la résistance à la traction par flexion sont montrées dans le **tableau I.9**.

Tableau I.9. Valeurs caractéristiques de la résistance à la traction par flexion

Classe	Rt (MPa)
f2	0.44
f3	0.66
f4	0.88
f5	1.10
f6	1.32

I.3.5.4. Le retrait au durcissement

Le retrait arrive en raison de la perte d'eau adsorbée du béton, et il est significatif dans le béton cellulaire à cause de sa haute porosité total (40-80%) et la surface spécifique de pores (au tour de $30 \text{ m}^2/\text{g}$) [47]. La diminution dans les tailles de pores, avec un pourcentage élevé des micropores augmente le retrait. La théorie de tension capillaire de retrait de matériaux de construction poreux affirme que l'eau dans les pores existe sous tension et ceci crée une force attractive entre les parois des pores [48]. Le retrait du béton cellulaire avec seulement le ciment comme liant est restitué plus important que cela produit avec la chaux ou le mélange (chaux+ciment), le retrait du mélange est le moindre. Les spécimens durcis à l'air libre ont un retrait très élevé [58]. D'autre part les spécimens durcis en milieu humide ont des valeurs de retrait s'étendant de 0.06 à plus de 3% quand séché aux températures ordinaires, les valeurs les plus basses du retrait étant associées à la densité la plus haute et les pourcentages élevées de sable [49]. Tada [59] attribuent le plus grand retrait au **BCNA** à cause du plus grand volume de micropores. Cependant, quand le même produit est autoclavé, des changements fondamentaux ont lieu dans la constitution minérale, qui peut réduire le retrait à 1/4 ou même 1/5 de celui de produit durci à l'air. Ceci intervient en cours d'autoclavage lors de la formation des cristaux de silicate de calcium hydraté (Tobermorite) qui lui donne sa résistance caractéristique. A sa sortie de l'autoclave, le processus de durcissement est terminé et tout retrait ultérieur n'est plus à craindre. Il n'y a donc pas lieu d'en tenir compte lors de la mise en œuvre.

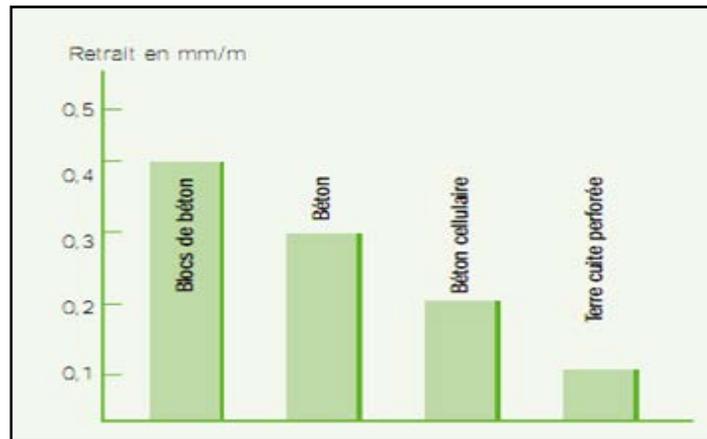


Figure I.19. Comparaison de retrait dû au séchage pour différents matériaux [57].

I.3.5.5. Absorption d'eau et capillarité du béton cellulaire

Le béton cellulaire étant poreux, il y a une forte interaction entre l'eau, la vapeur d'eau et le système poreux et il existe divers mécanismes de transport d'humidité. Dans les conditions normales d'humidité, la migration d'humidité est principalement par la diffusion : avec un accroissement du taux d'humidité la migration est donc par capillarité [60]. La succion capillaire prédomine pour un élément en contact avec l'eau. La capillarité est importante pour le mouillage et le dessèchement des matériaux. La succion capillaire est lente dans le béton cellulaire comparé avec d'autres matériaux poreux comme les briques d'argile. Les phénomènes de transport d'humidité dans les matériaux poreux, en absorbant et transmettant l'eau par capillarité, ont été définis par une propriété facilement mesurable appelé la sorptivité, qui est basé sur la théorie de flux non saturée.

En contact direct avec l'eau (y compris la pluie) les matériaux absorbent l'eau par capillarité suivant la formule :

$$i(t) = s_w \sqrt{t}$$

$i(t)$: eau absorbée par unité de surface (kg/m^2) pour une période t

S_w : la sorptivité du matériau ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$)

t : temps en contact avec l'eau (s)

La valeur S_w du béton cellulaire varie entre $70 \cdot 10^{-3}$ et $130 \cdot 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$. Elle est nettement inférieure à celle de la terre cuite ou du plâtre. Dans le cas du béton cellulaire, grâce aux cellules fermées, le transfert de l'eau ne peut se faire que par la matière solide qui constitue les parois de celles-ci et qui ne représente que 20% du volume, ce qui ralentit très sensiblement la progression de l'eau [63].

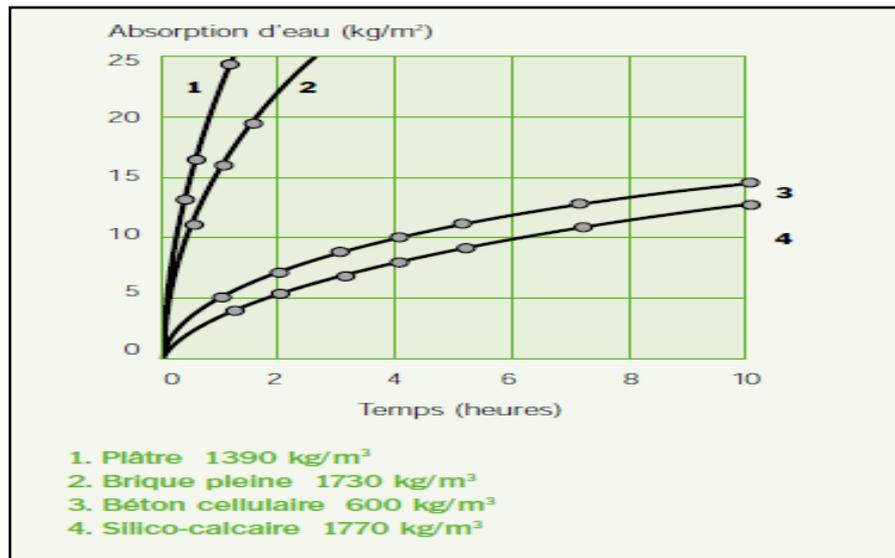


Figure I.20. Absorption capillaire pour différents matériaux [57].

I.3.5.6. Conductivité thermique

La conductivité thermique relativement basse du béton cellulaire est due aux pores remplie d'air [57]. 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 [59]. La relation entre la conductivité thermique et la densité des spécimens secs d'un **BCA** est montré dans la **figure I.22** [44]. Comme attendu, la conductivité thermique augmente avec l'augmentation du contenu d'humidité [62]. La quantité des pores et sa distribution sont aussi des facteurs qui influent sur l'isolation thermique du béton cellulaire.

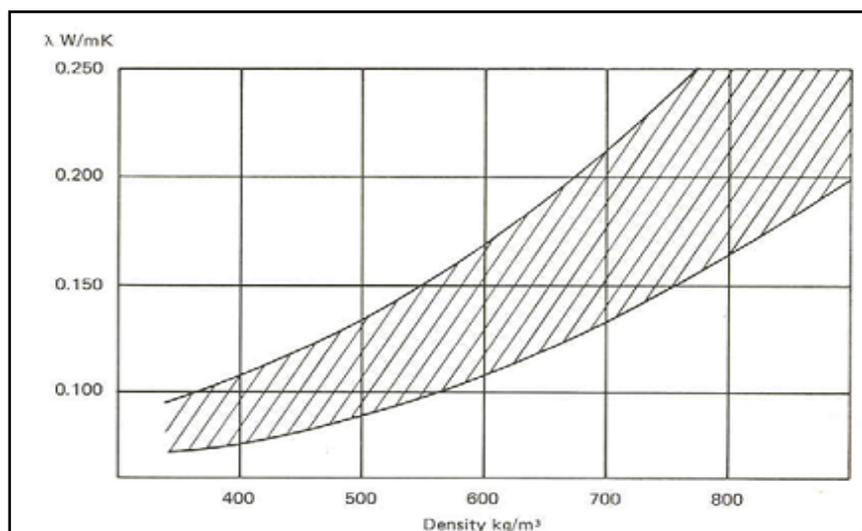


Figure I.21. Conductivité thermique λ en fonction de la masse volumique sèche du béton cellulaire [44].

I.3.6. Impact environnementale et économique du béton cellulaire

le béton cellulaire à plus d'un titre au respect de l'environnement du fait que son industrie s'engage sur la voie de l'économie des ressources naturelle et de l'énergie, ainsi qu'à l'importance du recyclage et le traitement des déchets de fabrication et de chantier.

Ses qualités environnementales ont fait de lui un produit favorable dit « propre » ou « vert » un label décerné par le laboratoire de l'analyse environnementale des matériaux de construction Outri-Rhin en Allemagne.

- Les matières premières nécessaires à la fabrication de béton cellulaire existent en abondance dans la nature et le béton cellulaire n'en abuse pas, puisque 500 kg à peine suffisent à produire 1m³ de produit fini, soit 1/3 environ de ce qui est nécessaire pour fabriquer d'autres matériaux de gros œuvre.
- Grâce au procédé d'autoclavage utilisé en cours de fabrication, 200 kWh/m³ suffisent à produire 1m³ de béton cellulaire.
- Près de 90% de la vapeur d'eau produite pour l'autoclavage est réinjectée dans le circuit.
- Grâce à la légèreté du matériau, le transport est réduit tant pour ce qui concerne les matières premières que pour les livraisons sur le chantier.
- La fabrication du béton cellulaire ne dégage aucun gaz toxique et n'entraîne aucune pollution de l'eau.
- Par ses qualités d'isolation et d'inertie thermiques, le béton cellulaire assure non seulement des économies d'énergie et le respect de l'environnement, mais contribue également à un confort de l'habitat tout à fait particulier, tant en été qu'en hiver.

I.4. Synthèse du chapitre

Nous avons présenté dans cette étude bibliographique, une synthèse en premier lieu sur les bétons de sable (définition, constituants, propriétés, formulations....ect) et nous avons retenu que les recherches sur ces bétons de sable avaient comme but la détermination d'une composition optimale et estimer ensuite ses performances potentielles grâce à l'utilisation des fillers et adjuvants.

Les sables de dune présentent des caractéristiques chimiques et physiques très favorables à l'utilisation en construction, telles que leur propreté (l'absence quasi-totale d'éléments argileux), et leur composition chimique siliceuse (présentant les meilleures performances mécaniques).

Les bétons de sable de dune sont à l'état actuel technologiquement et économiquement performant qui laisse prévoir (promettre) demain un développement important dans la construction locale.

En second lieu nous avons présenté une synthèse des connaissances actuelles sur les caractéristiques physiques et mécaniques des bétons légers.

Cette étude a permis de mettre en évidence l'influence notable des granulats légers sur les performances mécaniques du béton léger, à l'inverse des granulats de densité normale. La principale distinction des bétons de granulats légers par rapport aux bétons de granulats rigides est la plus faible masse volumique qui diminue à la fois le module élastique et la résistance du béton. La masse volumique du béton peut varier d'un peu plus de 300 à environ 1800 kg/m³ et la résistance correspondante de 0,3 à 70 MPa, atteignant parfois même 90 MPa [33]. La grande diversité de composition se retrouve dans la grande variété des propriétés des bétons de granulats légers qui sont des matériaux poreux pulvérulents, naturels ou artificiels [16]. Ces bétons peuvent apporter une solution technique très intéressante au problème d'isolation thermique et acoustique dans les bâtiments.

Nous avons consacré à la fin de ce chapitre à une étude bibliographique des bétons cellulaire objet de notre étude et qui sont considérés à part ; de part la légèreté et leur faible conductivité thermique ; Nous avons décelé les propriétés physico-mécaniques qui se résument comme suit :

* Leurs masse volumique peut être comprise suivant les formulations 400 et 800 kg /m³ .

*La résistance à la compression des bétons cellulaire est fonction de la densité. Celle-ci peut être améliorée par des ajouts tels que la fumée de silice. Généralement, la résistance à la compression varie entre 3 et 7 MPa.

*La conductivité thermique des bétons de polystyrène sont caractérisés par leur pouvoir isolant, leur conductivités thermiques sont assez faibles et pouvant descendre jusqu'à 0.02 W.m⁻¹K⁻¹.

CHAPITRE II
CARACTÉRISATIONS DES MATIÈRES
PREMIÈRES ET TECHNIQUES
EXPÉRIMENTALES

II. Caractérisation des matières premières et techniques expérimentales

II.1. Caractérisation des matières premières

II.1.1. Introduction

Notre travail expérimental s'inscrit dans le cadre d'une valorisation des matériaux locaux pour la recherche de nouveaux matériaux de construction pouvant répondre aux exigences économiques et environnementales du pays. A cet effet nous avons été orienté à exploiter le sable de dune, étant donné que la production d'un béton cellulaire nécessite l'utilisation de sable fin et comme on se trouve dans une région (Sud de l'Algérie) où ce sable occupe environ 60% du sud Algérien, ce qui constitue ainsi la préoccupation de plusieurs chercheurs dans différents domaines principalement dans le génie civil.

La hausse de la demande du sable de construction dans notre pays et l'incapacité des carrières locales à fournir du sable fin de granulométrie inférieure à 2 mm, nous ont aussi poussé à étudier la faisabilité d'incorporer ce type de sable dans l'élaboration de béton cellulaire. A côté de ce matériau nous avons voulu aussi exploiter les argiles calcinées sous forme de fines minérales en substitution dans le ciment afin d'améliorer ses performances mécaniques.

Notre matière première se compose donc de :

1. Sable de dunes.
2. Argile calcinée.
3. Ciment.
4. Poudre d'Aluminium.
5. Eau.

En ce qui suit nous allons donner toutes les caractéristiques physiques, chimiques et minéralogiques de ces matériaux qu'on a fait au laboratoire suivant les techniques expérimentales expliqués ci-dessous dans ce chapitre.

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

II.1.2.Sable de dunes

Le sable de dunes utilisé au cours de cette expérimentation, provient de la région sud de la ville de Ghardaïa.

- **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 :

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

L'analyse granulométrique qu'on a réalisée selon la norme NF P18-056, a montré que ce sable est un sable fin présentant une granulométrie serrée. Le diamètre maximal est 0.63 mm.

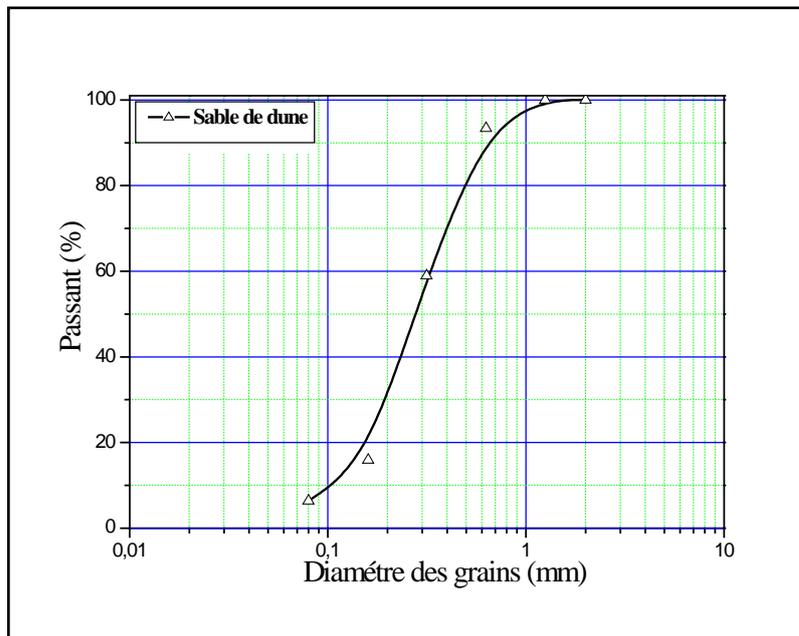


Figure II.1. Courbe granulométrique du sable de dune.

- **Analyse chimique**

Le résultat de l'analyse chimique sommaire de ce sable de dunes est donné dans le tableau II-1 qui suit :

Tableau II.1. Analyse chimique du sable de dunes

• Résidus insolubles (SiO ₂ +Silice) %	96,25
• Teneur en sulfate (SO ₃) %	0.39
• Matières organiques MO %	-----
• Teneur en chlorures %	0,036
• Carbonate de Calcium CaCO ₃ %	2.4

Vu le taux important d'insolubles (silice SiO₂+silicates=96.25%), Ce sable est de nature siliceuse.

- ***Equivalent de sable (NF P 18-597)***

L'équivalent de sable est le rapport multiplié par 100, de la hauteur de la partie sédimentée à la hauteur totale du floculat et de la partie sédimentée.

Ces hauteurs sont déterminées dans une éprouvette où la prise d'essai a été traitée, dans des conditions définies, par une solution capable de faire flocculer les éléments fins.

L'essai permet d'avoir une idée globale de la quantité et de la qualité des éléments fins contenus dans un sable en exprimant un rapport conventionnel volumétrique entre les éléments dits sableux et les éléments fins (argile, impuretés).

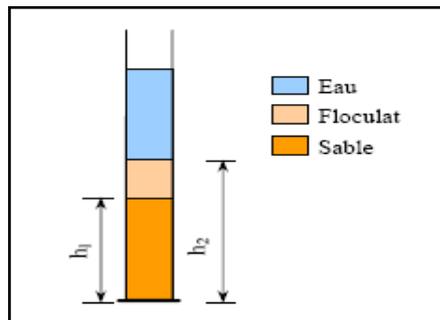


Figure II.2.Détermination de l'équivalent de sable.

- ***Essai au bleu de méthylène***

L'essai est réalisé selon la norme (NF P 94-068) consiste à déterminer la quantité du bleu de méthylène nécessaire pour recouvrir d'une couche mono moléculaire la surface des particules d'un matériau en suspension dans l'eau.

La capacité d'adsorption du matériau est déterminée à l'aide du test de la tache. Ce dernier consiste à former avec une goutte de la suspension sur du papier filtre normalisé, une tache qui est le dépôt de sol coloré en bleu, entouré d'une zone humide en générale incolore. L'excès du bleu se traduit par l'apparition dans cette zone d'une auréole d'un bleu clair .Le test est alors positif.

$$\text{la valeur du bleu } V_b = \frac{\text{quantité du bleu adsorbé}(\text{cm}^3)}{\text{poids sec de la prise}}$$

Cet essai a le même but que l'essai précédent, mais son avantage est d'être à la fois quantitatif et qualitatif.

- ✓ Quantitatif : à nature de fines donnée, plus la teneur en fines sera importante plus la valeur du bleu sera forte.
- ✓ Qualitatif : à teneur en fines donnée, plus les fines seront 'actives' plus la valeur de bleu sera également importante.

- **Masses volumiques absolue et apparente (NF P 18-555)**

Elles sont exprimées en Kg/m³ la masse volumique **absolue** est la masse par unité de la matière qui constitue l'agrégat, sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains. La masse volumique **apparente** est la masse du matériau par unité de volume, celui-ci intégrant à la fois les grains et les vides.

$$\rho_{\text{app}} = \frac{M}{V_{\text{app}}} \quad \rho_{\text{abs}} = \frac{M}{V_{\text{abs}}}$$

Les méthodes utilisées sont le récipient pour la masse volumique apparente et pour la masse volumique absolue on a utilisé les méthodes de l'éprouvette graduée et le picnomètre.

Pour les liants on a utilisé le volumènomètre de LeChatelier (**ASTM C 188-72**) et un liquide inerte vis-à-vis de la poudre (liant) ce sera par exemple du tétrachlorure de carbone ou du benzène.

