

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Civil

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie civil

Développement D'un Béton Mousse Pour L'isolation Thermique

Réalisé par :

Mohammed KRAMECHE

Sous la direction de :

M. Abderrahim BALI. Pr & M. Hichem KHEDIM. Dr

Présenté et soutenu publiquement le 24/06/2018

Composition du Jury :

Président	Mme R. KETTAB	Pr	ENP
Promoteurs	M A. BALI	Pr	ENP
	M H. KHEDIM	Manager Veille Technologique	LAFARGE
Examineur	M R. BOUTEMEUR	Dr	ENP

Ecole Nationale Polytechnique



Département Génie Civil

Mémoire de projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en génie civil

Développement D'un Béton Mousse Pour L'isolation Thermique

Réalisé par :

Mohammed KRAMECHE

Sous la direction de :

M. Abderrahim BALI. Pr & M. Hichem KHEDIM. Dr

Présenté et soutenu publiquement le 24/06/2018

Composition du Jury :

Président	Mme R. KETTAB	Pr	ENP
Promoteurs	M A. BALI	Pr	ENP
	M H. KHEDIM	Manager Veille Technologique	LAFARGE
Examineur	M R. BOUTEMEUR	Dr	ENP

Je rends grâce à Dieu, et dédie ce modeste travail ;

A la mémoire de mon grand-père

A ma mère, et mon père, pour leur soutien, leur support et encouragements

A mon frère et mes beaux-frères, qui m'ont épaulé en tout temps.

A mes amis et frères :

Ahmed ROUIKHA

Amine BIROUK

Zinou ALICHE

Amine BOURAOUI

Bachir BOUMRAH

Rami REMITA

Nadjib LAHMAR

Sifou BELWAHED

...

A toute la promotion 2015 / 2018 de l'ENP

A tous les enseignants qui ont contribué à ma formation.

Alger, le 20/06/2018

Mohammed KRAMECHE

Remerciment

J'exprime mes sincères remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, de par leurs actes conseils, ont contribué à la réalisation de ce projet.

En particulier, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à :

- Mon encadreur ; M Abderrahim BALI, enseignant au département Génie Civil de l'Ecole Nationale Polytechnique, de m'avoir encadré, orienté, aidé et initié au domaine.
- Mon encadreur ; M Hichem KHEDIM, manager chez Lafarge, pour la confiance qu'il m'a fait pour ce sujet, pour son accueil, son orientation ficelée tout au long de notre recherche et le partage de son expertise au quotidien.
- Mme Ratiba KETTAB d'avoir accepté de présider mon jury de thèse.
- M Ramdane BOUTEMEUR d'avoir accepté d'examiner ma soutenance de thèse.

Un grand merci à M Malek GHAZALI qui m'a beaucoup aidé lors de mes essais au laboratoire.

Un grand merci à M Kamel SILHADI, ancien maitre de conférences à l'ENP, qui m'a beaucoup aidé lors de mes essais thermiques.

Je remercie aussi M Toufik GACI et M Rafik DAHAKOUMIANE qui m'ont aidé à exécuter les essais mécaniques.

Je remercie tout le corps enseignant de l'Ecole Nationale Polytechnique et toutes l'équipe du CDL - Lafarge.

Je vous réitère ma profonde gratitude

Mohammed KRAMECHE

ملخص

الهدف من هذا المشروع هو المساهمة في تطوير خرسانة رغوية جديدة ، ذات كتلة حجمية أقل من 450 كغ/م³. موجهة للإستعمال كعازل حراري على أسقف البنايات. دراسة التركيبية أجريت في الحالة الأولى على اسمنت بدون إضافات. ثم في الحالة الثانية على خليط معدني صلب متكون أساسا من الإسمنت ويحتوي على كميات مختلفة من الحشو الجيري. الفعاليات الحرارية الميكانيكية تم تحديدها، كما تم دراسة مفعول الحشو الجيري. بعد ذلك، وباستخدام برنامج تم اتباع طريقة التحليل الثنائي البعدي للصور لمقارنة البنيات الفراغية للخرسانات الرغوية. الجزء الأخير من هذا المشروع يتلخص في محاكات حرارية ديناميكية، هدف ذلك هو تقييم مدى تأثير استعمال الخرسانة الرغوية على الأسطح في تحسين الفعالية الطاقوية للبنايات

الكلمات المفتاحية

رغوة، خرسانة رغوية، عزل حراري، حشو جيري، محاكات حرارية ديناميكية.

Summary

The objective of this work is to contribute to the development of a new thermal insulation foam concrete with a density of less than 450 kg/m³, applicable to roofs of buildings. The study of the mixture design is carried out, in a first case for cement without additives. Then, for a mineral phase of cement with different contents of limestone filler. The thermomechanical performances are identified, and the effect of the limestone filler is studied. Then, using the ImageJ software, the two-dimensional image analysis method is used to compare the porous structures of the foam concretes. The last part of this project consists of a dynamic thermal simulation which aims at estimating the impact of roofs thermal insulation using foam concrete, on improving the energy efficiency in buildings.

Key words

Foam, Foam concrete, Thermal insulation, Pores, limestone filler, Dynamic thermal simulation

Résumé

L'objectif de ce travail est de contribuer au développement d'un nouveau béton mousse de masse volumique inférieure à 450 kg/m³, destiné pour être utilisé comme isolant thermique sur les toits des bâtiments. L'étude des formulations est menée, dans un premier cas pour un ciment sans ajout. Puis, pour une phase minérale de ciment avec différents teneurs en filler calcaire. Les performances thermomécaniques sont identifiées et l'effet du filler calcaire est donc étudié. Ensuite, à l'aide du logiciel ImageJ, la méthode de l'analyse deux-dimensionnelle d'image est procédée afin de comparer les structures porales des bétons mousse. La dernière partie de ce projet se résume en une simulation thermique dynamique qui a pour but l'estimation de l'impact de l'isolation thermique des toits par le béton mousse sur l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments.

Mots clés

Mousse, Béton mousse, Isolation thermique, Pores, filler calcaire, Simulation thermique dynamique

Table des métiers

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction Générale	11
Chapitre 1 : Généralités Sur l'isolation Thermique	13
1.1: Introduction	14
1.2: Contexte énergétique	14
1.2.1: Contexte énergétique mondial	14
1.2.2: Consommation énergétique en Algérie	15
1.3: L'isolation thermique	17
1.3.1: Définition	17
1.3.2: Caractéristique des produits isolants thermiquement	18
1.3.3: Objectifs de l'isolation thermique	18
1.3.4: L'isolation thermique en Algérie	18
1.4: Définition du projet et de ces objectifs	24
Chapitre 2 : Etude bibliographique sur les bétons légers	26
2.1: Introduction	27
2.2: Béton de granulats légers	28
2.3: Bétons mousse et cellulaire	30
2.3.1: Voie chimique (béton cellulaire)	30
2.3.2: Voie mécanique (béton mousse)	32
2.4: Conclusion	44
Chapitre 3 : Etude de formulation et d'optimisation	46
3.1: Introduction	47
3.2: Béton mousse de ciment sans ajout	47
3.2.1: Matériaux et caractérisation	47
3.2.2: Formulation de la mousse minérale	54
3.2.3: Caractéristiques thermomécaniques	58
3.2.4: Le retrait	63
3.3: Béton mousse de ciment avec filler calcaire (FC)	64
3.3.1: Matériaux et caractérisation	64
3.3.2: Formulation de béton mousse	66
3.3.3: Résistance à la compression	67
3.3.4: Conductivité thermique	67
3.3.5: Le retrait	68

3.4: Conclusion	69
Chapitre 4 : Etude De La Structure Des Pores	70
4.1: Introduction	71
4.2: Caractérisation de la structure des pores du béton mousse	71
4.2.1: Analyse surfacique à l'aide du Logiciel ImageJ	71
4.2.2: Construction et comparaison des distributions des tailles de pores	73
4.2.3: Comparaison de la forme des pores	75
4.3: Conclusion	76
Chapitre 5 : Simulation thermique dynamique	77
5.1: Introduction	78
5.2: Généralités sur La simulation thermique dynamique	78
5.2.1: Définition	78
5.2.2: Etapes de la simulation thermique dynamique	78
5.2.3: Les résultats que fournit une simulation thermique dynamique	78
5.3: Choix de l'environnement de simulation	79
5.4: Cas d'étude	79
5.5: Modélisation	80
5.5.1: Créations du modèle géométrique	80
5.5.2: Définition des matériaux	81
5.5.3: Affectation des propriétés thermiques	84
5.5.4: Données climatiques	85
5.6: Résultats	85
5.7: Conclusion	87
Conclusion générale	88
Bibliographie	91
Annexes	
Annexe A.1	96
Annexe A.2	98
Annexe A.3	99

Liste des tableaux

Tableau 2-1: Domaine d'utilisation du béton léger en fonction de sa masse volumique [17].	28
Tableau 2-2: Propriétés de bétons de granulats légers [19] [20].	29
Tableau 2-3: : Propriétés des bétons mousses [25]	40
Tableau 3-1: Résultats des essais de résistances sur prisme de mortier	49
Tableau 3-2: Caractéristiques des agents moussants et leurs concentrations dans les solutions	52
Tableau 3-3: Dosages des constituants pour 1m ³ de béton mousse.	55
Tableau 3-4: Résultats des essais de compression sur les bétons mousse à base de ciment.	59
Tableau 3-5: caractéristiques des fillers calcaires [46]	65
Tableau 3-6 : Résistances à la compression et à la traction à 28 jours en fonction du rapport F/C.	65
Tableau 3-7: Etat de stabilité des béton mousse de ciment avec ajout FC	66
Tableau 4-1: caractéristiques de la structure porale des bétons mousse	75
Tableau 5-1: Configurations et caractéristiques des zones thermiques	81
Tableau 5-2: Propriétés thermophysiques des couches des parois	82