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

M₁:Masse de (cellule+benzène)

M₂:Masse de (cellule+benzène+liant)

V₁:le volume du benzène initial

V₂: le volume du benzène final (après l'introduction du liant)

- **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 cm² 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 (voir photo II-4) ; 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 (cm²/g).

k – Constante del'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.1.Perméabilimètre de Blaine.

- **Compacité et Porosité (NF P 18-555)**

On définit la compacité d'un matériau comme le rapport du volume solide sur le volume total. Et la porosité comme le rapport du volume des vides sur le volume total.

La compacité et la porosité sont souvent exprimées en %. La somme des deux est alors égal à 100% :

$$P+C=1$$

Si l'on connaît la masse volumique apparente et absolue du matériau, il est aisé alors de calculer sa compacité et sa porosité selon la formule suivante :

$$C = \frac{\rho_{\text{app}}}{\rho_{\text{abs}}}$$

- **Analyse minéralogique par Diffractométrie des rayons X**

La diffractométrie par rayon X est une méthode d'analyse d'éléments. Elle étudie les processus de diffusion, d'absorption et d'émission des rayons X.

Pour effectuer une analyse de DRX, on procède de la manière suivante :

- broyage de l'échantillon.
- préparation de perles ou pastilles.

En effet, lorsqu'un échantillon est bombardé par des rayons X, ce rayonnement provoque l'émission de son spectre. Ce spectre est appelé diffraction par rayon X (DRX) car le mode d'excitation concerne les photons. Le spectre est formé de raies caractéristiques des différents éléments présents dans l'échantillon.



Photo II.2. Diffractomètre aux rayons X de l'université de Laghouat.

Les caractéristiques physiques de ce sable sont regroupées dans le tableau **II.2**. Les valeurs des modules de finesse confirment que le sable dunaire est plus fin, les valeurs de l'équivalent de sable et la valeur au bleu de méthylène mettent en évidence la propreté de sable (pauvres en éléments fins).

Tableau II.2. Caractéristiques physiques du sable de dune

• Masse volumique absolue	$\rho_s = 2645 \text{ kg/m}^3$
• Masse volumique apparente	$\rho_a = 1611 \text{ kg/m}^3$
• Module de finesse	$M_f = 1.31$
• Equivalent de sable	$ES_p / ES_v = 97\%$
• Compacité et porosité	$C_p = 61 \quad P = 39$
• Valeur au bleu de méthylène	$V_B = 0,068$

II.1.3. 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, dont les caractéristiques sont regroupées dans les tableaux qui suivent :

Tableau II.3. Caractéristiques physiques du ciment utilisé.

• Masse volumique absolue	$\rho_s = 3100 \text{ kg/m}^3$
• Masse volumique apparente	$\rho_a = 1030.05 \text{ kg/m}^3$
• Consistance normale	$E/C = 0.25-0.28$
• Début de prise	$DP = 150-170 \text{ minute}$
• Fin de prise	$FP = 3:30-4:30 \text{ (h:mn)}$
• Surface spécifique Blaine	$SSB = 3700 \text{ cm}^2/\text{g}$

Tableau II.4.Composition chimique du ciment utilisé.

• Perte au feu %	5.50-6.50
• Résidus insolubles %	0.70-1.50
• Teneur en sulfate (SO_3)%	1.80-2.30
• Teneur en oxyde de magnésium(MgO)%	1.60-1.80
• Teneur en chlorures %	0.01-0.02
• Teneur équivalent en alcalis %	0.40-0.50

Tableau II.5.Composition minéralogique du ciment utilisé.

• C_3S	60% à 64%
• C_3A	14% à 18%
• C_2S	6% à 8%
• C_4AF	10% à 12%

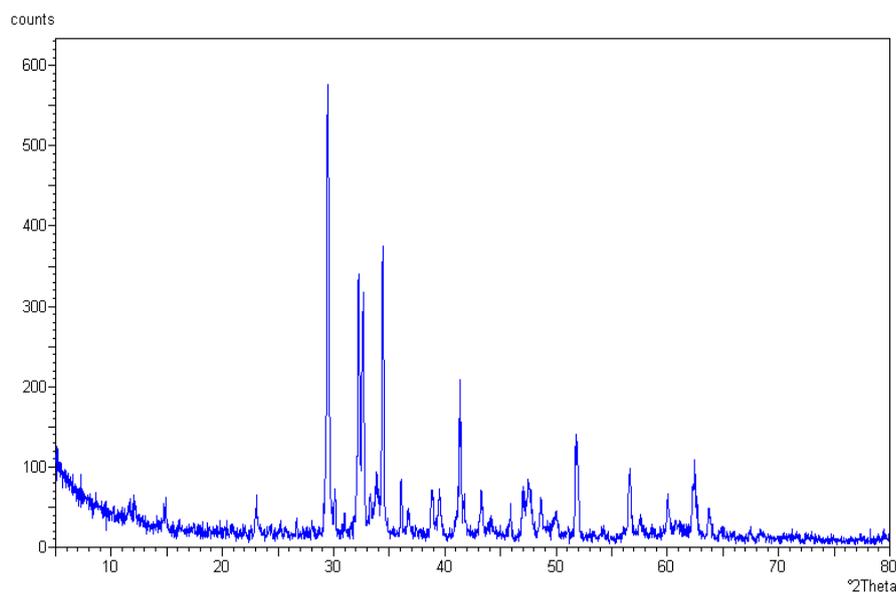


Figure II.3. Diffractogramme aux rayons X du ciment.

La composition minéralogique du ciment a révélé que le ciment utilisé contient des pourcentages appréciables de chaux et de silice, cela peut conférer aux bétons élaborés des performances requises.

II.1.4. L'argile calcinée

Les fines qu'on a utilisé dans ce présent travail sont les fines minéraux issus des argiles utilisée pour la production de briques, provenant de la région de Laghouat « gisement d'El Ghicha ». Contrairement à la production de brique, où l'argile est cuite aux températures plus de 1000°C, l'argile utilisée dans l'étude présente a été cuite dans un four à moufle à 800°C (disponible au niveau du laboratoire de génie civil de l'université de Laghouat). La température de four a été gardée constante à 800°C pendant 2h. Après calcination, l'argile obtenue est refroidit à la

température ambiante du laboratoire ensuite, elle est broyée dans la machine de Los Angeles équipée de 12 boulets métalliques pour effectuer des chocs dans le cylindre de la machine, à raison de 9999 rotations, et tamisés dans le tamis de 100 μm , à la fin, on obtient une poudre d'argile fine qui va être substituée avec des pourcentages bien déterminées dans la masse de ciment. Les caractéristiques physiques de ces fines sont indiquées dans le Tableau II.6.

Tableau II.6.Caractéristiques physiques des fines utilisées.

Masse volumique absolue	Masse volumique apparente	Surface spécifique Blaine
$\rho_s = 2540 \text{ kg/m}^3$	$\rho_a = 810 \text{ kg/m}^3$	$2847 \text{ cm}^2/\text{g}$

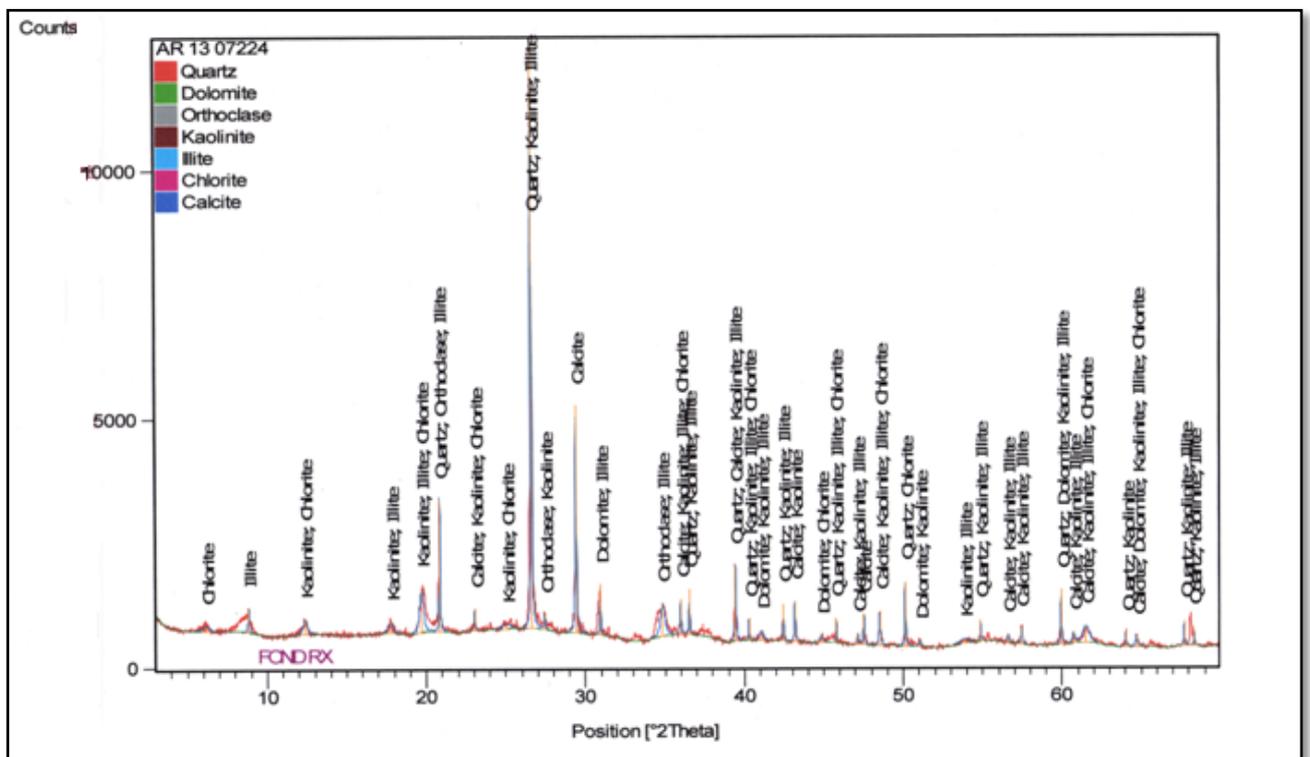


Figure II.4.Diffractogramme aux rayons X des argiles calcinées.

Les analyses en diffraction des rayons X permettent de caractériser la nature des phases minérales cristallisées dans l'argile de l'étude. Cette argile contient de la kaolinite, du quartz et de l'illite. La composition minéralogique estimative des argiles calcinées a été évaluée sur la base des résultats chimiques et elle figure sur le tableau suivant :

Tableau II.7. Analyse chimique des fines d'argiles calcinées

Minéraux présents	SiO ₂	CaCO ₃	Illite	Kaolinite	Feldspath	Autres
Composition minéralogique (%)	25	14	10	20	09	22

Le tableau montre que l'argile calcinée est relativement riche en silice et en carbonate et qu'elle contient une faible quantité de feldspaths.

II.1.5. Poudre d'Aluminium

La poudre d'aluminium utilisée comme agent réactif pour l'expansion du béton confectionné est un aluminium pur à 99%, de granulométrie d'environ 100µm, fabriqué par la société **SIGMA-ALDRICH**, notons que la qualité de l'aluminium influe sur la réaction d'expansion (aluminium –chaux) et par conséquent sur la densité du produit fini.

II.1.6. Eau de gâchage

On ne pourra utiliser n'importe quelle eau pour le gâchage du béton, un excès d'impuretés peut affecter les propriétés du béton frais et durci.

Nous avons utilisé pour la totalité de nos essais une eau potable du réseau domestique sans aucun traitement supplémentaire.

Le PH mesuré régulièrement est voisin de 7,5. Si le choix a été porté sur cette eau c'est de part sa pureté et l'absence des excès des teneurs de sels, de sulfates et d'acides et ceux-ci on se basant sur le rapport fourni par le laboratoire ADE de Laghouat (Algérienne des eaux de Laghouat).

Tableau II.8: Composition chimique de l'eau de gâchage.

Nature du point d'eau		Robinet		
Ca ⁺² en mg/l	104	Balance cations m. éq/l 17.81		5.20
Mg ⁺² en mg/l	97			8
Na ⁺ en mg/l	102.3			4.45
K ⁺ en mg/l	646			0.14
Cl ⁻ en mg/l	148	Balance Anions m. éq/l 16.74		4.17
SO ₄ ⁻² en mg/l	520			10.82
HCO ₃ ⁻ en mg/l	94			/
NO ₃ ⁻ en mg/l	12.4			0.2
Résidu sec à 105°C 1576 mg/l	PH 7.70	Conductivité en 1/10 mm à 25°C 16.77		dureté totale 43.25
Test chlore (ml d'eau de Javel à 15°/m ³) 0.96 ml/l		T.A.C 7.8°F	S.A.F 75°F	I.S 62.3°F
MINERALISATION 1010.60	M.O milieu Acide en O ₂ 8.53	SiO ₂ 4.45 mg/l		Somme des ions 1084 mg/l

Cations	$\text{Ca}^{+2} = 15\%$	$\text{Mg}^{+2} = 23.2\%$	$\text{Na}^+ + \text{K}^+ = 13.4\%$
Anions	$\text{HCO}_3^- = 4.5\%$	$\text{SO}_4^{-2} = 53.8\%$	$\text{Cl}^- + \text{NO}_3^- = 12.6\%$

II.2. Techniques expérimentales

II.2.1. Essai d'écoulement (NF P18-452)

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.4. Maniabilimètre B (180x90x90mm).

D'après la référence [63], on peut conclure selon la valeur du temps d'écoulement (t) que le mortier est :

- ✓ ferme si $t \geq 40$ s,
- ✓ plastique si $20 \text{ s} < t \leq 30$ s,
- ✓ très plastique si $10 \text{ s} < t \leq 20$ s,
- ✓ fluide si $t \leq 10$ s.

II.2.2. Essais de flexion et compression sur éprouvettes 40x40x160 mm

Le comportement mécanique de tous les mortiers a été étudié en flexion simple (3 points) et en compression uni axiale sur des éprouvettes prismatiques 40x40x160 mm.

A chaque échéance, trois échantillons sont testés en flexion simple sur une machine d'essais de résistance à la flexion de marque "CONTROLS" permettant d'appliquer des charges jusqu'à 100 KN avec une vitesse de mise en charge de 50 N/s \pm 10N/s. La machine doit être pourvue d'un dispositif de flexion tel que celui schématisé sur la figure II-2.

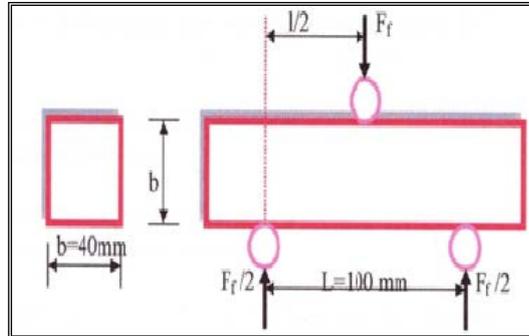


Figure II.5.Dispositif de flexion par trois points.

La rupture de chaque éprouvette en flexion est effectuée conformément au dispositif décrit sur la figure ci-dessus. Si F_f est la charge de rupture de l'éprouvette en flexion, le moment de rupture vaut $F_f l/4$ et la contrainte de traction correspondante sur la face inférieure de l'éprouvette est :

$$R_t = \frac{1.5 F_f l}{b^3}$$

Les six morceaux d'éprouvettes obtenus après rupture en flexion sont alors soumis à une compression uni axiale sur le bâti de compression de la même presse avec une vitesse de mise en charge de 2400 N/s \pm 200 N/s.

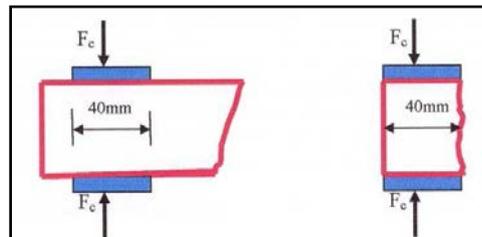


Figure II.6.Ruptures en compression.

La contrainte de rupture vaudra :

$$R_c = \frac{F_c}{b^2}$$

II.2.3. Essai de capillarité (Sorptivité)

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

Avant les mesures de la Sorptivité, les échantillons seront préalablement conditionnés dans l'étuve à environ 105°C jusqu'à une masse constante. L'essai de Sorptivité détermine le taux ou vitesse d'absorption

par remontée capillaire d'une éprouvette $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ placée sur de petits supports dans un bac contenant de l'eau suivant le schéma indiqué à la figure II-4 de sorte que l'eau ne touche l'éprouvette que d'une hauteur de 5mm de la profondeur du bac, le reste de l'éprouvette est préalablement imperméabilisé par un film plastique sur toutes les autres faces. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps.

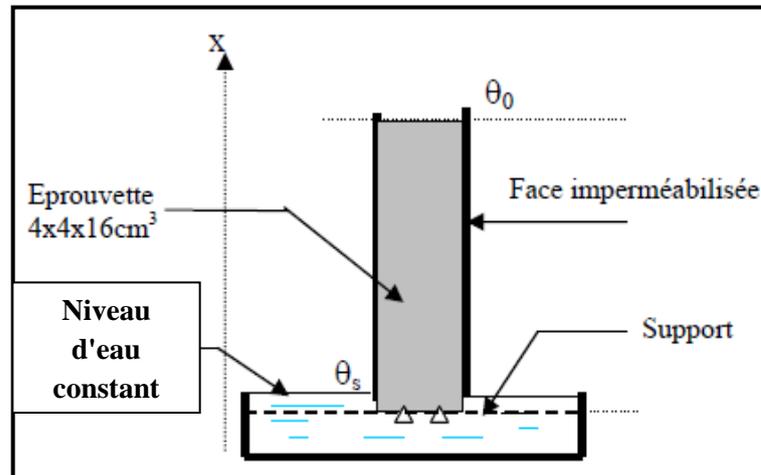


Figure II.7. schéma de l'essai de capillarité.

Ce paramètre hydrique est déterminé en traçant l'évolution du volume d'eau absorbé par l'éprouvette $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ en fonction de la racine carrée du temps. Cette évolution est caractérisée en général par deux tronçons linéaires. Le premier, qui est caractérisé par une pente assez importante, est utilisé pour la détermination de la sorptivité du matériau.

$$i = S_w \sqrt{t}$$

Où S_w est la sorptivité du matériau et i le volume d'eau absorbée par unité de surface.

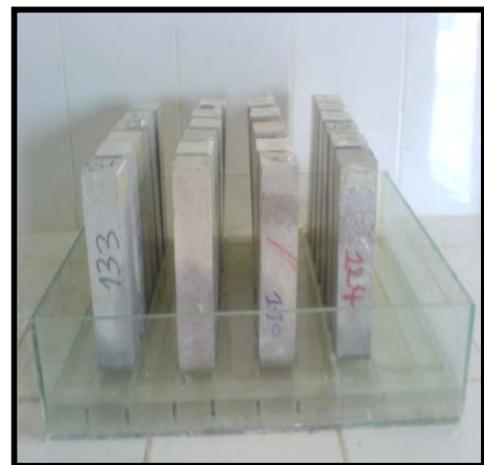
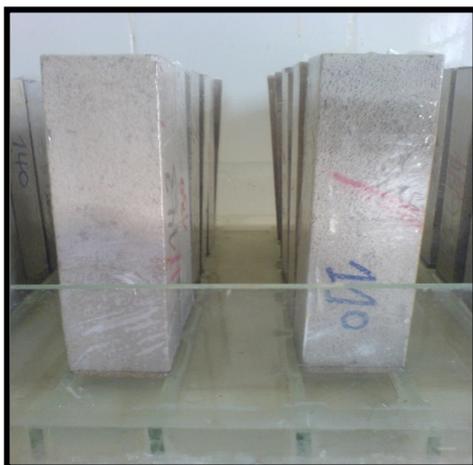


Photo II.5. Montage expérimental utilisé dans l'essai d'absorption.