Liste des figures

Figure 1.1 : Consommation d'énergie par secteur (année -2016) [4]	15
Figure 1.2: Répartition de la consommation d'énergie par produit, (données rapportées par l'APRUE [5]).	16
Figure 1.3: Répartition de l'évolution de la consommation d'énergie par secteur, (données rapportées par l'APRUE [5]).	16
Figure 1.4: Consommation de gaz et électricité (en TEP) dans le secteur ménager en Algérie. (Données rapportées par le Ministère de l'Energie [6])	16
Figure 1.5: Consommation d'électricité par personne en Algérie (1971 - 2014), (Source : Bank Mondiale)	17
Figure 1.6: Objectifs d'économisation énergétique du programme national de l'efficacité énergétique.	21
Figure 1.7: Les laines minérales ; laine de verre et laine de roche	22
Figure 1.8: Les plastiques alvéolaires ; polystyrène extrudé et polystyrène expansé	23
Figure 1.9: Isolant biosourcés ; ouate de cellulose et laine de bois	24
Figure 1.10: Schéma explicatif du système d'isolation envisagé	25
Figure 2.1: Les types basiques des bétons légers [50]	27
Figure 2.2: Masses volumiques sèches des différents agrégats légers [18].	29
Figure 2.3: Schématisation de processus de formation des micelles	34
Figure 2.4: Effet Gibbs-Marangoni [30]	35
Figure 2.5: contacte entre les bulles	35
Figure 2.6: L'influence de la teneur en ajouts calcaire sur la résistance en compression [34]	38
Figure 2.7: Conductivité thermique en fonction de la densité du béton mousse fabriqué en Algérie [36]	40
Figure 2.8: Conductivité thermique en fonction de la densité du béton mousse	41
Figure 2.9: Retrait de béton mousse, masse volumique cible 300 kg/m ³ [36]	42
Figure 2.10: Retrait de béton mousse, masse volumique cible 500 kg/m ³ [36]	42
Figure 2.11: images binaires typiques de différentes densités de béton de mousse et combinaisons de matériaux [38]	44
Figure 3.1: Moule sur table à choc	48
Figure 3.2: Moule à éprouvettes Prismatiques	48
Figure 3.3: Eprouvette après démoulage	48
Figure 3.4: Moule remplie de mortier	48
Figure 3.5: Appareillage de compression	49
Figure 3.6: Appareillage de Traction par flexion	49
Figure 3.7: Sondes de l'appareil de VICAT	50

Figure 3.8: Appareil de VICAT	50
Figure 3.9: Perméabilimètre de Blaine	51
Figure 3.10: Echantillon de ciment	51
Figure 3.11: Méthode de Ross-Miles [41]	52
Figure 3.12: Décomposition des mousses dans le temps	53
Figure 3.13: Coulis de ciment	56
Figure 3.14: Mousse minérale fraîche	56
Figure 3.15: Aspect de la surface de la mousse minérale, cas d'utilisation des agents de démoulage, (échelle 1/1)	57
Figure 3.16: Moule enveloppé par le film plastique adhésif	57
Figure 3.17: Moule rempli avec de la mousse minérale fraîche	57
Figure 3.18: Eprouvette cubique 70×70×70 mm	59
Figure 3.19: Eprouvette prismatique 70×70×280 mm	59
Figure 3.20: Évolution des résistances à la compression sur cubes en fonction de la masse volumique des mousses minérales pour les âges : 7, 14 et 28 jours	59
Figure 3.21: Sonde monotige utilisée pour mesurer la conductivité thermique	60
Figure 3.22: Essai au Ct-mètre en cours	60
Figure 3.23: Résultats de l'essai de conductivités thermique de béton mousse de ciment sans FC.	61
Figure 3.24: Schéma représentatif de la boîte chaude gardée	61
Figure 3.25: Eprouvette en mousse minérale de dimensions 30×30×05 cm	62
Figure 3.26: Essai du retrait sur des éprouvettes prismatiques	63
Figure 3.27: Résultat de l'essai du retrait sur mousse minérale de masse volumique 420 kg/m ³ .	64
Figure 3.28: Résistance à la compression sur mortier normalisé en fonction du rapport filler/ciment	66
Figure 3.29: Effet du filler calcaire sur la résistance à la compression de béton mousse.	67
Figure 3.30: Résultats de l'essai de conductivité thermique de béton mousse de ciment avec ajout FC	68
Figure 3.31: Retrait du béton mousse de ciment avec ajout FC.	68
Figure 4.1: Photo du plan de coupe après traitement avec le logiciel Photoshop, échelle réelle.	72
Figure 4.2: Étapes d'analyse des images par ImageJ	73
Figure 4.3: Distribution des surfaces partielles des pores	74
Figure 4.4: Distribution des surfaces cumulées des pores	74
Figure 4.5: forme des pores des deux bétons mousse	76
Figure 5.1: Plan d'architecture du cas d'étude	79
Figure 5.2: Modèle multizones du cas d'étude	80

Figure 5.3: variantes pour le plancher supérieur (toit).	82
Figure 5.4: Bibliothèque des matériaux dans ECOTECT	83
Figure 5.5: besoins énergétiques de chauffage et de climatisation pour le cas d'un plancher non isolé	85
Figure 5.6: besoins énergétiques de chauffage et de climatisation pour le cas d'un plancher isolé	86

Introduction Générale

En Algérie, plus de 41% de la consommation énergétique est destinée au secteur du bâtiment, cela est d'autant plus inquiétant au regard de la croissance du parc immobilier qui augmente d'année en année. Conscient de ces enjeux, le gouvernement algérien mène, depuis des années, une politique d'amélioration de la gestion des ressources énergétiques dans ce secteur. Les premiers projets de recherches lancés en 1992 par le ministère de l'habitat ont permis de développer des matériaux thermiquement isolants, Puis, la première réglementation thermique des habitations est apparue en 1999, avec une mise à jour en 2016. Cette dernière s'inscrivait dans le contexte du nouveau programme d'efficacité énergétique 2016 - 2030 qui s'attaque au problème de l'efficacité énergétique des bâtiments. Cette initiative est encouragée par

l'industrie locale de matériaux isolants à faible empreinte écologique. Dans ce contexte, Il s'avère nécessaire de remplacer les anciens systèmes d'isolation thermique par d'autres, durables, plus écologiques et plus performants tel que le cas des bétons mousse.

L'objectif de ce travail est de formuler un béton mousse de nature minérale thermiquement isolant apte à concurrencer les solutions d'isolation classiques en termes de résistance mécanique, résistivité thermique, mais surtout à faible empreinte écologique. Afin de satisfaire cet objectif, notre travail s'est articulé autour de quatre piliers d'étude.