Expérimentalement, la sorptivité est déterminée en traçant l'évolution du volume d'eau absorbé par l'échantillon par unité de surface absorbante en fonction de la racine carrée du temps. La quantité d'eau absorbée est mesurée par pesée à 0,01g près à différents intervalles de temps et le volume est déduit à l'aide de la masse volumique de l'eau liquide (1g/cm^3). La sorptivité est, donc définie comme étant la pente de la droite caractérisant l'évolution du volume d'eau en fonction de la racine carrée du temps dans la première période de l'absorption. Notons que la sorptivité, ainsi déterminée, est équivalente au coefficient d'absorption capillaire utilisé par les recommandations de **Rilem [32]**.

II.2.4. Etude de Retrait (NFP 15-433)

Il consiste à mesurer la variation dimensionnelle longitudinale relative par rapport à la longueur initiale de l'éprouvette après 24 heures de moulage ($L_0 = 16\text{cm}$). L'axe longitudinal de l'éprouvette étant vertical. On prend la moyenne des trois mesures sur trois éprouvettes.

Si la variation de longueur d'une des 3 éprouvettes dépasse de plus de 0.03 mm celle de l'éprouvette avant la variation la plus voisine. Il y a lieu d'en rechercher la cause (poussière, mauvais contact, descellement des plots ...etc.) et si celle-ci peut être éliminée l'éprouvette doit être rebutée.

L'appareil de l'essai (**figure II.10**) doit être étalonné avant chaque série de mesures avec une tige de métal de 160 mm de longueur et dont les extrémités reproduisent la forme des plots de l'éprouvette.

$$\frac{\Delta L}{L} = \left| \frac{L_f - L_i}{16} \right|$$

Le retrait étant exprimé par :

L_f : la longueur finale;

L_i : la longueur initiale;

L_0 : La longueur initiale après 24heures de moulage. ($L_0 = 16\text{ cm}$)

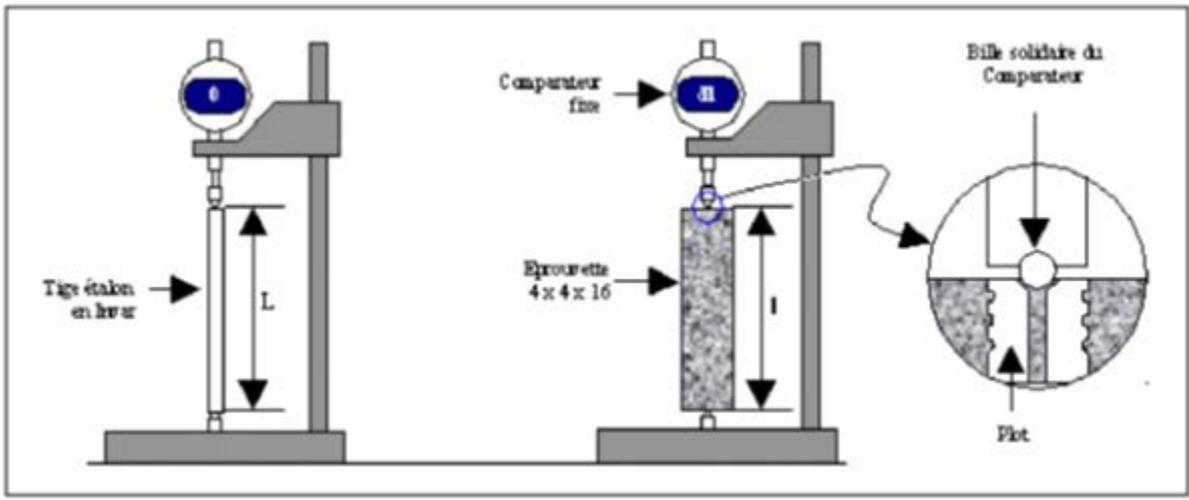


Figure II.8. Appareillage pour la mesure du retrait.



Photo II.6. Appareil de retrait utilisé.

II.2.5. Masse volumique apparente

Par définition la masse volumique apparente sèche ρ est le rapport de la masse de l'échantillon M à son volume apparent à l'état sec V_t . L'état sec est obtenu par séchage de l'échantillon dans l'étuve ventilé jusqu'à masse constante. Les pesées sont effectuées à 0.01g près et les dimensions des échantillons sont déterminées à l'aide d'un pied à coulisse avec une précision de 0.01 cm, la masse volumique apparente est la moyenne des mesures effectuées sur 3 éprouvettes de chaque composition.

II.2.6. Masse volumique absolue

La masse volumique absolue ρ_s est déterminée par la méthode de déplacement du liquide au pycnomètre. La méthode consiste à broyer une portion d'environ 100 à 150 g du matériau sec dans un broyeur à jarre jusqu'à une finesse limite. Une quantité de la poudre obtenue sera pesée à 0.010g près puis introduite dans un pycnomètre initialement rempli d'eau jusqu'à un niveau repère. La différence du niveau d'eau du pycnomètre avant et après introduction de la poudre permet d'en déduire le volume apparent des grains solides du matériau et par la suite la masse volumique absolue du matériau. L'essai est effectué en prenant trois proportions. La valeur moyenne des masses absolues est prise comme valeur de ρ_s .

II.2.7. La porosité totale

La porosité est une caractéristique très importante, elle influe sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques des bétons.

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

Connaissant la masse volumique ρ_s du solide obtenue, le calcul de la porosité totale ϵ est immédiat si l'on connaît, de plus, la masse volumique apparente ρ de l'échantillon auquel on s'intéresse. En effet, on peut écrire [60]:

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho}{\rho_s}$$

II.2.8. Caractéristiques thermiques

Les propriétés isolantes des matériaux de construction se quantifient au travers de deux paramètres usuels: la conductivité thermique « λ » et la diffusivité « a ». 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 a .

La **diffusivité thermique** « a » 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 $W.m^{-1}.K^{-1}$, traduit l'aptitude d'un matériau à conduire la chaleur [32].

Pour cette mesure il existe plusieurs méthodes d'essai, nous avons utilisé dans notre cas la méthode dite de la Source Plane TPS [60].

II.2.8.1. Technique de la Source Plane TPS

II.2.8.1.1. Avantages de la méthode TPS

Les principaux avantages de la technique TPS (Transient Plane Source ou Hot Disk) sont :

- Elle ne demande pas un matériel sophistiqué ;
- Elle peut faire la mesure de plusieurs paramètres thermiques à la fois ;
- Elle peut être utilisée pour la mesure d'une large gamme de propriétés et dans différentes conditions (liquides, hautes et basses températures, plaques...) ;
- L'utilisation de capteurs avec une grande surface permet de couvrir une grande surface à l'échelle du volume élémentaire représentatif ;
- Les mesures peuvent être faites sur des échantillons de diverses formes et de différents tailles, à condition de posséder au moins une surface plane ;
- Elle est utilisable pour la mesure des propriétés thermophysiques des matériaux anisotropes ;

II.2.8.1.2. 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 1500 de Thermal Constant Analyzer Test System (**Photo II.7**) disponible au niveau du laboratoire de génie civil, division : Développement et Valorisation des Matériaux Locaux « Durabilité et Transfert thermique » de l'université de Laghouat.



Photo II.7. Mesure de propriétés thermiques à l'aide du système «Hot Disk».

L'essai consiste à serrer la sonde de dimensions (40x60mm) celle dans la (**Photo II.8**) entre deux échantillons des mêmes dimensions (40x40x80mm) selon un dispositif sandwich tenu entre un support (voir **Photo II.9**) afin d'empêcher de bouger les échantillons, ensuite on délivre un flux de chaleur d'une puissance égal 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.8. La sonde Hot Disk.



Photo II.9. 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 dans la sonde TPS 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.

II.3. Synthèse du chapitre

Ce chapitre a été consacré à la présentation des essais de caractérisation du matériau étudié, du matériel associé ainsi qu'à l'élaboration des composites qui font l'objet de cette étude.

D'après les différents essais de caractérisation des matériaux, on peut conclure que le sable dunaire est un sable propre de nature siliceuse à porosité élevée de (39%), celle-ci fait que l'introduction des fines pour augmenter la compacité du sable est nécessaire afin d'augmenter les performances mécaniques des bétons élaborés.

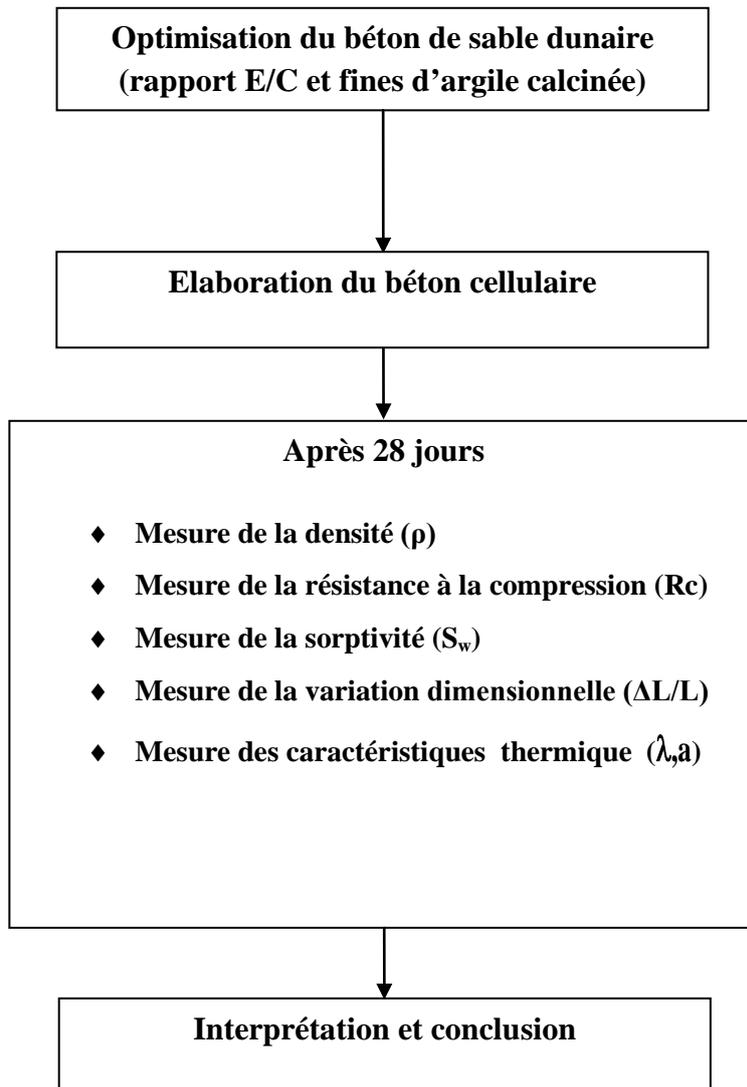
Les fillers utilisés sont de nature argile kaolinite, ce sont les mieux adaptés pour remplir les vides. Leur seul inconvénient est le tamisage manuel, processus lent et peu efficace. IL serait plus profitable de le mécaniser afin d'obtenir des quantités importantes en peu de temps.

Les fillers ont d'excellentes affinités avec le ciment de nature calcaire et qui présente d'après sa caractérisation physico- mécanique de bonne qualité du point de vu résistance.

L'étude de la composition du béton de sable et les résultats des essais physico-mécaniques et thermiques des bétons de polystyrène élaborés, sont étudiés au chapitre suivant à savoir :

- ◆ Mesure de la densité (ρ)
- ◆ Mesure de la résistance à la compression (R_c)
- ◆ Mesure de la sorptivité (S_w)
- ◆ Mesure de la variation dimensionnelle ($\Delta L/L$)
- ◆ Mesure de la porosité accessible à l'eau (ϵ_a)
- ◆ Mesure des caractéristiques thermique (λ)

Résumé du programme expérimental



CHAPITRE III
MATÉRIAUX ET RÉSULTATS
EXPÉRIMENTAUX

III.1.Introduction

La formulation des bétons est passée par différents étapes afin d'aboutir à la meilleure composition qui répond au maximum d'exigences de facilité de mise en œuvre et de performances escomptées.

Le travail expérimental a été subdivisé en deux phases :

- La première consiste en la recherche d'une composition optimale de mélange Sable-ciment, qui confère au béton de sable de dune la résistance mécanique escomptée. Afin de rentabiliser l'utilisation du ciment, une étude de la substitution partielle du ciment par des fines d'argile calcinée dans la composition optimale a été abordée.
- La deuxième consiste en l'étude d'un procédé d'allègement du béton de sable à composition optimale par entrainement d'air dans la matrice par réaction chimique avec la poudre d'aluminium.

III.2. Matériaux

Pour la recherche de la composition optimale de notre béton de sable, une méthodologie a été adoptée : nous avons fixé le rapport **C/S** et on a défini la quantité de fines d'argile calcinée à substituer au ciment pour obtenir des performances optimales du béton. En sachant que, plus le béton est compact, plus il est résistant et imperméable.

III.2.1.Composition des bétons de sable BSD

L'étude de la composition d'un béton de sable consiste à définir le mélange optimal des différents constituants dont on dispose ainsi que le dosage en eau et fines.

Pour l'élaboration du béton de sable à étudier, nous avons choisi la composition de rapport **C/S= 2/3**. Pour cette composition on a cherché à déterminer le rapport **E/C** correspondant à une résistance de compression acceptable (après 28 jours).

Le béton de sable de base se compose de ciment, de sable de dune et d'eau.

Le **tableau III.1** récapitule la composition des mélanges en vue de la recherche de la composition optimale.

Tableau III.1.Composition des mélanges à élaborer (3 éprouvettes 4x4x16 cm³).

Composition	Sable dunaire	Ciment CPJ CEMII 42,5	E/C variable par pas de 5%
2/3	1200 g	800 g	0,35 à 0,55

L'optimisation de la composition du béton de sable de base (matrice) est réalisée à travers l'étude de la résistance à la compression à 28j en fonction du rapport E/C. La composition optimale est celle qui procure au béton frais une bonne ouvrabilité correspondant à une résistance de compression désirée.

III.2.2. Composition des bétons de sable BSDF

Cette phase consiste à rechercher la teneur en fines susceptible d'augmenter la résistance à la compression des bétons élaborés. Pour atteindre cet objectif, on a fait substituer le ciment avec des pourcentages variables de fines d'argile calcinée allant de 5% à 20% par pas de 5% par rapport à la masse du ciment, avec un rapport E/C fixe (phase précédente) . Le pourcentage en fine optimal est celui qui procure au mélange durci la résistance à la compression à 28 jours optimale.

III.2.3. Mode de préparation des échantillons

a) *Malaxage*

Nous avons adoptées pour les bétons de sable un malaxage normalisé selon la norme européenne **EN 196-1 [8]** et nous avons fait en sorte qu'avec ce malaxage, le mélange soit le plus homogène possible. Le malaxage est effectué au moyen d'un malaxeur à capacité de 5litres (photo III.1). Il comporte une palette permettant un mouvement planétaire susceptible de fonctionner à deux vitesses (dites lente et rapide) :140 et 285 tr/mn. Des moules normalisés ont été utilisés. Ces moules servent au moulage de 3 éprouvettes prismatiques de béton de dimension 4x4x16 cm³.



Photo.III.1. Malaxeur normalisé pour pâte et mortier.

b) Mise en moule

La mise en moule du béton de sable est effectuée en introduisant celui-ci en deux couches avec application au moule de 60 coups pour chaque couche. Le surplus du béton dans les moules est arasé à l'aide d'une truelle. Après finitions, les moules sont recouverts d'une toile en plastique afin d'éviter la dessiccation rapide du béton et sont conservés dans les conditions de laboratoire ($T=24\pm 5^{\circ}\text{C}$ et une humidité relatif de $60\pm 5\%$) durant 24h.

c) Mode de conservation

Après démoulage, les éprouvettes sont conservées dans une chambre spéciale pour la cure au laboratoire dans des conditions d'humidité $HR=85\pm 5\%$; et de température $T=22\pm 3^{\circ}\text{C}$ pendant 28 jours. Avant d'effectuer les différents essais physicomécaniques, les éprouvettes sont séchées en étuve à $T=105^{\circ}\text{C}$ jusqu'à masse constante.



Photo III.2. Mode de conservation des éprouvettes.

III.2.4. Elaboration du béton cellulaire

Après avoir déterminé la composition optimale du béton de sable (matrice), on procède à l'allégement du matériau par l'ajout d'un agent réactif qui est l'aluminium en différents pourcentages.

Les dosages pondéraux en poudre d'aluminium sont déterminés par rapport au poids du ciment utilisé. On a fait varier le dosage en aluminium de 0.2% à 0.8% avec un pas de 0.2%. Les propriétés des bétons légers élaborés seront bien entendu confrontées aux mêmes propriétés des bétons témoins et confectionnés selon les mêmes procédés de mise en œuvre et de dosage en sable, ciment, fines et eau. Cependant, le seul paramètre variable d'un mélange à l'autre est le dosage en agent réactif.

Le but du procédé, est la création de bulles de gaz à l'intérieur du matériau frais, grâce à l'addition de poudre d'aluminium de faible quantité au cours de malaxage. Le dégagement gazeux résulte de la réaction de la chaux avec la poudre d'aluminium.

III.2.4.1. Mode de malaxage et préparation des éprouvettes

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

La mise en moule doit se faire immédiatement après la fin de malaxage, afin que l'expansion du matériau ne se produise pas à l'intérieur de la cuve de malaxeur. [60]

Après la mise en moule, les éprouvettes sont conservées dans une salle de conservation ($HR=85\pm 5\%$; $T=22\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$). Au bout de 24 heures.

Après 24 heures on arase la partie expansée du béton avant le démoulage, ensuite on démoule les éprouvettes et en les placent dans leur milieu de conservation ($HR=85\pm 5\%$; $T=22\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$) pendant 28 jours.

III.3. Résultats expérimentaux

III.3.1. Etude de la maniabilité du béton de sable

Pour étudier l'ouvrabilité de notre béton et pour apprécier son écoulement en fonction de la teneur en eau, et déterminer le rapport E/C permettant de procurer la meilleure ouvrabilité. Cinq (5) compositions de différents rapports E/C ont été testées, et ce pour le dosage en ciment $C/S=2/3$. Le rapport (E/C) varie de 0,35 à 0,55 avec un pas de 0,05.

Pour chaque composition, on a essayé de mesurer le temps d'écoulement de la pâte à l'aide d'un maniabilimètre type B, et déterminer par la suite, le pourcentage E/C procurant une meilleure ouvrabilité.

Les résultats des essais au maniabilimètre « B » sont illustrés sur **la figure III.1**.

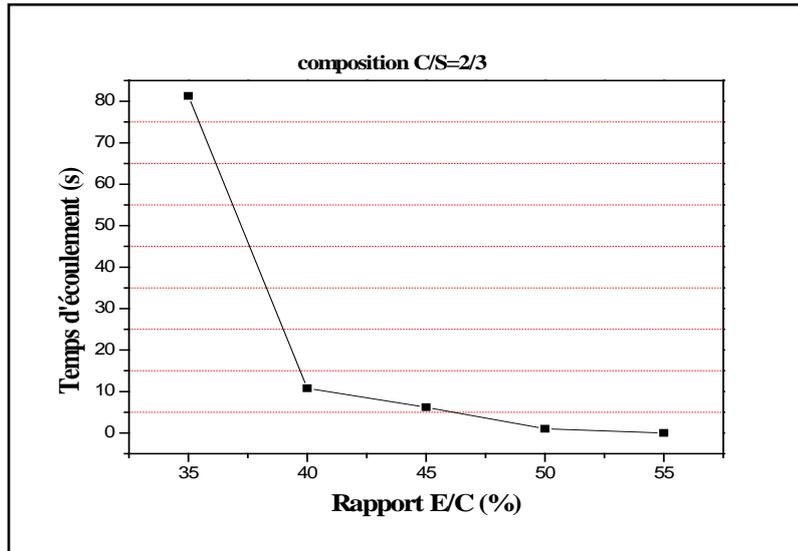


Figure III.1. Evolution du temps d'écoulement en fonction du rapport E/C.