La première partie s'intéresse à la consommation énergétique en Algérie et aux différents produits isolants existants. Ensuite, nous dressons un état de l'art des travaux portant sur les bétons légers en général, et les bétons mousse plus précisément, leurs méthodes de formulation et les paramètres affectant leurs performances (choix des paramètres de la mousse, les ajouts, le liant...). La stabilité de béton mousse et ses conditions seront ensuite définies.

La seconde partie expérimentale s'articule autour de deux chapitres. Le premier est consacré à la formulation de béton mousse à base d'un ciment blanc (sans ajout) ; Nous commencerons par présenter les résultats des essais de caractérisation des matériaux, ensuite nous justifions tous les choix des paramètres de notre formulation. Les propriétés thermomécaniques de béton mousse ainsi que son comportement au retrait seront ensuite évalués. La deuxième partie de ce chapitre sera dédiée à une formulation optimisée de béton mousse basée sur l'utilisation des fillers calcaires dans la matrice cimentaire.

Afin de mieux comprendre les résultats d'identification des performances thermomécaniques, nous consacrerons un chapitre à l'analyse et la comparaison des structures des pores de deux bétons mousse ayant la même teneur en mousse aqueuse et qui diffèrent par leur teneur en filler calcaire. Les résultats permettraient d'expliquer l'effet des fillers calcaires sur la forme des pores de béton mousse.

Dans la troisième partie, nous évaluerons par le biais d'une simulation thermique dynamique le pouvoir du béton mousse produit, comme composant des toitures, d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments.

Chapitre 1

Généralités Sur L'isolation Thermique

1.1:Introduction

En Algérie où la croissance démographique et économique tire à la hausse les besoins énergétiques et où le changement du mode de construction afin de satisfaire les demandes de logements a conduit à une dégradation des climats intérieurs des bâtiments, les enjeux du confort thermique deviennent de plus en plus cruciaux. Dans ce chapitre, nous traitons en premier lieu l'évolution de la consommation énergétique en Algérie en se focalisant sur le secteur de bâtiment. Ensuite, nous évoquons les étapes prises et les réalisations faites en matière de rationalisation de la consommation énergétique dans ce secteur à travers le renforcement de l'isolation thermique. De plus, nous illustrons les différents matériaux isolants existant sur le marché algérien tout en délimitant leurs avantages et inconvénients.

1.2:Contexte énergétique

1.2.1: Contexte énergétique mondial

Face à la dure réalité des limites en ressources naturelles de notre planète, le siècle dernier fut marqué par une prise de conscience collective de la population mondiale, engendrant la mise en place d'une notion de développement durable. Cette dernière a été définie en 1987 par le rapport Brundtland (Commission sur l'environnement et le développement de l'ONU) comme étant : "satisfaire les besoins actuels, sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs" [1].

L'empreinte écologique ou plus conformément les ressources naturelles consommées sont, selon le rapport du WWF (World Wide Fund For nature) pour l'année 2010, estimées à plus de 20 % supérieures aux capacités de production de notre planète terre. Pour une période donnée, le même rapport stipule qu'entre la période allant de 1971 à 2007, la demande énergétique a plus que doublé [2].

Depuis le début des années 70, la consommation énergétique primaire mondiale a connu une croissance quasiment exponentielle. En 2012, cette consommation fut estimée à plus de 13371 millions TEP¹ soit $155,504 \cdot 10^{12}$ kWh, dont plus de 90% sont représentés par des énergies non renouvelables tel que le pétrole qui à lui seul dépasse les 30 % [3].

La diminution de ces dites ressources naturelles ainsi que le dégagement de gaz à effet de serre causé, la pollution de plus en plus importante, sont le résultat de cette consommation d'énergie.

¹TEP : La tonne d'équivalent pétrole ; est une unité de mesure de l'énergie. Elle est notamment utilisée dans l'industrie et l'économie. Elle vaut, selon les conventions, 41,868 GJ parfois arrondi à 42 GJ.

1.2.2: Consommation énergétique en Algérie

L'énergie fait l'objet de plusieurs problématiques mondiales et locales en termes d'approvisionnement, d'efficacité et de pollution. Le secteur du bâtiment a sa part dans cette problématique puisqu'il représente la plus grande part de la consommation d'énergie en Algérie avec 43.3%, suivi du secteur des transports avec 35.71% et ensuite le secteur industriel avec 21.6% [4] comme indiqué dans la Figure 1.1.

1.2.2.1: Consommations dans le secteur ménager en Algérie

Depuis 1980, la consommation globale de l'énergie ne cesse d'augmenter. En effet, les statistiques montrent qu'elle a quadruplé l'année 2000 [5]. L'électricité, le gaz naturel, le fuel, le charbon, le bois et même les piles électriques sont les vecteurs d'énergie du secteur domestique [5]. Les différentes voies de consommation d'énergies en Algérie sont ;

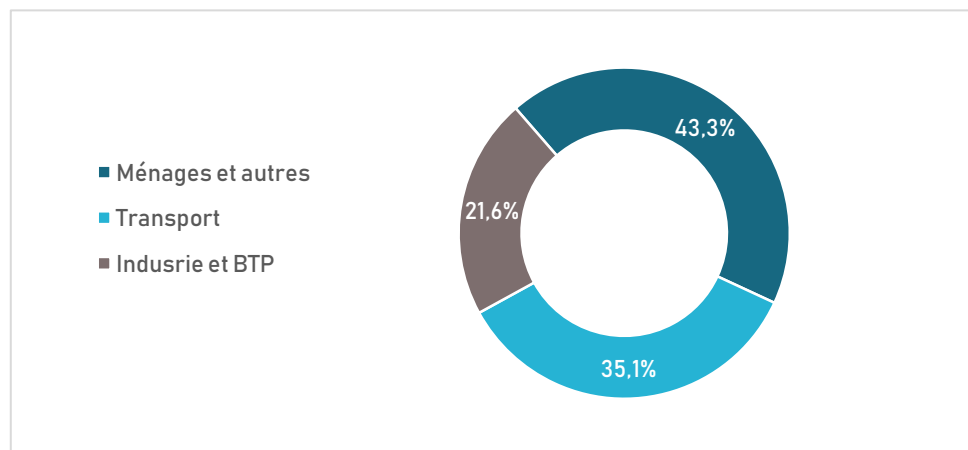


Figure 1.1 : Consommation d'énergie par secteur (année -2016) [4]

- Le chauffage, qui domine le secteur de la consommation, pour environ 60% de l'énergie domestique [5].
- L'éclairage, l'électroménager, l'audiovisuel et la climatisation représentent près de 20% de l'énergie [5].
- L'eau chaude sanitaire représente près de 15% et la cuisson représente près de 5% [5].

La consommation d'énergie individuelle finale par habitant était de 0.48 TEP en 1990, Elle évolue en dépassant 0.71 TEP en 2000, 1.35 TEP en 2010 et atteindrait 1.88 TEP en 2020 [5]. La Figure 1.2 représente la répartition de la consommation d'énergie où l'on constate la domination du gazoil avec un pourcentage de 32% ; il est destiné pour le secteur de transport. Notons que le gaz et l'électricité sont les énergies consommées dans

le secteur du bâtiment dont la consommation du deuxième a atteint 38% (tertiaire + résidentiel) [5].

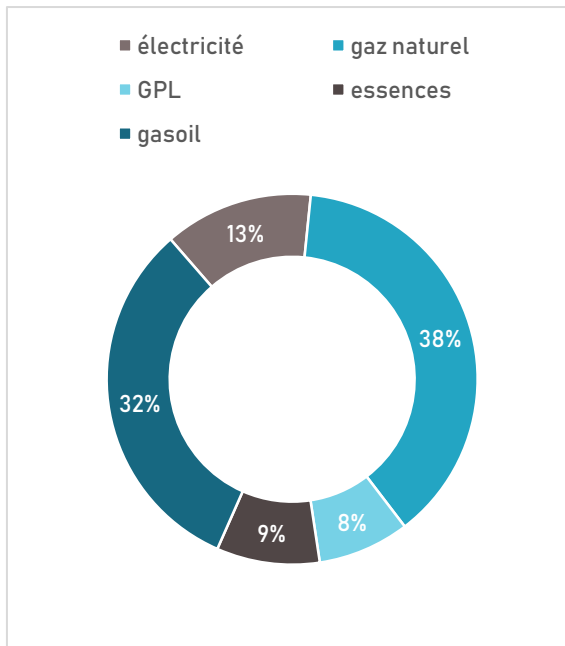


Figure 1.2: Répartition de la consommation d'énergie par produit, (données rapportées par l'APRUE [5]).

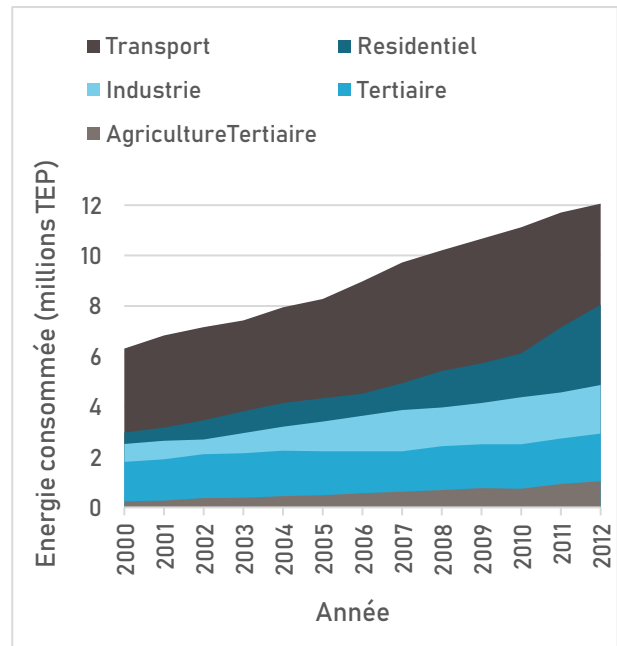


Figure 1.3: Répartition de l'évolution de la consommation d'énergie par secteur, (données rapportées par l'APRUE [5]).

1.2.2.2: Consommation du gaz naturel et de l'électricité en Algérie

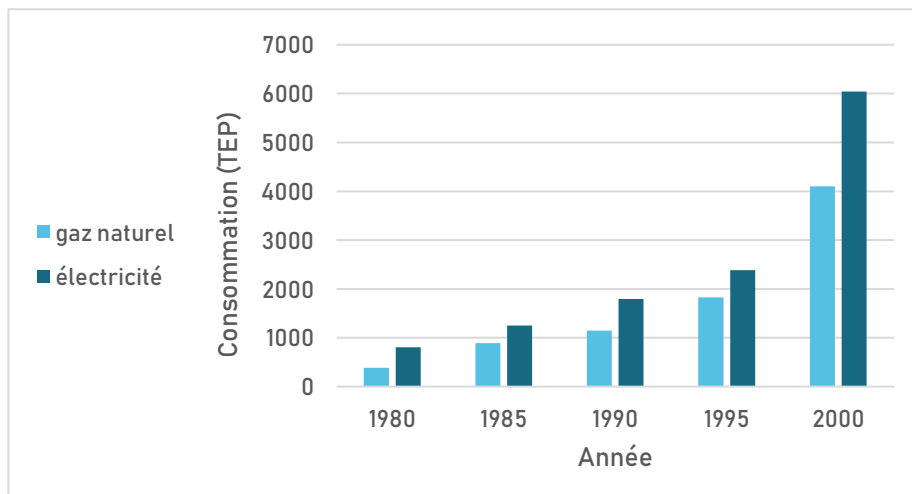


Figure 1.4: Consommation de gaz et électricité (en TEP) dans le secteur ménager en Algérie. (Données rapportées par le Ministère de l'Énergie [6])