La figure III.1 représente l'évolution du temps d'écoulement de la pâte (sable de dune, ciment) en fonction du rapport E/C. Ces résultats montrent que le temps de maniabilité diminue avec l'augmentation de la quantité d'eau. En partant d'un rapport E/C=0,35 la pâte était ferme, pour un rapport E/C=0,45 la pâte avait une bonne plasticité qui nous facilite la mise en moules (temps d'écoulement égale à 6secondes), au-delà de E/C=0,5 la pâte devient fluide.

A noté que la plasticité de la pâte est jugée bonne pour un temps d'écoulement au maniabilimètre compris entre 7 à 10 secondes [3].

III.3.2.Etude de la résistance à la compression du béton de sable BSD

Les résultats de l'évolution de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C sont illustrés dans la figure III.2.

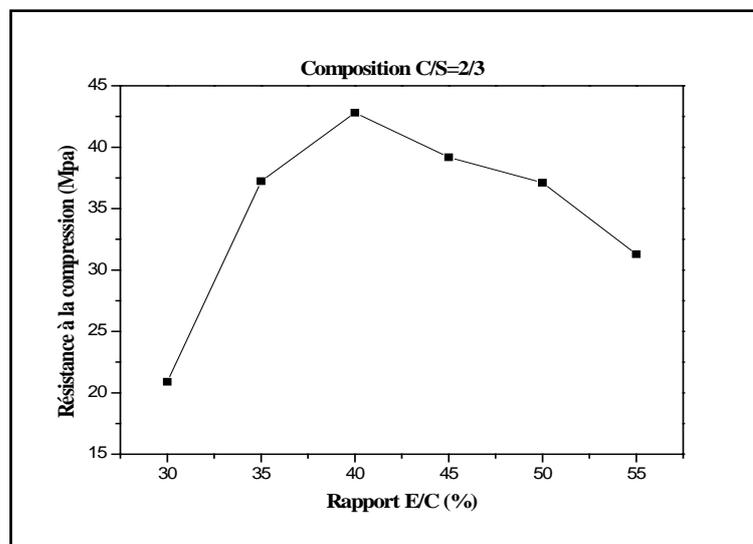


Figure III.2. Evolution de la résistance à la compression en fonction du rapport E/C (à 28jours).

Cette figure montre que la variation de la résistance à la compression augmente en fonction du rapport E/C jusqu'à une valeur optimale pour une quantité d'eau bien déterminé. Par la suite elle chute avec l'excès d'eau (c à d l'augmentation du rapport E/C). Cet optimum de résistance ($R_{c28}=42.82\text{MPa}$) est atteint, à peu près, pour un rapport E/C égal **0.40**.

Pour la suite du travail, nous avons opté pour un rapport E/C de **45%** pour toutes les compositions vu qu'il nous apporte des résistances acceptables ($R_{c28}=39.18\text{MPa}$).

III.3.3. Optimisation du béton avec ajouts de fines

Après avoir fixé la quantité d'eau utilisable dans cette recherche, il est nécessaire maintenant de voir quelle est la masse ou le pourcentage des fines d'argile calcinée qu'on va substituer dans la masse du ciment. Pour cela, on a fait varier les pourcentages des fines : 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, en fonction de la masse totale du ciment pour des différents gâchés.

Après 24 heures de la confection et du moulage ; on démoule les éprouvettes, et on les mets dans la salle de conservation pendant 28 jours avant les essais d'écrasement.

Les quantités des différents gâchées sont regroupées dans le tableau suivant :

Tableau III.2.Composition des mélanges de béton de sable avec ajouts de fines **BSDF**.

Désignation	Sable dunaire	Ciment CPJ CEMII 42,5	Fines d'ajout (argile calcinée)	Rapport E/C
BSDF0	1200 g	800 g	0 g	45%
BSDF5	1200 g	760 g	40 g	45%
BSDF10	1200 g	720 g	80 g	45%
BSDF15	1200 g	680 g	120 g	45%
BSDF20	1200 g	640 g	160 g	45%

III.3.3.1. Etude de la résistance à la compression du béton de sable BSDF

Le remplacement partiel du ciment avec l'argile calcinée aboutit aux résistances à la compression aux premiers âges qui sont considérablement au-dessous de ceux du béton de sable témoin, mais à 90 jours les résistances sont plus ou moins inchangées. Le tableau **III.3** donne les résistances mécaniques de mortiers contenant les fines d'argile calcinée. Tous les résultats montrés sont la moyenne de trois tests.

Tableau III.3.La résistance à la compression des **BSDF** (Mpa).

	7 Jours	28 Jours	90 Jours
BSDF00	31.85	39.82	41.42
BSDF05	25.80	38.81	46.13
BSDF10	23.89	36.76	45.21
BSDF15	22.61	34.13	42.40
BSDF20	19.75	31.11	40.93

La figure III.3 donne le développement de résistance en termes de résistance relative, qui est la résistance à un âge particulier divisé par la résistance du béton témoin au même âge. Le taux de remplacement du ciment entraîne une diminution de la résistance relative. Ceci est attribué à l'effet de dilution [64].

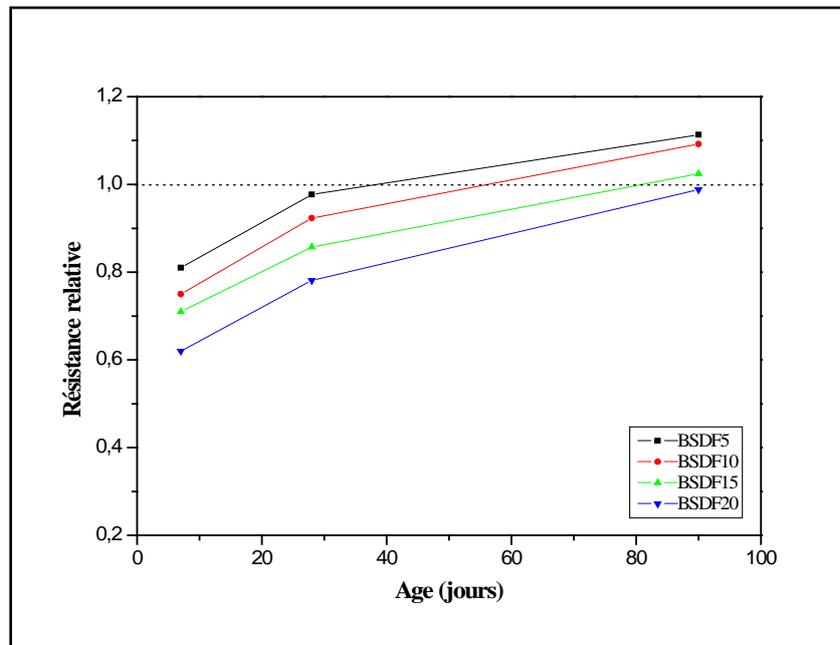


Figure III.3.La résistance à la compression relative des **BSDF**.

Le gain de la résistance, dû à l'activité pouzzolanique, n'apparaît qu'à l'âge de 90 jours, avec des remplacements de ciment jusqu'à 20 % par l'argile calcinée. D'autre part, la littérature [22] a montré que le développement des résistances mécaniques ne dépend pas uniquement des caractéristiques intrinsèques des métakaolins, mais de ses interactions chimiques et physiques avec le ciment et le sable.

III.3.4. Etude de béton cellulaire élaboré

Dans la phase d'allégement on a considéré quatre bétons cellulaires. Dans chaque type, on a utilisé différents pourcentages d'Aluminium (0.2% à 0.8% avec un pas de 0.2% du poids de ciment) pour une étude approfondie et comparative des propriétés physico-mécanique et thermique.

On désigne par :

- ✓ **BCr** : Béton cellulaire de référence sans addition de fines d'argile calcinée.
- ✓ **BC10** : Béton cellulaire contenant 10% de fines d'argile calcinée substituées dans le ciment.
- ✓ **BC15** : Béton cellulaire contenant 15% de fines d'argile calcinée substituées dans le ciment.
- ✓ **BC15S** : Béton cellulaire contenant 15% de fines d'argile calcinée substituées dans le sable de dune.

Les compositions étudiées sont résumées dans les tableaux qui suivent :

Tableau III.4. Composition des bétons cellulaires **BCr**.

Désignation		Sable dunaire	Ciment CPJ CEMII 42,5	Fines d'ajout (argile calcinée)	Rapport E/C	Poudre d'aluminium
BCr	00% Al	1200 g	800 g	00 g	45%	0
	0.2% Al	1200 g	800 g	00 g	45%	1,6 g
	0.4% Al	1200 g	800 g	00 g	45%	3,2 g
	0.6% Al	1200 g	800 g	00 g	45%	4,8 g
	0.8% Al	1200 g	800 g	00 g	45%	6,4 g

Tableau III.5. Composition des bétons cellulaires **BC10**.

Désignation		Sable dunaire	Ciment CPJ CEMII 42,5	Fines d'ajout (argile calcinée)	Rapport E/C	Poudre d'aluminium
BC10	00% Al	1200 g	720 g	80 g	45%	0
	0.2% Al	1200 g	720 g	80 g	45%	1,6 g
	0.4% Al	1200 g	720 g	80 g	45%	3,2 g
	0.6% Al	1200 g	720 g	80 g	45%	4,8 g
	0.8% Al	1200 g	720 g	80 g	45%	6,4 g

Tableau III.6. Composition des bétons cellulaires **BC15**.

Désignation		Sable dunaire	Ciment CPJ CEMII 42,5	Fines d'ajout (argile calcinée)	Rapport E/C	Poudre d'aluminium
BC15	00% Al	1200 g	680 g	120 g	45%	0
	0.2% Al	1200 g	680 g	120 g	45%	1,6 g
	0.4% Al	1200 g	680 g	120 g	45%	3,2 g
	0.6% Al	1200 g	680 g	120 g	45%	4,8 g
	0.8% Al	1200 g	680 g	120 g	45%	6,4 g

Tableau III.7. Composition des bétons cellulaires **BC15S**.

Désignation		Sable dunaire	Ciment CPJ CEMII 42,5	Fines d'ajout (argile calcinée)	Rapport E/C	Poudre d'aluminium
BC15S	00% Al	1020 g	800 g	180 g	45%	0
	0.2% Al	1020 g	800 g	180 g	45%	1,6 g
	0.4% Al	1020 g	800 g	180 g	45%	3,2 g
	0.6% Al	1020 g	800 g	180 g	45%	4,8 g
	0.8% Al	1020 g	800 g	180 g	45%	6,4 g

Les principaux essais effectués sur les bétons cellulaires durcis sont :

- Mesure de la masse volumique apparente.
- Mesure de la résistance à la compression.
- Mesure du retrait.
- Mesure de la sorptivité.
- Mesure des paramètres thermique.

III.3.4.1. La masse volumique à l'état sec

La masse volumique des bétons légers est l'une des caractéristiques les plus importantes. Sur la base de cette caractéristique nous pouvons classer notre béton et indiquer son domaine d'application. Elle est définie comme le rapport de la masse de l'échantillon à son volume apparent à l'état sec.

Les masses sèches des bétons durcis ont été déterminées par pesée à l'âge de 28 jours après séchage à l'étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Le tableau **III.8** donne les valeurs moyennes de la masse volumique apparente sèche en fonction du dosage en aluminium pour les différents bétons cellulaires étudiés.

Tableau III.8: Masses volumiques des quatre compositions du béton cellulaire à l'état sec.

Dosage en Al (%)	Masse volumique apparente (kg/m ³)			
	BCr	BC10	BC15	BC15S
0,00	1948	1923	1930	1842
0,2	1666	1765	1779	1562
0,4	1586	1706	1735	1457
0,6	1531	1663	1712	1393
0,8	1506	1648	1683	1352

La figure **III.8** permet de constater que la masse volumique apparente du matériau diminue lorsque le dosage en aluminium augmente. L'expansion apportent bien un allègement du matériau.

On enregistre une diminution de la masse volumique apparente de l'ordre de 22% pour le BCr et de 14% pour le BC10 contre 12% pour le BC15 et 29% pour le BC15S à l'état sec pour un dosage en aluminium égale 0.8%.

III.3.4.2. Porosité introduite

La porosité introduite est reliée à la densité apparente ρ du béton expansé par la relation

$$\text{suivante : } \rho_i = \frac{\rho - \rho_b}{\rho_b}$$

Où ρ_b est la densité apparente du béton non expansé (sans aluminium).

a) Influence de la substitution de l'argile calcinée dans le ciment sur la porosité introduite

Les résultats obtenus montrent qu'une augmentation du taux de substitution de ciment diminue le développement de la porosité présente dans la matrice **figure III.4**.

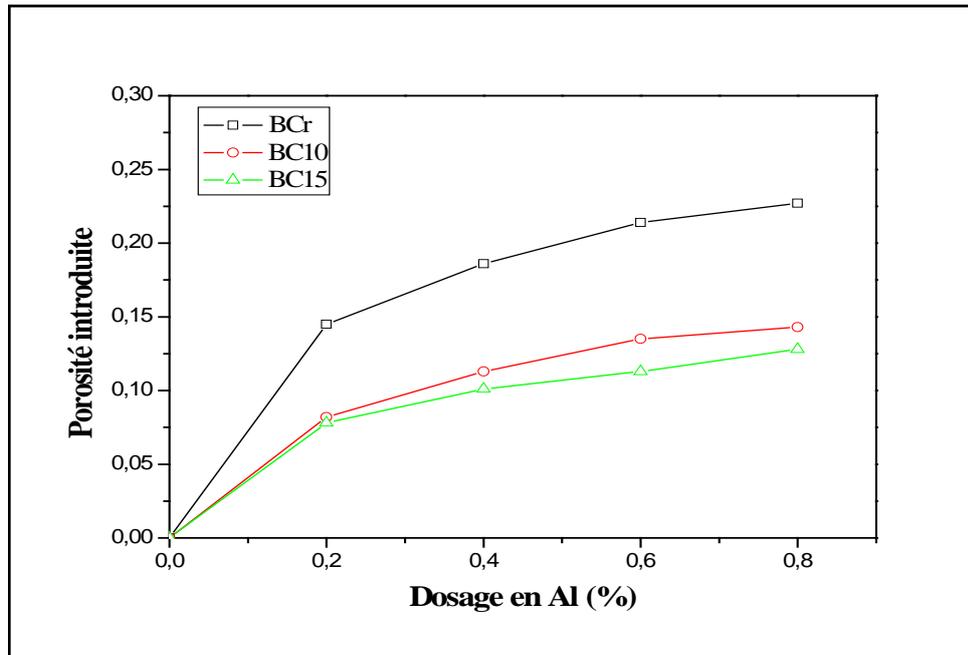


Figure III.4. L'évolution de la porosité introduite en fonction du dosage en poudre d'aluminium.

Les porosités les plus grandes (environ 0.23) sont obtenues avec la composition BCr (100% ciment) et les plus petites avec la composition BC15 (15% fines + 85% ciment). Cette diminution dans la porosité montre que la capacité de réaction de mélange (fines+ciments) avec l'agent expansif est moins importante qu'avec le ciment seul. Selon la référence [65], les propriétés hydrauliques du liant et la rhéologie de pâte dépendent de la quantité d'eau, qui influence considérablement sur la réaction chimique avec le liant et l'agent expansif.

b) Influence de la substitution de l'argile calcinée dans le sable sur la porosité introduite

Les résultats montrés sur la **figure III.5** ci-dessous montrent que la substitution des fines dans le sable favorise le développement de la porosité introduite. La composition BCr Comparée à la composition BC15S possède un taux de diminution de la porosité d'environ 15 % avec plus de 0.2 % d'aluminium ; ceci est dû aux modifications de la rhéologie de la pâte.

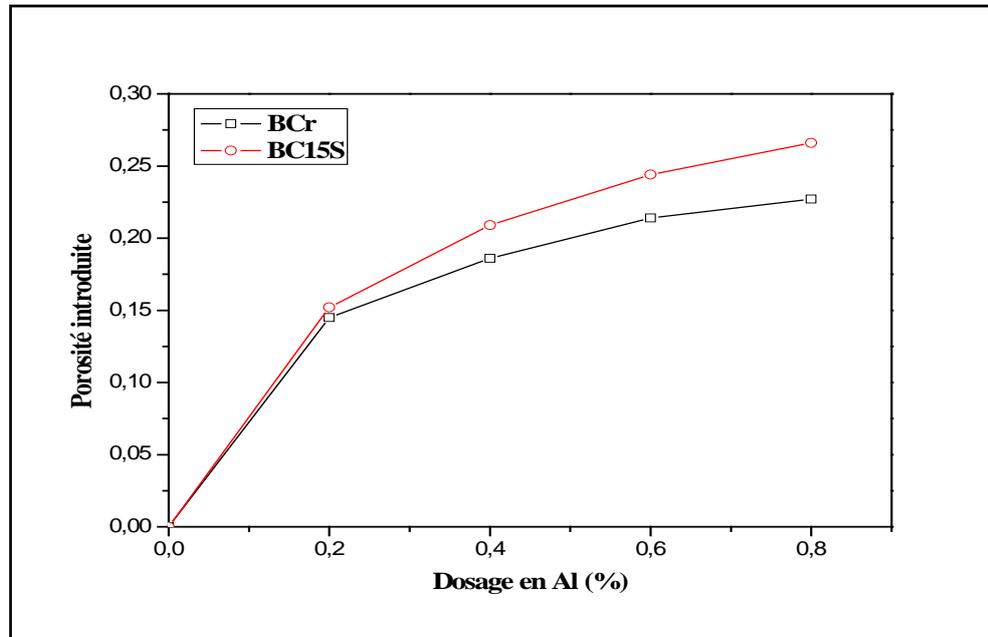


Figure III.5. L'évolution de la porosité introduite en fonction du dosage en poudre d'aluminium.

c) Influence du dosage en aluminium sur la porosité introduite

Les figures précédentes (les figures III.4-5) montrent que la composition de la matrice de base est plus favorable pour le développement de la porosité introduite quand les dosages de poudre d'aluminium varient entre 0,4 % et 0,8 % là où on signale le maximum de porosité introduite.

Pour des dosages de poudre d'aluminium plus grands, la porosité introduite devient légèrement stable. De plus, l'analyse de tous les résultats obtenus des différentes compositions a montré que les porosités introduites maximales sont atteintes par la composition **BCr** sans l'ajout de fines au ciment et que les porosités minimales correspondent aux compositions **BC10** et **BC15** obtenues avec la substitution de 10% et 15% d'argile calcinée dans le ciment.

d) Corrélation avec la densité apparente sèche

Les bétons cellulaires sont classiquement caractérisés par leur densité apparente. Comme ce paramètre dépend tant de la porosité que de la densité apparente matricielle, la densité apparente donne des informations imprécises sur l'aspect quantitatif de porosité. Ceci justifie l'utilisation de la porosité introduite ci-dessus de ce chapitre. Néanmoins, ce facteur est intéressant parce que l'étude de la relation entre la densité apparente et les caractéristiques mécaniques est l'approche habituelle utilisée pour les bétons légers et les bétons cellulaire. Pour y permettre la comparaison des matériaux dans cette étude, on présente l'évolution de la densité apparente avec le dosage d'agent expansif, pour les bétons cellulaire confectionnés **BCr**, **BC10**, **BC15**, **BC15S** sur la figure III.6.

L'évolution de la densité apparente des bétons suit les mêmes tendances que l'évolution de la porosité introduite mais en sens inverse. Notamment, une diminution de la densité apparente (environ 23 %) est observée aussitôt que l'agent expansif est introduit dans la composition.

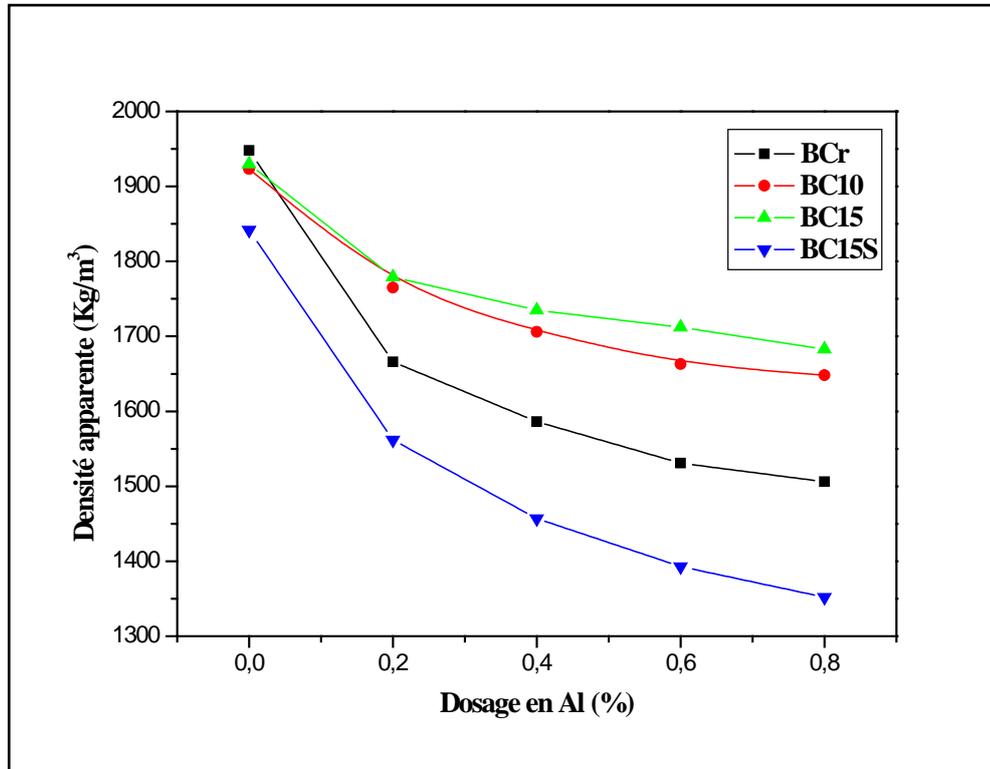


Figure III.6. L'évolution de la densité apparente en fonction du dosage en poudre d'aluminium.

La figure III.6 permet de constater que la masse volumique apparente du matériau diminue lorsque le pourcentage en aluminium augmente, et que les vides créés par l'hydrogène libéré par la réaction de l'aluminium apportent bien un allègement du matériau.

On enregistre une diminution de la masse volumique apparente à l'état sec de l'ordre de 22.7% pour le **BCr** et de 29.8% pour le **BC15S** contre 14.3% pour le **BC15** et 11.8% pour le **BC10** à l'état sec pour un dosage en aluminium égale 0.8%.

On remarque clairement que les masses volumiques apparentes à l'état sec du **BC15S** sont inférieures à celles du **BC15** et **BC10** comme le montre la figure III.6.

III.3.4.3. Résistance à la compression

L'utilisation de plus en plus répandue des bétons cellulaires dans les constructions et notamment comme éléments porteurs légers suppose l'utilisation de matériaux de plus en plus performants sur le plan mécanique.

Nous présentons dans le **tableau III.9** les résultats des résistances à la compression des différents bétons cellulaires élaborés à l'âge de 28 jours.

Tableau III.9: Résistances à la compression des bétons cellulaire élaborés.

% Al	BCr		BC10		BC15		BC15S	
	ρ (kg/m ³)	R _{c28} (MPa)	ρ (kg/m ³)	R _{c28} (MPa)	ρ (kg/m ³)	R _{c28} (MPa)	ρ (kg/m ³)	R _{c28} (MPa)
0,00	1948	39,81	1923	36,77	1930	34,13	1842	30,99
0,2	1666	10,92	1765	11,70	1779	14,66	1562	9,27
0,4	1586	9,05	1706	9,55	1735	13,17	1457	8,58
0,6	1531	8,89	1663	8,44	1712	12,37	1393	6,60
0,8	1506	7,47	1648	10,08	1683	13,84	1352	5,87

a) Influence de la substitution de l'argile calcinée dans le ciment sur la résistance à la compression

Afin de mettre en évidence l'influence de substitution du ciment par les ajouts minéraux (argile calcinée) sur les résistances en compression nous avons considéré sur la **figure III.7** les résistances à la compression des bétons **BCr** (0% d'ajouts), **BC10** (10% d'ajout), **BC15** (15% d'ajout).

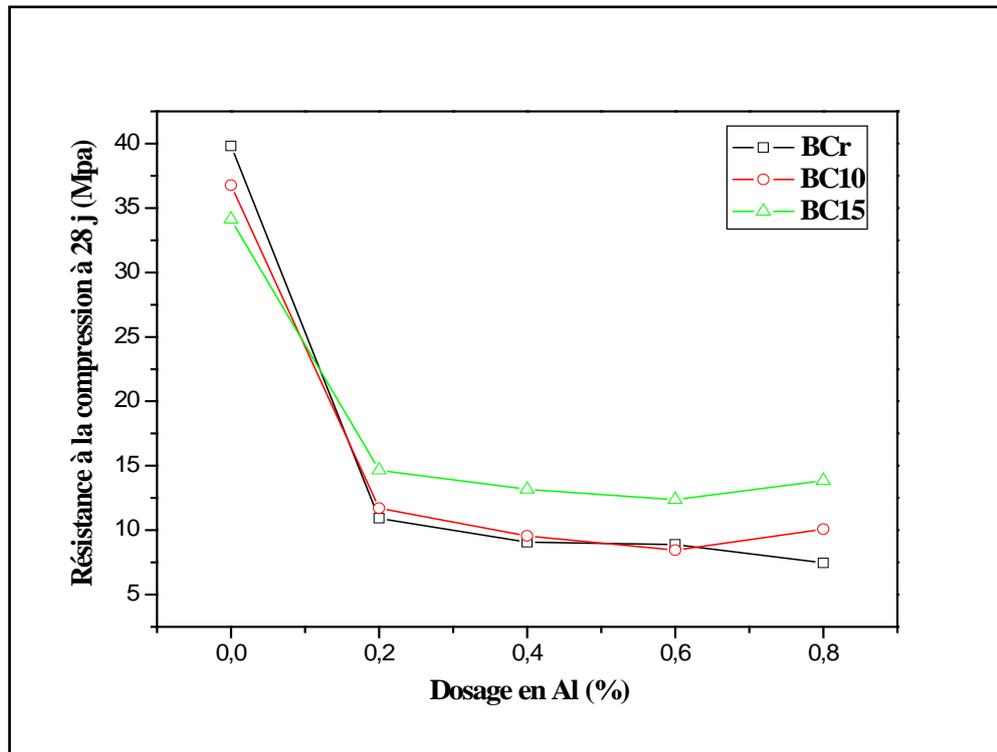


Figure III.7. L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage en poudre d'aluminium.

On constate que les écarts de résistances sont peu importants ; les résistances les plus élevées sont cependant obtenues à partir de la composition **BC10** et les résistances les plus faibles sont obtenues pour les mélanges **BCr**.

b) Influence de la substitution de l'argile calcinée dans le sable sur la résistance à la compression

Les résistances à la compression obtenues sur les bétons **BCr** et **BC15S** montrent que la substitution du sable par un pourcentage de fines minéraux diminue légèrement la résistance du matériau. Les résistances les plus faibles sont obtenues avec la composition **BC15S** ou le sable est substitué par 15% de fines d'argile calcinée.

Cette diminution des résistances s'explique par un développement important de la porosité en présence des fines dans le mélange.

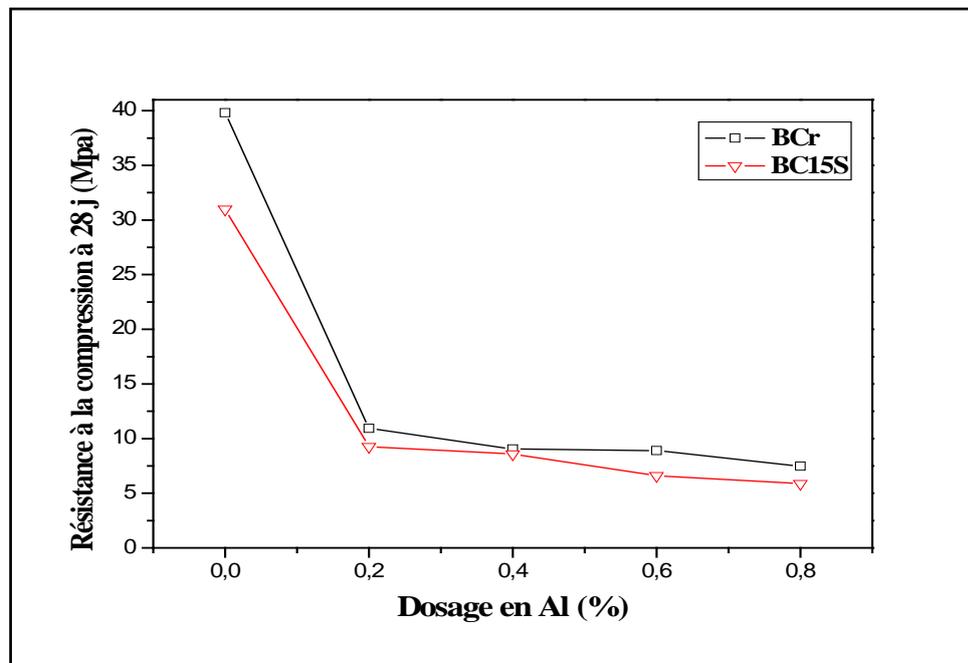


Figure III.8. L'évolution de la résistance à la compression en fonction du dosage en poudre d'aluminium.

c) Influence du dosage en aluminium

Les résistances en compression **Figures III.7-8** présentent dans l'ensemble la même évolution en fonction du dosage en agent expansif et cela indépendamment de la nature des constituants qui rentrent dans la composition de base.

Pour des faibles dosages en en agent expansif dans le mélange on constate pour l'ensemble des résistances mesurés des chutes importantes qui atteignent 80% par rapport à celle des matrices

de base non expansées ; cette chute des résistances est due essentiellement au développement de la porosité.

Pour les dosages en agent expansif supérieurs à 0.4% les valeurs ont tendance à se stabiliser et ne présentent pas de variations importantes, l'ensemble des valeurs s'inscrivant dans un fuseau borné par des résistances de 5 Mpa et 14 Mpa.

Les résistances les plus élevées sont obtenues sur des matériaux de composition **BC15** avec (85% du Ciment+15% du fines), pour lequel les valeurs des porosités sont les plus faibles. Les résistances les plus faibles sont obtenues à partir de la composition **BC15S** avec (100% ciment et sable=85% sable de dune + 15% fines) ou les porosités sont les plus élevées.

Cette différence de résistance selon la composition du mélange est essentiellement due à la différence de porosité.

III.3.4.4. Etude du retrait

Le béton possède une structure extrêmement complexe, formée de matériaux de natures minéralogiques différentes et d'une phase liquide dont l'influence est importante. Lorsque l'on observe une pièce de béton aussitôt après gâchage, on constate qu'en l'absence de toute force extérieure, elle change de volume, cette propriété qui a pris le nom de *retrait* est très souvent à l'origine des fissures que l'on trouve fréquemment dans presque tous les types d'ouvrages en béton. Ces fissures de retrait sont provoquées par la contraction du béton dont les mouvements sont partiellement ou complètement empêchés. La diminution de volume provoque des contraintes internes de traction qui peuvent être à l'origine des fissures de la pâte.

Les mesures de retrait sont effectuées à l'aide d'un support comparateur de précision 0.01 mm, sur des éprouvettes 4x4x16 cm³, munies de plots aux extrémités. Les mesures étaient faites à 1 jour au moment du démoulage. Ensuite, les éprouvettes seront conservées dans un milieu sec à une température variant entre 22°C et 28°C et une humidité (hygrométrie) relative (HR) variant entre 35 à 50%, jusqu'à la date de mesure. Pour chaque Période trois éprouvettes sont testées et chaque mesure de retrait correspond à la moyenne des valeurs relevées sur ces dernières.

Rappelons, qu'en réalité, l'hydratation du ciment ne nécessite qu'une petite quantité d'eau de gâchage; la plus grande partie de cette eau est destinée à la maniabilité lors du malaxage et elle doit s'évaporer par la suite.

Dans notre cas, et pour différents dosages en poudre d'aluminium, les mesures de retrait sont effectuées sur 3 éprouvettes aux échéances suivantes :

- Au démoulage, mesure d'origine des variations.
- A 1,7, 14,21 et 28 jours après la confection des éprouvettes.

Pour différents dosages en poudre d'aluminium, les valeurs de retraits obtenues sont illustrées par les courbes des **figures III.9-12** des quatre compositions.

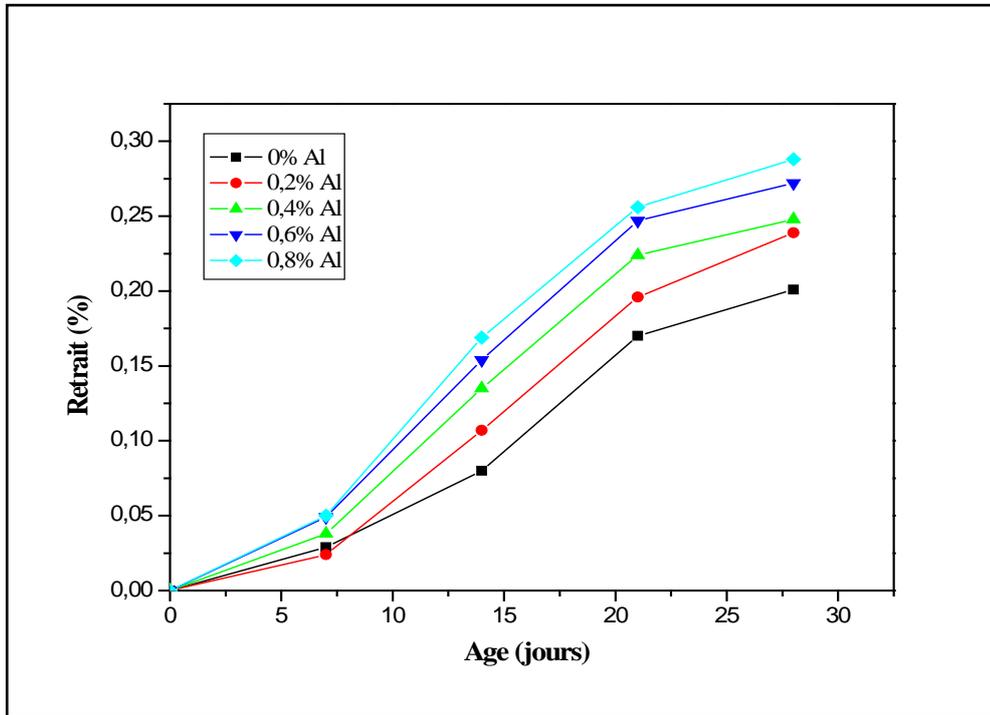


Figure III.9. Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (BCr).

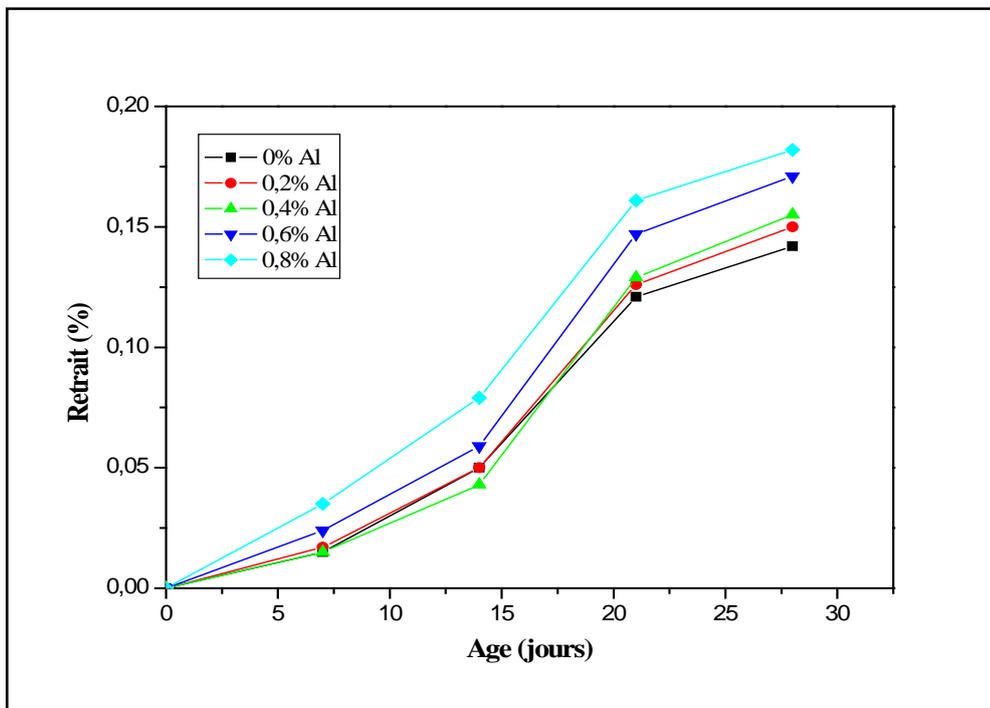


Figure III.10. Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (BC10)

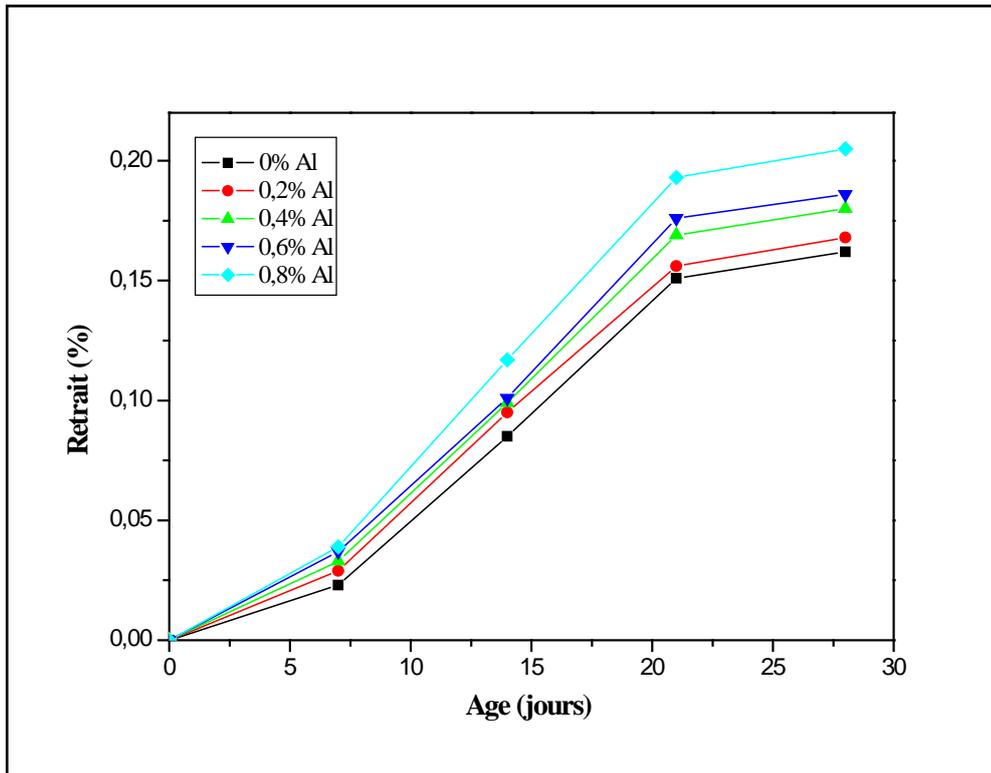


Figure III.11. Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (BC15).