La consommation du gaz naturel a vu le jour en 1961 avec un rythme de 156 millions de m³. Elle a atteint 1.4 milliards de m³ en 2000. D'après les données statistiques relevées auprès du Ministère de l'énergie (Figure 1.4), une évolution de la consommation de gaz est enregistrée. L'utilisation du gaz naturel s'est multipliée par 30 en l'an 2000 avec un rythme annuel de 4.6% d'évolution prévisible de la consommation [6]. Quant à la

consommation et à la production d'électricité, elles enregistrent une augmentation de 41,5% et 61,5% durant la période de 1980 à 1990 [6].

Les statistiques de la banque mondiale montrent que la consommation d'énergie électrique par habitant en Algérie a augmenté avec un taux de 919 % entre les années 1971 et 2014 (figure I.5). La même source prévoit qu'en 2020, la valeur de la consommation devrait osciller autour de 1 958 kWh par personne.

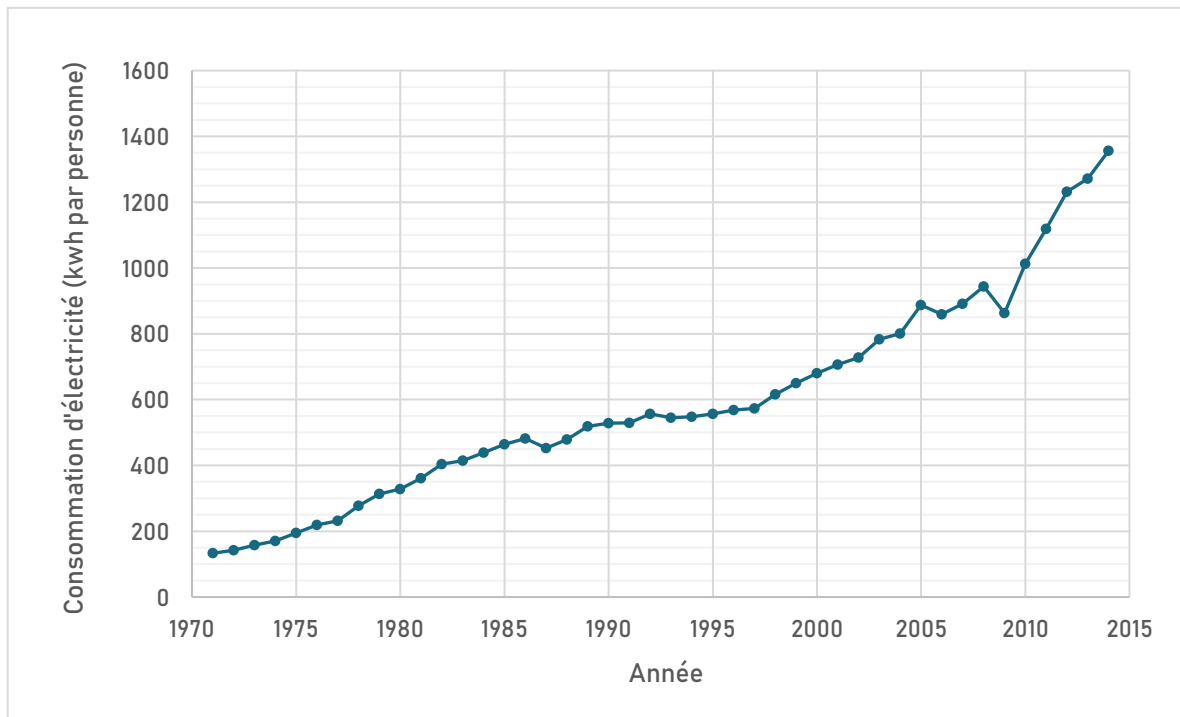


Figure 1.5: Consommation d'électricité par personne en Algérie (1971 - 2014), (Source : Bank Mondiale)

D'après les bilans énergétiques nationaux, la consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières 4 années de 4,3% par an. Quant à la demande d'électricité, elle connaît une croissance de 7% par année.

1.3:L'isolation thermique

1.3.1: Définition

L'isolation thermique est un terme générique utilisé pour décrire le processus de réduction du transfert de chaleur au travers d'un système, ou pour décrire le composant ou système qui est performant pour cette fonction. L'isolation thermique peut être réalisée à l'aide d'un matériau, d'un produit ou d'un système isolant [7].

- Un matériau isolant thermique est une substance ou un mélange de substances dont les propriétés d'isolation résultent de sa nature chimique et/ou de sa structure physique [7].
- Un produit isolant thermique est un matériau d'isolation thermique prêt à l'emploi, y compris parements ou enduits [7].

- Un système d'isolation thermique est l'association de deux ou de plusieurs composants dont l'un au moins est un produit ou un matériau isolant. La performance du système est la performance de l'ensemble [7].