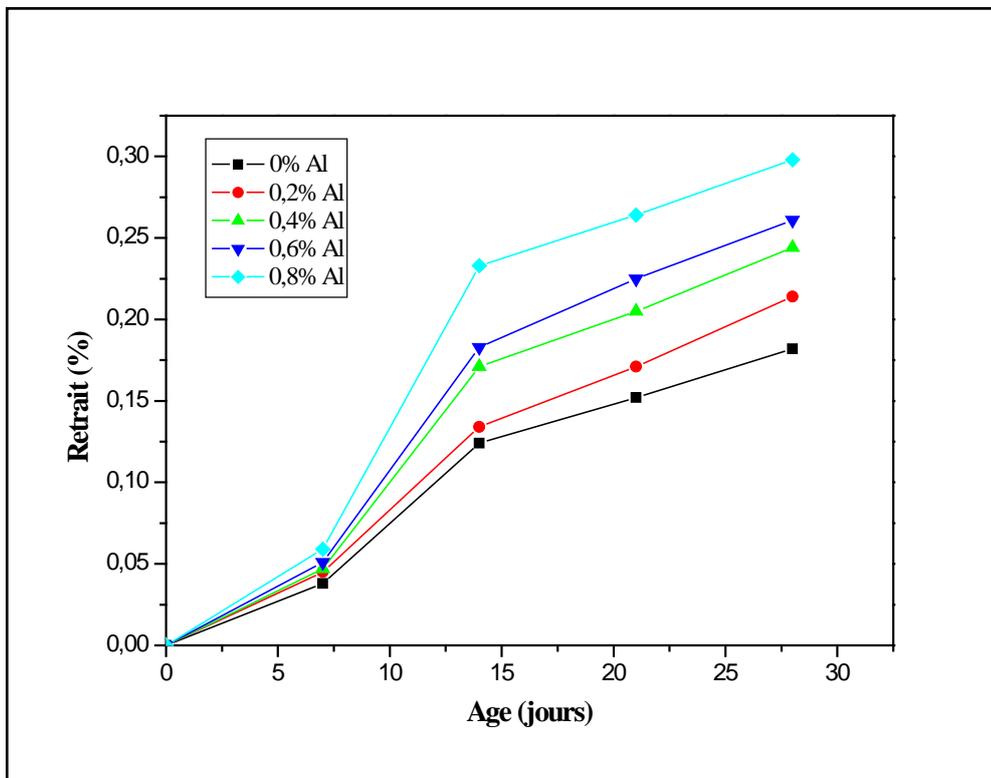


Figure III.12. Evolution du retrait en fonction de l'âge du béton (BC15S).

Le béton cellulaire possède un retrait significatif en raison de l'absence des agrégats, c'est-à-dire, jusqu'à 10 fois plus grand que ceux observés sur le béton ordinaire. L'autoclavage est rapporté pour réduire le retrait de séchage significativement de 12-50 % de celui de béton non-autoclavé (en raison d'un changement de compositions minéralogiques) et est essentiel si les produits sont exigés dans le niveau acceptable de résistance et de retrait [66].

Dans une étude [66], Il est rapporté que les granulats légers pourraient être utilisés pour réduire le retrait de béton cellulaire.

Le retrait augmente également avec l'augmentation du dosage en ciment puisqu'une plus grande quantité de pâte de ciment hydraté est responsable du retrait [31].

Pour le cas des bétons élaborés, on constate pour le **BC10** et le **BC15** que le retrait évolue rapidement pendant les premiers jours, mais, au-delà du quinzième jour, il commence à évoluer lentement avec une tendance à la stabilisation après le 21^{ème} jour. On remarque que quelque soit le pourcentage d'agent expansif, le retrait est inférieur à celui du béton témoin **BCr**. La substitution du ciment par les fines (argiles calcinée) diminue le retrait du béton ce qui confirme les résultats faible du retrait par rapport au béton témoin (Liant=100% ciment) **figure III.10-11**.

Pour le **BC15S**, on constate que le retrait évolue rapidement pendant les premiers jours, mais, au-delà du 10^{ème} jour, il commence à évoluer lentement avec une tendance à la stabilisation après le 21^{ème} jour, pour les différents pourcentages d'agent expansif (poudre d'Aluminium), nous remarquons que la substitution du 15% de sable de dune par les fines (argiles calcinée) favorise le retrait par rapport au béton témoin selon **la figure III.12**.

III.3.4.5. Etude de l'absorptivité

L'absorption est la tendance du béton à prendre de l'eau en l'absence d'une pression hydraulique externe. Ceci est censé se produire presque totalement dans les pores capillaires en dehors du gel. L'eau liquide est tirée dans ces pores grâce à la tension superficielle. L'absorption est le mécanisme principal par lequel le béton sec ou partiellement sec prene l'eau. Si l'eau contient des produits chimiques nocifs, ceux-ci pénétreront également dans le béton [67]. Plus les pores sont petits, plus l'aspiration est grande.

La sorptivité est définie par l'équation suivante : $i = S_w \sqrt{t}$

Elle présente le paramètre le plus simple pour caractériser la capacité d'absorption des matériaux. Un tel essai mesure le taux d'absorption de l'eau par succion capillaire d'un béton non saturé mis en contact avec de l'eau liquide. En comparant deux matériaux vis-à-vis de l'absorption d'eau, celui ayant la sorptivité la plus élevée est celui qui absorbe le plus vite, donc il se sature plus

vite que celui ayant la sorptivité la plus faible. Cet essai est effectué sur des éprouvettes prismatiques $4 \times 4 \times 16 \text{ cm}^3$ séchées jusqu'à masse constante, ces dernières sont placées verticalement sur leur bases $4 \times 4 \text{ cm}^2$ dans un bac d'eau, en les séparant du fond du récipient d'au moins 2cm et en maintenant le niveau d'eau constant. Les éprouvettes sont immergées dans l'eau à une profondeur de 5mm.

Pour assurer un écoulement unidimensionnel (sens longitudinal des éprouvettes) et pour éviter les échanges d'humidité avec le milieu extérieur, les faces latérales des éprouvettes ont été préalablement enveloppées par un film plastique étanche. Les bases inférieures et supérieures ne sont pas imperméabilisées pour permettre la remontée de l'eau par capillarité et l'évacuation de l'air pendant l'essai (**photo III.3**). Les éprouvettes sont pesées à des intervalles de temps régulier allant jusqu'à 4 heures. On mesure alors l'augmentation de la masse de l'éprouvette en fonction du temps.

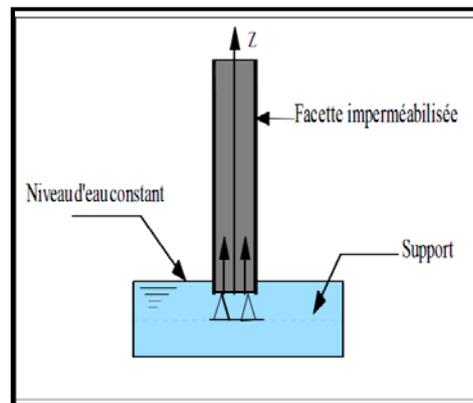


Photo III.3: Dispositif expérimentale utilisé dans l'essai d'absorption d'eau par capillarité (sorptivité).

Les résultats de l'essai d'absorptivité des différents bétons élaborés sont représentés dans **les figures III.13 et III.14**.

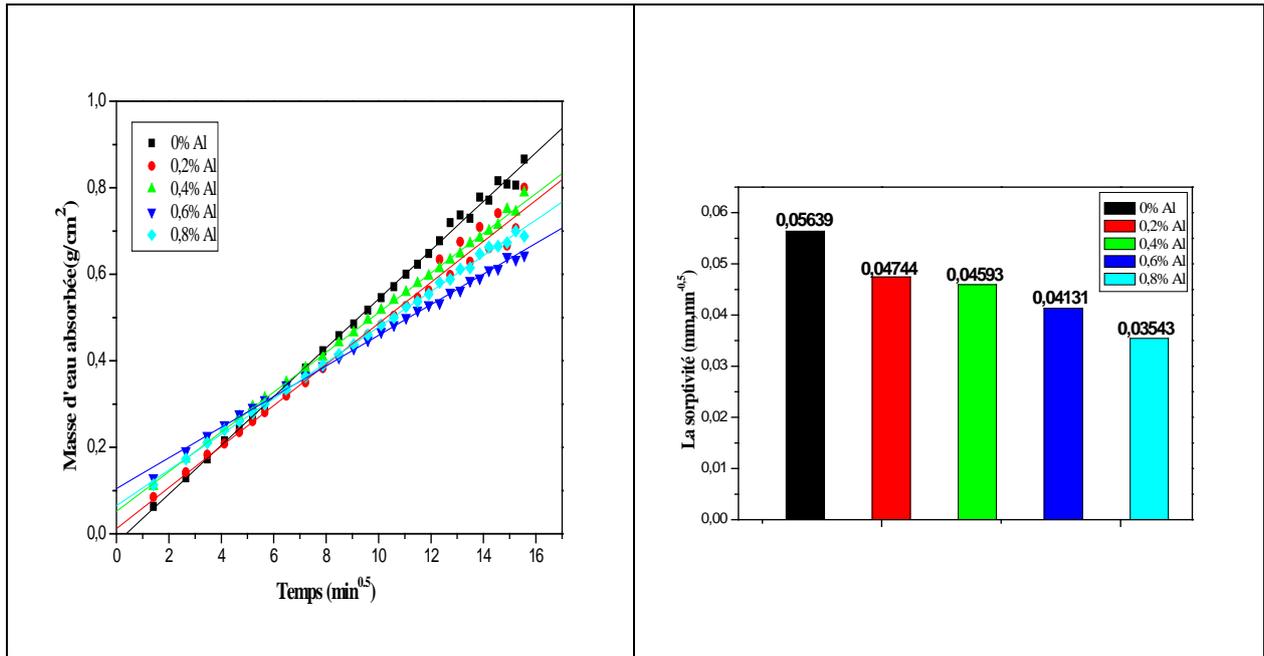


Figure III.13. Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sorptivité du béton cellulaire (BCr).

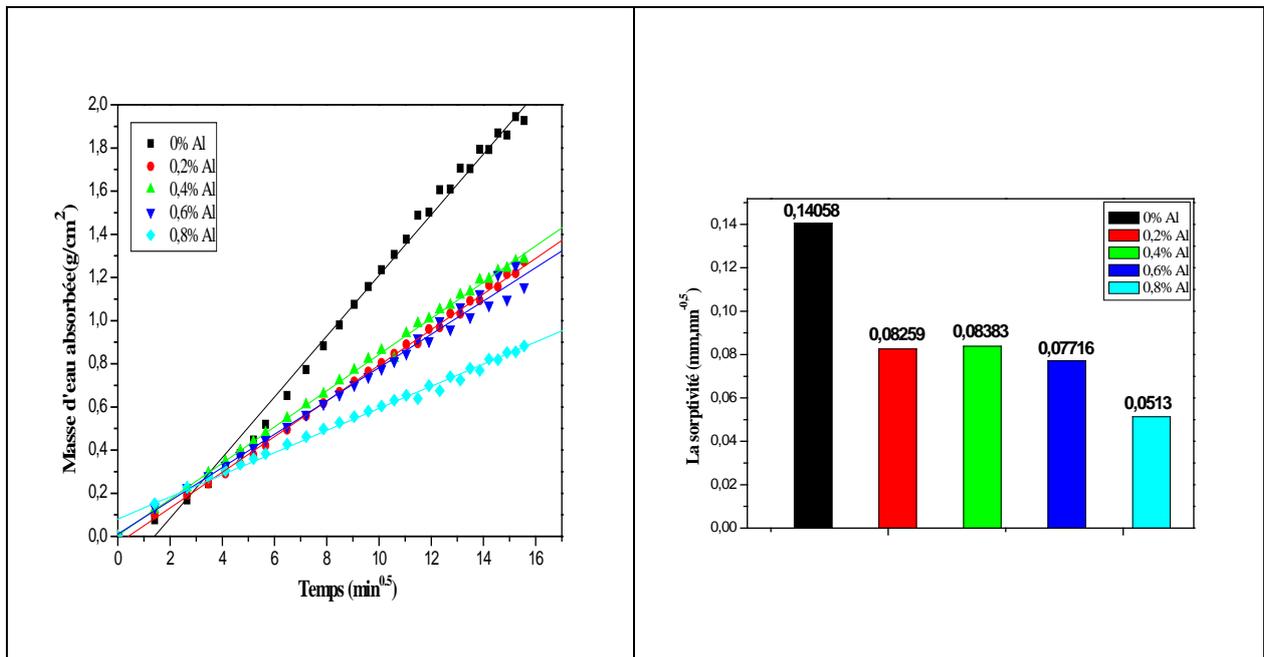


Figure III.14. Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sorptivité du béton cellulaire (BC10).

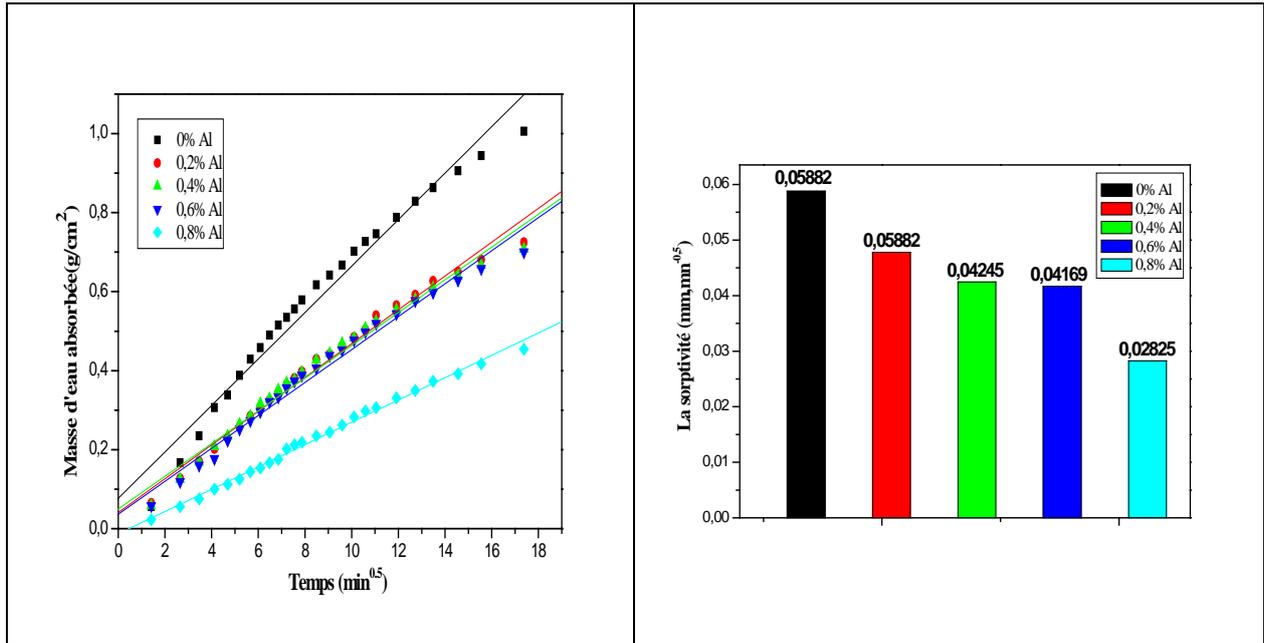


Figure III.15. Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sorptivité du béton cellulaire (BC15).

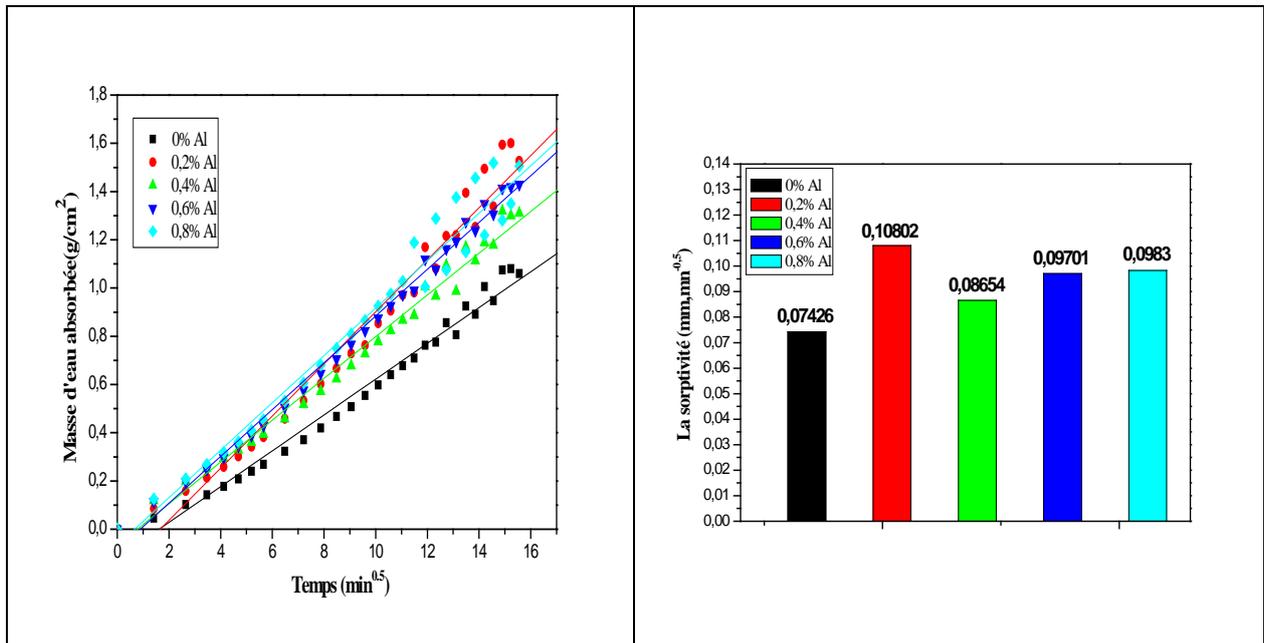


Figure III.16. Evolution de la masse d'eau absorbée par unité de surface en fonction de la racine carrée du temps et sorptivités du béton cellulaire (BC15S).

Nous constatons pour les différents bétons cellulaires élaborés que la sorptivité admet un optimum d'environ 0.14 mm.min^{-0,5} (BC10 0% Al).

Pour les bétons cellulaire **BCr**, **BC10** et **BC15** les valeurs de la sorptivité sont comprises entre $0,028 \text{ mm.min}^{-0,5}$ et $0,14 \text{ mm.min}^{-0,5}$. En effet, Celle-ci diminue en fonction du dosage en agent expansif jusqu'à la teneur 0.8% Al comme le montre les **figures III.13-15**..

Pour le **BC15S** les valeurs de la sorptivité sont comprises entre 0,074 et 0,108 $\text{mm.min}^{-0,5}$. Ceci nous permet de conclure que :

- les bétons cellulaire élaborés sont des matériaux peu ou pratiquement non absorbifs.
- La sportivité de béton cellulaire est inférieure au béton témoin non expansé. Elle diminue avec une augmentation du contenu d'agent expansif. Ceci peut être dû à la réduction du contenu de pâte. Dans le cas de sorptivité, le chemin tortueux accru pour la migration d'eau conformément à la proportion de vides aériens a tendance à freiner le phénomène de transport aussi [68].
- La sorptivité et l'absorption d'eau est principalement contrôlée par la porosité capillaire.

Le tableau III.10 ci- dessous est dressé non pas à titre comparatif du fait que les matériaux ont des porosités différentes. Mais plutôt pour situer le caractère sorptif des matériaux élaborés par rapport à d'autres matériaux de construction similaires.

Tableau III.10: Sorptivités de quelques matériaux en fonction de la densité.

Matériau	Densité	Sorptivité ($\text{mm.mn}^{-1/2}$)
Béton cellulaire autoclavé Purzak J et al. (1992)	0.390	0.287
	0.500	0.465
	0.650	0.503
Brique argileuse Purzak J et al. (1992)	1.700	1.239
Béton Purzak J et al. (1992)	2.300	0.929
Béton argileux cellulaire Goual M.S., (2000)	1.038	1.835
	0.953	1.673
	0.843	1.456
Béton Miniotaité R, (2004)	2.18	1.66
Brique de céramique Miniotaité R, (2004)	1.91	0.62
Bois de pin Miniotaité R, (2004)	0.385	0.090

III.3.4.6. Etude des caractéristiques thermiques

Les propriétés de transferts thermiques sont directement liées aux constituants, à la morphologie du milieu (matrice solide et réseau poreux) et aux interactions entre les différents types de transferts existant dans le matériau. Les propriétés isolantes des matériaux de construction se quantifient au travers de deux paramètres usuels: la conductivité thermique λ et la diffusivité a .

Ceux-ci dépendent des caractéristiques intrinsèques des constituants, de la microstructure du matériau et de son état hydrique.

La conductivité thermique λ des matériaux est la propriété le plus couramment étudiée car elle dépend uniquement de la structure du matériau et de ses composants.

Elle renseigne sur le pouvoir d'isolation thermique d'un matériau donné. En effet, la conductivité thermique mesure la capacité d'un matériau à conduire de la chaleur. Elle varie avec la masse volumique du matériau [69].

La technique de mesure que nous avons utilisée pour déterminer la conductivité thermique est la méthode dite Source Plane TPS dont la démarche expérimentale est détaillée et décrite au chapitre II. Chaque résultat représente la moyenne de trois mesures effectuées sur chaque échantillon.

a) Résultats de la conductivité thermique à l'état sec

Les valeurs moyennes des conductivités thermiques λ à l'état sec, des bétons cellulaires pour différents teneurs en agent expansif obtenues avec la méthode du Source Plane TPS, sont reportés dans le **tableau III.11**.

Tableau III.11: Les valeurs de la conductivité thermique λ à sec.

BCr		BC10		BC15		BC15S	
% Al	λ_{sec} W/ (m.k)	% Al	λ_{sec} W/ (m.k)	% Al	λ_{sec} W/ (m. k)	% Al	λ_{sec} W/ (m.k)
0	1,270	0	1,265	0	1,224	0	1,016
0,2	1,058	0,2	1,146	0,2	1,098	0,2	0,976
0,4	0,951	0,4	0,925	0,4	0,964	0,4	0,653
0,6	0,712	0,6	0,771	0,6	0,706	0,6	0,525
0,8	0,622	0,8	0,661	0,8	0,675	0,8	0,502

On constate une nette diminution de la conductivité thermique pour les quatre compositions élaborées. Comme pour tous les bétons légers, les propriétés thermiques des bétons cellulaires sont liées à leurs masses volumiques, effectivement, On constate que la conductivité thermique diminue avec l'accroissement de la proportion de la porosité introduite dans la matrice d'après **la figure III.17** ci-dessous.

Autrement dit, plus la masse volumique est faible plus les capacités d'isolations thermiques sont meilleures. Cette diminution revient à l'introduction de cellules d'air dans la matrice.

La conductivité thermique la plus faible est de 0,502 W/(m.k) pour le dosage maximum en agent expansif a été obtenue avec le **BC15S**, donc l'allègement du béton a permis de diminuer de **50%** sa conductivité thermique par rapport au béton témoin.

- Pour le **BCr**, elle est de 0,622 W/(m.k) pour le dosage en Al 0.8% et représente **49%** de celle du béton témoin.
- Pour le **BC10**, elle est de 0,661 W/(m.k) pour le dosage en Al 0.8% et représente **52%** de celle du béton témoin.
- Pour le **BC15**, elle est de 0,675 W/(m.k) pour le dosage en Al 0.8% et représente **55%** de celle du béton témoin.

La conductivité thermique obtenue est donc conforme avec les recommandations de la RILEM qui préconise un coefficient conductivité thermique inférieur à 0,75 W/(m.k) pour un béton léger de construction et d'isolation (classe II) possédant une résistance à la compression supérieur à 3,5 MPa.

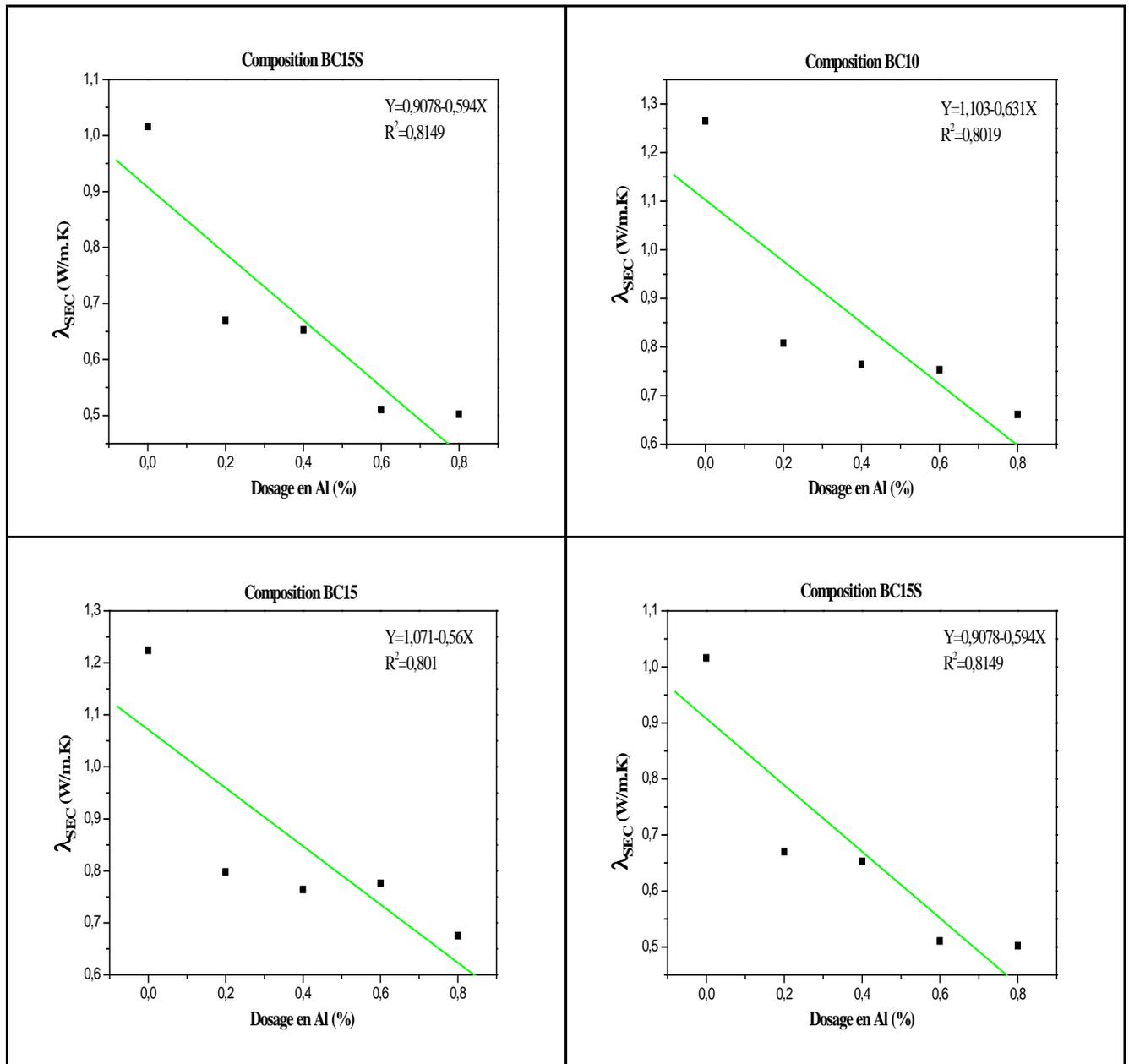


Figure III.17. Evolution de la conductivité thermique en fonction du dosage en agent expansif.

La conductivité thermique augmente lorsque la masse volumique augmente, car on diminue la proportion de vides, dans le matériau ; en effet l'ajout de poudre d'aluminium à la matrice conduit à une forte variation de la densité. Plus la teneur en agent expansif est importante, plus la masse volumique est faible, comme le montre **la figure III.18** des bétons cellulaires élaboré. On en déduit donc que la contribution de l'augmentation de la porosité joue un rôle important dans l'allégement et dans la diminution de conductivité thermique λ du matériau.

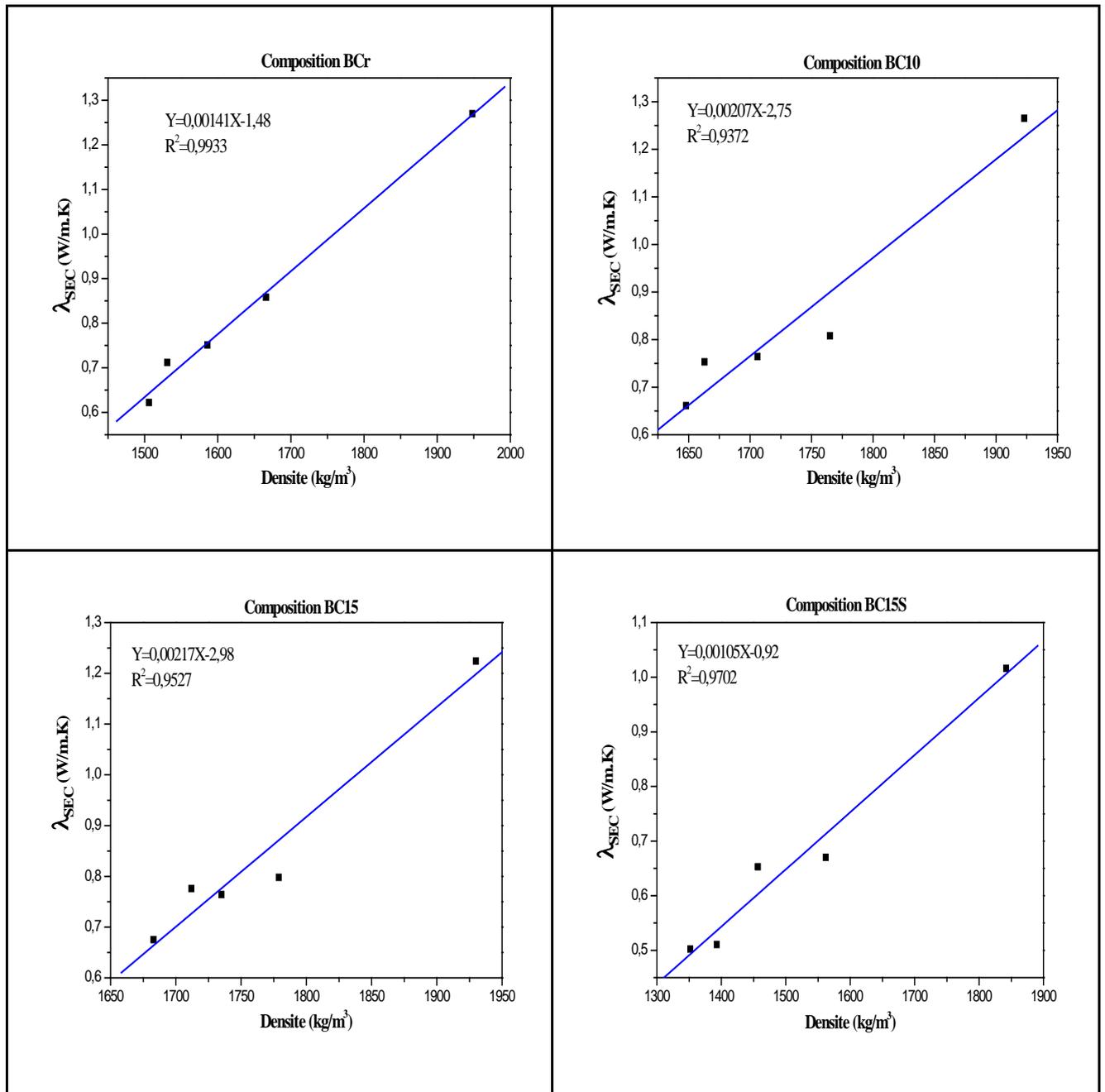


Figure III.18. Evolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique des bétons cellulaires.

On peut considérer qu'à partir de 0,4 % de poudre d'aluminium pour tous les bétons cellulaires, le matériau obtenu a de bonnes caractéristiques thermiques ($\lambda < 0.75$ w/m.k).

Les résultats obtenus montrent que le BC10 et le BC15S, possèdent un pouvoir isolant meilleur à celui de BC15.

b) Résultats de la conductivité thermique à l'état saturé

Notons que le procédé de mesure de la conductivité thermique à l'état saturé est le même. En effet, et malgré qu'on ait noté une augmentation remarquable par rapport à l'état sec,

L'évolution de la conductivité thermique à saturation ($\lambda_{\text{sat}}^{\text{uré}}$) en fonction du dosage en agent expansif reste la même. Il est clair que; plus le dosage en agent expansif (poudre d'aluminium) est élevée, plus la baisse de la conductivité thermique est importante.

Les valeurs moyennes des conductivités thermiques λ à l'état saturé, des bétons cellulaires pour différents teneurs en agent expansif obtenues avec la méthode du Source Plane TPS, sont reportés dans le **tableau III.12**.

Tableau III.12: les valeurs de la conductivité thermique λ saturé.

BCr		BC10		BC15		BC15S	
% Al	λ_{sat} W/ (m.k)	% Al	λ_{sat} W/ (m.k)	% Al	λ_{sat} W/ (m. k)	% Al	λ_{sat} W/ (m.k)
0	2,064	0	2,125	0	1,864	0	2,235
0,2	1,535	0,2	1,585	0,2	1,549	0,2	1,884
0,4	1,371	0,4	1,461	0,4	1,368	0,4	1,559
0,6	1,164	0,6	1,421	0,6	1,226	0,6	1,246
0,8	1,135	0,8	1,362	0,8	1,18	0,8	1,147

En examinant les résultats de la conductivité thermique à saturation, qui sont reportés sur la **figure III.19** et **tableau III.11**, nous pouvons faire le même constat que pour l'évolution de la conductivité thermique à l'état sec.

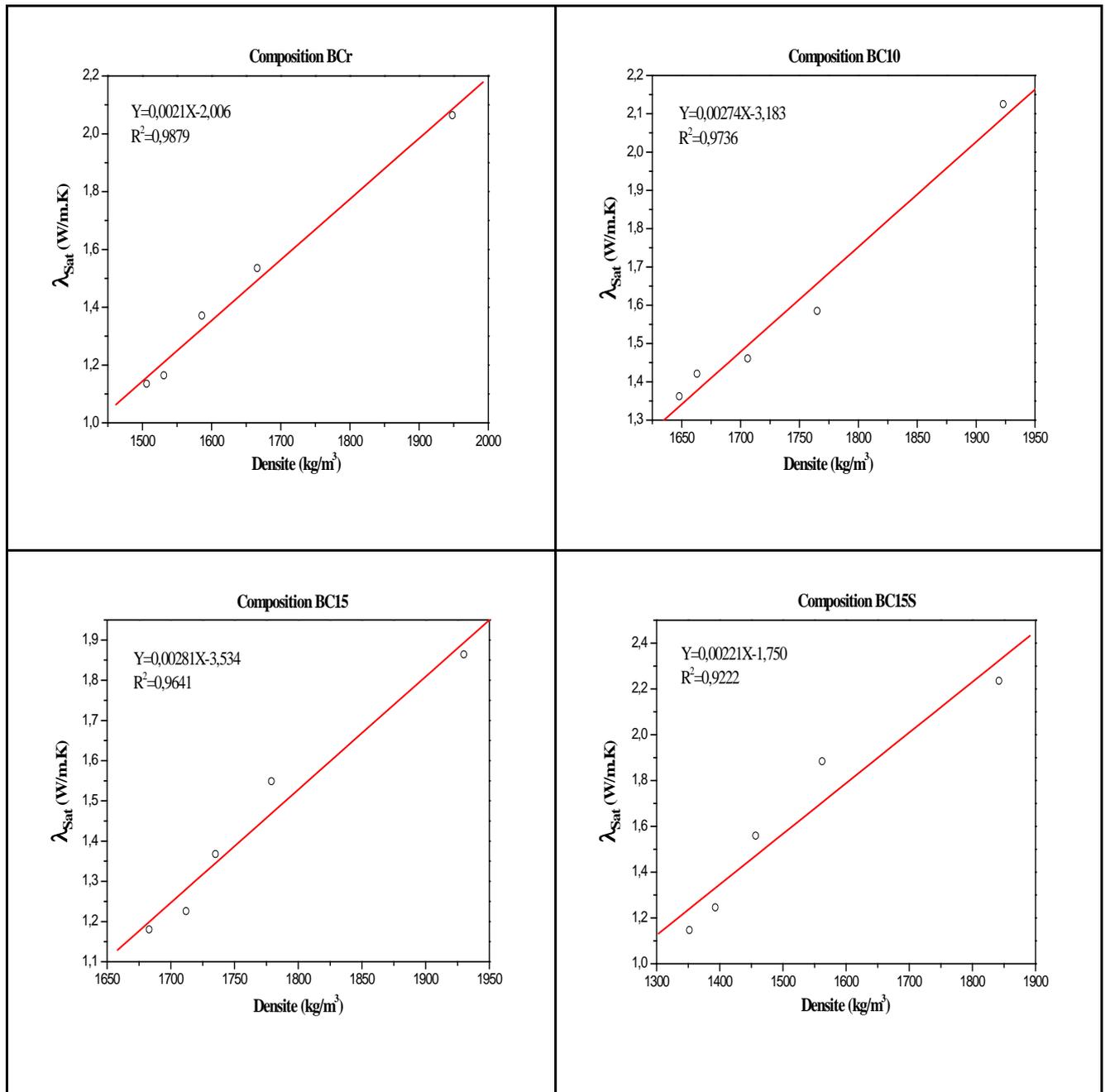


Figure III.19. Evolution de la conductivité thermique à saturation en fonction de la densité.

c) Résultats de la diffusivité thermique

Les mesures de la diffusivité thermique ont été effectuées en utilisant la technique de la sonde plane (TPS). La sonde est placée en sandwich entre deux éprouvettes (4x4x8 cm³) préalablement jumelés est emballés hermétiquement dans un film plastique en vue de maintenir constant l'état de saturation dans le matériau durant la campagne d'essai. Le dispositif expérimental utilisé est celui représenté en **Photo II.7**.

Les résultats de mesures de la diffusivité thermique a aux états extrêmes de saturation en eau, et à sec, sont donnés dans le tableau suivant.

Tableau III.13: les valeurs de la diffusivité thermique a des béton cellulaires élaborés.