1.3.2: Caractéristique des produits isolants thermiquement

Le coefficient de conductivité thermique λ exprime la quantité de chaleur transmise par heure à travers un matériau d'une superficie de 1m^2 et d'une épaisseur de 1m lorsque la différence de température entre les deux faces opposées est de 1 degré Kelvin (symbole K). La valeur λ dépend de la nature du matériau et de sa teneur en humidité. Plus la valeur λ d'un matériau est petite, plus sa capacité d'isolation est grande.

1.3.3: Objectifs de l'isolation thermique

Les objectifs s'expriment principalement à travers :

- Le confort des occupants en toute saison, c'est -à-dire une ambiance adaptée aux usages prévus dans le bâtiment et permettant de satisfaire le confort d'hiver comme d'été.
- L'hygiène et la santé des occupants (par rapport aux besoins en oxygène, à l'élimination des odeurs, fumés et gaz nocifs divers).
- La pérennité du bâtiment et des équipements (par rapport aux problèmes de condensation, de mise hors gel...).
- La préservation de l'environnement, par rapport à l'utilisation de ressources non renouvelables et aux émissions de polluants dans l'atmosphère.

1.3.4: L'isolation thermique en Algérie

1.3.4.1: Indifférence en isolation thermique

La construction dans le domaine du bâtiment en Algérie a été longuement caractérisée par une crise due à un déficit dans l'offre estimé à plus de 1.4 million d'unités. Pour pallier à cette situation, les pouvoirs publics ont mis en place un vaste programme de construction avec comme objectif de réaliser le plus grand nombre de logements dans des délais très courts. Cette option a apporté de réels résultats sur le plan quantitatif mais a fait apparaitre d'autres problèmes liés à la qualité thermique des constructions. On a noté une détérioration du niveau de confort intérieur lorsqu'on est passé des constructions traditionnelles à bonne isolation thermique de la toiture et à bonne capacité de stockage thermique des murs, à des bâtiments « modernes » mais souvent inconfortables du point de vue thermique et par conséquent sont une source importante de consommation d'énergie suite à une utilisation accrue de chauffage et de la climatisation.

Il en a résulté une augmentation de la consommation d'énergie dans le pays qui coïncide avec l'augmentation du coût de l'énergie depuis 1985, donc, de fortes contraintes budgétaires pour le foyer algérien suite aux dépenses additionnelles destinées à payer les équipements et l'Energie nécessaire pour maintenir un climat intérieur satisfaisant.

1.3.4.2: Les premiers travaux de recherche sur l'isolation thermique

C'est seulement à partir de 1991 que l'on a commencé à se préoccuper en Algérie des questions d'isolation thermique et qu'on a commencé à chercher des solutions pratiques qui permettraient de minimiser le flux de chaleur à travers l'enveloppe des bâtiments. Cela s'est traduit par le lancement d'une succession de projets de recherche et d'études techniques algéro-suedois traitant les possibilités d'améliorer le climat interne des bâtiments en développant des solutions thermiquement isolantes applicables aux toitures, à base de matériaux localement disponibles et faisant appel à des techniques de production et de mise en œuvre simples. L'Alfa, la laine de bois ainsi que le béton mousse ont été étudiés pour fabriquer des panneaux destinés à remplacer les corps creux des planchers et abaisser ainsi les transferts de chaleur à travers cette partie de l'enveloppe du bâtiment.

1.3.4.3: Règlementation thermique algérienne

Depuis plusieurs années, le gouvernement algérien mène une politique d'amélioration de la gestion des ressources énergétiques. Cette politique est spécifiée par la loi N°99-09 du 28 juillet 1999 relative à la maîtrise de l'énergie et de ses textes d'application. Par ailleurs, le décret exécutif N°2000- 90 du 24 avril 2000 portant sur la réglementation thermique dans les bâtiments neufs a été promulgué. En 1999, le Ministère du Logement et de l'Urbanisme élabore le premier code énergétique algérien du bâtiment. Ce document qui se présente sous forme de deux fascicules : un pour l'hiver DTR C3.2 [8] et un deuxième pour l'été DTR C3.4 [9] avait pour objectif de réduire la consommation énergétique destinée au chauffage de 20% à 30%.

Plus de 16 années après, une version révisée de cette réglementation est élaborée, avec comme principales modifications :

- Rassemblement des deux fascicules en un seul document.
- Renforcement des exigences.
- Définition d'un nouveau zonage.

La réglementation thermique algérienne actuellement en vigueur est le DTR C3.2/ [10], la vérification de la conformité d'un bâtiment vis-à-vis de cette nouvelle réglementation doit se faire pour la période d'hiver et pour la période d'été séparément.

En ce qui concerne la vérification d'hiver, Le DTR stipule que pendant la période de chauffage, les déperditions calorifiques par transmission à travers les parois doivent être inférieures à une valeur de référence.

$$D_T \leq 1,05 D_{réf}$$

$$D_{réf} = aS_1 + bS_2 + cS_3 + dS_4 + eS_5$$

a , b , c , d , e étant les coefficients de transmission thermique des différentes parois (respectivement le toit, le plancher, les murs, porte et fenêtres). S1, S2, S3, S4, S5 représentent la surface de ces parois [10].

Pour la période d'été, les apports de chaleur à travers les parois opaques (A_{PO}) et vitrées (A_V) calculés à 15 h au mois de Juillet (considéré comme le mois le plus chaud de l'année) doivent être inférieurs à une limite appelée 'Apport de Référence ($A_{réf}$)' [10].

$$A_{PO}(15h) + A_V(15h) \leq 1,05A_{réf}$$

La révision de cette réglementation rentre dans le cadre du nouveau programme d'efficacité énergétique en Algérie.