	BCr		BC10		BC15		BC15S	
% AI	a_{sec} mm ² /s	a_{sat} mm ² /s						
0	1,235	1,515	0,985	0,955	1,301	1,449	0,881	0,973
0,2	0,832	1,333	0,789	0,580	0,977	0,994	0,779	0,820
0,4	0,861	1,453	0,733	0,720	0,831	0,932	0,687	0,708
0,6	0,772	0,800	0,601	0,592	0,770	0,781	0,670	0,698
0,8	0,640	0,741	0,578	0,5123	0,665	0,861	0,591	0,634

III.4. Synthèse du chapitre

Ce chapitre a été consacré à présenter et interpréter les résultats des essais physico-mécaniques et thermiques des bétons cellulaire élaborés, ainsi que les variations dimensionnelles de ces derniers. Cette partie nous a permis de prendre connaissance des classes de bétons légers en fonction de leurs densités et les valeurs limites des résistances mécaniques et de la conductivité thermique λ .

Tableau III.13: Récapitulative des différents résultats

	BCr					BC10					BC15					BC15S				
	0 %	0.2%	0,4 %	0,6 %	0,8 %	0 %	0.2%	0,4 %	0,6 %	0,8 %	0 %	0.2%	0,4 %	0,6 %	0,8 %	0 %	0.2%	0,4 %	0,6 %	0,8 %
ρ (kg/m ³)	1948	1665	1585	1531	1505	1923	1765	1706	1663	1648	1930	1779	1735	1712	1683	1842	1562	1457	1392	1352
ε (%)	0,220	0,334	0,366	0,388	0,397	0,231	0,291	0,301	0,31	0,321	0,228	0,291	0,315	0,332	0,339	0,297	0,368	0,388	0,389	0,402
R_{c28} (MPa)	39,81	10,92	8,05	6,89	6,47	36,77	14,66	13,17	12,37	13,84	34,13	11,70	9,55	8,44	10,08	30,99	12,27	9,58	9,60	7,87
λ_{sec} w/(m.K)	1,27	0,858	0,751	0,712	0,622	1,265	0,808	0,764	0,753	0,661	1,224	0,798	0,764	0,776	0,675	1,016	0,67	0,653	0,5104	0,502
λ_{sat} w/(m.K)	2,064	1,535	1,371	1,164	1,135	2,125	1,585	1,461	1,421	1,362	1,864	1,549	1,368	1,226	1,18	2,235	1,884	1,559	1,246	1,147
S_w (mm.mn ^{-0.5})	0,056	0,047	0,046	0,041	0,035	0,1406	0,0826	0,0838	0,0772	0,0513	0,0588	0,0478	0,0424	0,0417	0,0282	0,0743	0,1080	0,0865	0,0970	0,0983
classe	Classe I		Classe II			Classe I		Classe II			Classe I		Classe II			Classe I	Classe II			

Classe I : Béton léger de construction

Classe II : Béton léger de construction et d'isolation

CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail avait pour objectif l'étude de la formulation et la caractérisation physicomécanique et thermique d'un composite ciment-sable de dune-fines d'argile calcinée et poudre d'aluminium comme agent expansif. Il s'agit de montrer les potentialités d'utiliser les ressources locales, notamment les sables de dunes, les fines d'argile 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 la détermination d'une composition optimale du mélange ciment-sable de dune et fines d'argile calcinée qui confère au béton de sable les meilleures performances mécaniques. Le deuxième volet consiste en l'allègement 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 valorisation des argiles locales par transformation en fines d'ajout joue un rôle très important dans l'amélioration notable des performances mécaniques du béton de sable de dune. Pour le béton de sable de dune on a noté que le remplacement partiel du ciment Portland par les fines d'argile calcinée donne des résistances à la compression à jeune âge inférieures à celui du béton témoin. Toutefois, une substitution allant jusqu'à 20 % de ciment a permis de garder presque les mêmes résistances à 90 jours des fois légèrement supérieure que celui du béton témoin.
- Pour les bétons cellulaires la masse volumique apparente du matériau diminué lorsque le pourcentage en aluminium augmente. L'ajout de la poudre d'aluminium au mélange apporte bien un allègement du matériau et permis d'atteindre des densités comprises entre 1779 et 1352 kg/m³ pour des dosages en aluminium compris entre 0.2 et 0.8%.
- Les résultats de la substitution des fines d'argile calcinée dans le sable comparées à ceux de la substitution dans le ciment sont plus bénéfiques pour l'allègement et l'isolation.
- D'après les résultats de la porosité introduite on peut constater qu'une augmentation du taux de substitution de ciment par de l'argile diminue le développement de la porosité introduite. Ceci est tout à fait évident étant donné que la chaux dégagé lors de l'hydratation du ciment se trouve diminué par l'introduction de l'argile. D'autre part la substitution des fines dans le

sable favorise le développement de la porosité introduite; ceci est dû aux modifications de la structure granulaire du mélange sec et la rhéologie de la pâte.

- En se référant au classement fonctionnel de la RILEM [32], les résistances à la compression restent bien dans les normes exigées pour un béton léger **de construction** (classe I) et pour un béton **de construction et d'isolation** (classe II).
- Les résultats de retrait montrent bien que : 1- le retrait augmente avec la teneur en aluminium dans le mélange sable-ciment. 2- la substitution des argiles calcinées dans le ciment a tendance à diminuer le retrait dans la mélange sable-argile-ciment. Par contre, La substitution du 15% de sable de dune par les fines d'argiles calcinées favorise le retrait par rapport au béton de référence (sans fines).
- L'essai de capillarité a montré que Les bétons cellulaires élaborés sont des matériaux peu absorbifs. La sorptivité diminue avec la teneur en agent expansif (Al). D'autre part pour un dosage d'aluminium donné, les bétons avec ajout de fines d'argile calcinées ont donné les valeurs de sorptivité les plus grandes.
- 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 inférieure à $0,60 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Une valeur de $0,502 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ est enregistrée pour le BC15S pour un dosage en aluminium de 0.8% contre $0,622 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour le BCr. A signaler que les valeurs des conductivités thermiques obtenues à sec sont conformes aux recommandations de la RILEM qui préconise un coefficient de conductivité thermique inférieur à $0,75 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ pour un béton léger de construction et d'isolation (classe II) et une résistance à la compression supérieur à 3,5 MPa.
- A saturation maximale, les conductivités thermiques ont augmenté pour les quatre compositions. Ceci est dû au remplacement d'une phase moins conductrice (air) par une phase plus conductrice (eau).
- En combinant les deux aspects mécanique et thermique, nous pouvons conclure, qu'à des dosages en aluminium bien déterminées, il est possible d'obtenir de bons bétons qui peuvent servir comme matériaux isolants-porteurs et ce pour les différents bétons cellulaires élaborés.
- Sur la base des résultats obtenus, nous pouvons conclure que le procédé d'allègement étudié n'a pas donné les résultats attendus en comparaison avec les BCA (Bétons Cellulaires Autoclavés) dans lesquels on a pu fabriquer des bétons à masse volumique inférieure à 400

kg/m³ ayant des conductivités thermiques inférieures à 0.12 W.m⁻¹.K⁻¹ en utilisant du sable finement broyé et un autoclave pour accélérer le durcissement du béton. Par ailleurs, les bétons élaborés dans ce travail sans broyage de sable et sans autoclavage ont comme même des caractéristiques thermiques qui sont dans les normes bien que le procédé de fabrication ne demande aucune énergie supplémentaire.

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, à savoir l'utilisation de granulats légers naturels ou artificiels ou l'utilisation d'agents moussants comme entraîneurs d'air.
- Elargir la gamme de variation du pourcentage d'aluminium.
- L'étude du comportement thermique des matériaux élaborés dans des conditions hygrothermiques variables.
- Une étude de l'activation thermique des argiles de la région.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Astrand J, Lynda B, Johansson E, Laïd S, Teggour H, Toumi N**: Matériaux thermiquement isolants: Béton mousse, Panneaux en laine de bois. CNERIB (Algérie) et LCHS de Lund (Suède) (1994).
- [2] **CIM Béton**: Les béton de sable en structure de chaussées, centre d'information sur le ciment et ses applications, Paris, France(1995).
- [3] **Presse d'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées**: Béton de sable, Caractéristiques et pratique d'utilisation ; Projet " SABLOCRETE "(1994).
- [4] **Benaïssa, A. ; MORLIER, P. ; TRAM, V.** : " Le béton de sable, un matériau non fissurant"; Algérie-équipement, (oct. 1992) N°6, pp7-11.
- [5] **Guinez R., Gluais G. et Delude P**: "Les bétons de sable" ministre de l'urbanisation et du logement, France (1984).
- [6] **Kettab .R**: valorisation du sable de dune. Thèse de doctorat ENSP (2007).
- [7] **AFNOR**, "Béton-Bétons de sable "; Projet P 18-500 (Juin 1995).
- [8] **Normes AFNOR** :
- Essais physico-mécaniques sur les bétons et mortiers (1981-1997).
 - NF P 18-541: Granulats pour béton hydraulique. Juin 1995.
 - NF P 15-301: Ciment courant. Juin 1994.
 - NFP 18-303 : Eau de gâchage pour béton. Aout 1999.
 - NFP 18-340 : Adjuvant spéciaux pour béton. Décembre 1998.
 - EN 196-1 : Méthodes d'essais des ciments
- [9] **Presse d'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées**: Béton de sable, Caractéristiques et pratique d'utilisation ; Projet " SABLOCRETE ", mémoire de présentation (1994).
- [10] **Ghrieb.A**: Etude d'un béton de sable de dune pour pistes aéronautiques. Thèse de magister, ENSP (2003).
- [11] **G. Chauvillard, O. Bssuvaux** : " Une méthode de formulation des bétons de sable à maniabilité et résistance fixées", Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées (LCPC), N°205, Sept- Oct (1996).
- [12] **A. Benaïssa, P. Morlier, V.Tram** : "Le béton de sable, un matériau non fissurant", Algérie équipement, (1992) N°6, pp7-11 Oct.
- [13] **C.E.B.T.P**:" Synthèse de connaissance sur le béton de sable", Opération 52G119; LRPC de Bordeaux (Dec.1986).

- [14] **A. Batata, M. Zerouni** : "Le béton de sable de dune: sa performance et ses propriétés"; MATLOC 91, Séminaire à Biskra (CNERIB) (3-4 déc.1991).
- [15] **M. Benmalek, A. Bali** : "Le béton de sable de dune, un matériau de construction performant pour le monde arabe" ; C.A.M, à DAMAS, Syrie (1-3 juin 1997).
- [16] **Bederina .M**: Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à base de déchets de bois. Thèse de doctorat, l'ENP d'Alger (2007).
- [17] **Benmalek. M.L., Derbala .R** : Elaboration et caractérisation d'un béton à base de sable dunaire et de sous –produits industriels ; université de Guelma (Algerie) (9-11 février 2009).
- [18] **Robu I., Jauberthie R., Cisse I., Achoura D.** : Comportement des bétons de sable en milieu sulfatique. Algérie Equipement (2005).
- [19] **Cisse I., Laquerbe M.**: Mechanical characterization of filler sandcretes with rice husk ash additions Study applied to Senegal. Cement and Concrete Research, volume 30, (2000) pp.13-18.
- [20] **DANRAVINA**: Mechanical properties of structural concrete incorporating a high volume of Class F fly ash as partial fine sand replacement; Matériaux et construction, (Mars 1998) Vol.31, pp84-90..
- [21] **Sadr-Montazi .A** : Conception de nouveaux ciments composés. Thèse de doctorat. Lyon : INSA (1991).
- [22] **Bich.C** : Contribution à l'étude de l'activation thermique du kaolin. Thèse de doctorat. Lyon : INSA (2005).
- [23] **Ambroise.J** : Elaboration de liants pouzzolaniques a moyenne température et étude de leurs propriétés physico-chimiques et mécaniques. Thèse de doctorat. Lyon : INSA (1984).
- [24] **Silva P.S, Glaser F.P** : Pozzolanic activation of metakaolin. Advances in cement Research, (1992)Vol. 4,n°16,pp167-178.
- [25] **Martin-Calle.S** : Pouzzolanité d'argiles thermiquement activées : influence de la minéralogie et des conditions de calcination. Thèse de doctorat. Lyon : INSA (1989).
- [26] **Tironi.A, Terzza.M, Scian.A.N, Irassar.E.F**: Assesment of pozzolanic activity of different calcined clays. Cement and Concrete Composites, (2013) vol 37,pp.319-327.
- [27] **Badogiannis.E, Tsvilis.S** , : Exploitation of poor Greek kaolins: Durability of metakaolin concrete. Cement and Concrete Composites, (2009) vol 31,pp.128-133.
- [28] **Chachkchouk.A, Samet.B, Mnif.T**: Study on the potential use of Tunisian clays as pozzolanic material. Applied Clay Science, (2006) vol 33,pp79-88.
- [29] **Badogiannis.E, Kakali.G, Dimopoulou.G, Chaniotakis.E**: Metakaolin as a main cement constituent: Exploitation of poor Greek kaolins. Cement and Concrete Composites, (2005) vol 27,pp.197-203.

- [30] **Vu.D.D, Stroeven.P, Bui.V.B**: Strength and durability aspects of calcined kaolin-blended Portland cement mortar and concrete. *Cement and Concrete Composites*,(2001) vol 23,pp.471-478.
- [31] **Adam M., Neville** : Propriétés des bétons. Traduit par le CRIB Edition Eyrolles, Paris (2000).
- [32] **RILEM**: Commission des bétons légers. Terminologie et définition. *Matériaux et construction* N°13 (1970), pp60-69
- [33] **American Concrete Institute** : Guide pour le béton de structure à base du granulats légers. Traduction du CATED,SDT BTP (1970).
- [34] **Tasserie M** : Optimisation physico-chimique d'un verre expansé. Thèse de Doctorat, Université de Rennes ; Juin 1991
- [35] **Carrel. P, Louvigne. M, Malaval R**: Le polystyrène expansé. *Le bâtiment bâtir*, (Avril 1982) pp28-34.
- [36] **Ferrer M**: Bétons légers isolants à base de billes de polystyrène. Thèse de doctorat. Université de Clermont Ferrand(1985)
- [37] **Ouadi R**: Conception d'un panneau sandwich isolant-porteur. Thèse de doctorat de l'INSA. (1991)
- [38] **Morog D**: Chronique technologique : du béton à partir de granulats de bois minéralisés : Procédés Agresta, comportement mécanique et principales utilisations. CII, Paris, *Bull. Bétons* 89, N°16, Janvier 1989, pp4-5.
- [39] **ACI 213R-87**: Guide for structural lightweight aggregate concrete, *ACI Manual of concrete Practice*, parts I: Material and general properties of concrete, Detroit, Michigan, (1994).
- [40] **Kass J.L et Compbell D**: Functional classification of lightweight concrete, *Matériaux et Constructions*, (1972) Vol.5 N°27, pp171-172
- [41] **JACOBS & MAYER**: Porosity and permeability of autoclaved aerated concrete October 14-16 1992.
- [42] **ARNOULD 86** : granulats de béton légers, Paris (1986).
- [43] **Véronique Cerozo** : Propriétés mécaniques thermiques et acoustiques d'un matériau à base des particules végétales ; approche expérimental et modalisation. Thèse de doctorat (2005).
- [44] **AAC, 78**: Autoclaved aerated concrete CEB manual of design and technology; Lancaster England, The construction Press Ltd (1978).
- [45] **D.W.S Ho,R.K Lewis** : the water sorptivity of concretes :the influence of constituents under continuous curing. *Durability of building Materials*, 4,(1987),pp241-252.

- [46] **Jos Cox, Albert Ingelaere, Jacques Sizaire, Pascal Meulders, Elly Van Overmeire** : Le béton cellulaire.
- [47] **NARAYANAN.N and RAMAMURTHY.K**: Structure and proprieties of aerated concrete; a review: cement and concrete research (2000).
- [48] **S.Tada, S.Nakano** : Microstructural approach to properties of moist cellular concrete. Wittmann FH Amesterdam: Elsevier (1983) pp71-89
- [49] **N.Narayanan, K.Ramamurthy**: Microstructural investigations on aerated concrete. Cement and concrete research 30 (2000) 457-464.
- [50] **C.Lian, Y. Zhuge, S.Beecham**: The relationship between porosity and strength for porous concrete. Construction and building materials 25 (2011) 4294-4298.
- [51] **Xiao-yan Huang et al**: Preparation of autoclaved aerated concrete using copper tailings and blast furnace slag. Construction and building materials 27 (2012) 1-5.
- [52] **Richard Cabrillac et al**: Experimental study of the mechanical anisotropy of aerated concretes and of the adjustment parameters of the introduced porosity. Construction and building materials 20 (2006) 286-295.
- [53] **Wang Qiankun et al** : Microstructure and properties of silty siliceous crushed stone-lime aerated concrete : Wuhan university of technology-Mater. Sci (juin 2006).
- [54] **A.Laukaitis et al**: Influence of fibrous additives on properties of aerated autoclaved concrete forming mixtures and strength characteristics of products. Construction and building materials 23 (2009) 3034-3042.
- [55] **C.Boutin** : Conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé :modélisation par méthode auto cohérente. Matériaux et constructions 29 (1996) pp609-615
- [56] **E.K Kunhanandan Namibar, K. Ramamurthy**: Influence of filler type on the properties of foam concrete. Cement and concrete composites 28 (2006) 475-480.
- [57] **Christian Guegan, Philippe Legras, Jean Francois Mazzoleni, Christian Colin, Thomas Breiner et Nicolas Foussier** : «Mémento du béton cellulaire» (2005).
- [58] **K.Ramamurthy, N.Narayanan** : Influence of composition and curing on drying shrinkage of aerated concrete. Matériaux et constructions 33 (2000) pp243-250
- [59] **S.Tada** : Pore structure and moisture characteristics of porous inorganic building materials. Wittmann FH Amesterdam (1992) pp53-63
- [60] **Goual M. S** : Contribution à l'élaboration d'un procédé de valorisation de co-produits argileux. Cas du béton argileux cellulaire obtenu par réaction avec l'aluminium pulvérulent : Caractérisation et comportement thermohydrrique; Thèse Doctorat d'état. L'ENP d'Alger (2001).

- [61] **J.P.Laurent, C.Guerre-Chaley** : Influence de la teneur en eau et de la température sur la conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé. *Matériaux et constructions* 28 (1995) pp464-472
- [62] **J.P.Laurent** : La conductivité thermique 'à sec' des bétons cellulaires autoclavés : un modèle conceptuel. *Matériaux et constructions* 24 (1991) pp221-226.
- [63] **TAFRAOUI Ahmed** : Contribution à la valorisation de sable de dune de l'erg occidental (Algérie). Thèse de doctorat à l'INSA de TOULOUSE, 2009.
- [64] **M.O'Farrell, B.B.Sabir, S.Wild** : Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments. *Cement and concrete composites* 28 (2006) pp790-799
- [65] **Z.Malou**: Etude de l'optimisation des propriétés mécaniques et thermiques des matériaux poreux de type bétons cellulaires. Thèse de Doctorat Université de Cergy-Pontoise, France; October (1996).
- [66] **K. Ramamurthy , E.K. Kunhanandan Nambiar, G. Indu Siva Ranjani** : A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and concrete composites* 31 (2009) pp388-399.
- [67] **K.w.Meeks and N.J.Carino** :« Curing of High-performance Concrete: Report of the state of the art ».Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology Gaithersburg, MD 20899, 181pages(Mars 1999).
- [68] **E.K. Kunhanandan Nambiar ,K. Ramamurthy** : Sorption characteristics of foam concrete. *Cement and concrete research* 37 (2007) pp 1341-1347.
- [69] **M.S.Goual, et al** : Isothermal moisture properties of Clayey Cellular Concretes elaborated from clayey waste, cement and aluminium powder. *Cement and concrete research* 36 (2006) pp1768-1776