1.3.4.4: L'isolation thermique dans le programme national d'efficacité énergétique 2030

L'Algérie, l'un des pays signataires du protocole de Kyoto, a adopté un nouveau programme national d'efficacité énergétique. A horizon 2030, ce programme devrait permettre à l'Algérie d'économiser 63 millions de tonnes équivalent pétrole (TEP), représentant un gain financier de 42 milliards de dollars [11]. Ce programme qui a été lancé en 2016, se déploie autour des secteurs de l'industrie, du transport et de l'habitat. Dans le secteur de bâtiment, le programme vise à encourager la mise en œuvre de pratiques et de technologies innovantes, autour de l'isolation thermique des constructions existantes et nouvelles. Des mesures adéquates seront prévues au niveau de la phase de conception architecturale des logements [12].

Il s'agit également de favoriser la pénétration massive des équipements et appareils performants sur le marché local, notamment les chauffe-eaux solaires et les lampes économiques : l'objectif étant d'améliorer le confort intérieur des logements en utilisant moins d'énergie [11].

La mise en place d'une industrie locale des isolants thermiques et des équipements et appareils performants (chauffe-eaux solaires ; lampes économiques) constitue l'un des atouts pour le développement de l'efficacité énergétique dans ce secteur [12].

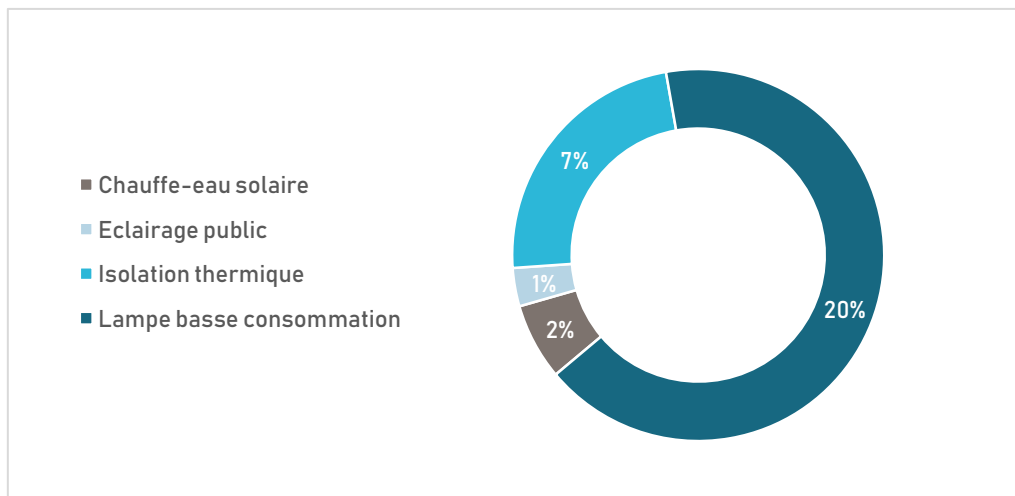


Figure 1.6: Objectifs d'économisation énergétique du programme national de l'efficacité énergétique.

Ce programme prévoit l'isolation thermique de 100.000 logements annuellement, avec un engagement financier de l'état qui prendra en charge 80% des surcoûts liés à cette opération [11].

1.3.4.5: Les produit d'isolation thermique sur le marché Algérien

1.3.4.5.1: Les laines minérales :

Des produits fabriqués par des matériaux issus, comme leur nom l'indique, de matières premières minérales telles que la roche ou le verre. Ces matières premières sont travaillées pour former un matelas de fibres qui immobilisent l'air et apportent ainsi un pouvoir isolant au produit fini. La performance de ces matériaux est fonction de leur densité. Cependant, la conductivité thermique des laines minérales est comprise entre 0,03 et 0,05 [7].



Figure 1.7: Les laines minérales ; laine de verre et laine de roche

a) La laine de verre :

La laine de verre est produite à partir de silice (95 %) chauffée à environ 1100°C. elle se caractérise par une conductivité thermique variable De 0,032 à 0,056 W/(m.K). Elle est légère et facile à mettre en place, cependant, on peut lui associer certains inconvénients ; Elle sujette facilement au tassement y compris le tassement sous son propre poids, d'un autre côté, en la manipulant, on peut se retrouver avec des éclats de verre coincés dans la peau ce qui cause généralement des irritations cutanées.

Sur le plan environnemental, bien qu'elle soit issue de matériaux naturels, la laine de verre est un produit non recyclable de verre génère une énergie grise de 250 kWh/m³ [13].

b) La laine de roche :

La laine de roche est produite à partir de roches volcaniques fondues à environ 1500°C (diabase et dolérite). Sa conductivité thermique varie entre 0,033 et 0,042 W/(m.K). Elle existe sur le marché sous différentes formes ; rouleaux, panneaux rigide ... ce qui permet une mise en place plus facile et adaptable à l'application envisagée. Les inconvénients de la laine de roche se résument dans le tassement qu'elle peut présenter ainsi que l'énergie grise associée à sa production qui vaut 150 kWh/m³.

1.3.4.5.2: Les plastiques alvéolaires

Des isolants obtenus à partir de matières plastiques que l'on expande à l'aide d'un gaz. Lors de l'expansion, il est possible de les mouler pour leur donner la forme que l'on souhaite. C'est le gaz emprisonné dans la mousse qui lui donne son pouvoir isolant. Dans le cas du polystyrène expansée ou moulé, c'est de l'air qui est emprisonné. Dans le cas du Polyuréthane ou du polystyrène extrudé qui sont plus rigides par rapport au premier, c'est du dioxyde de carbone, voire un autre gaz plus isolant.

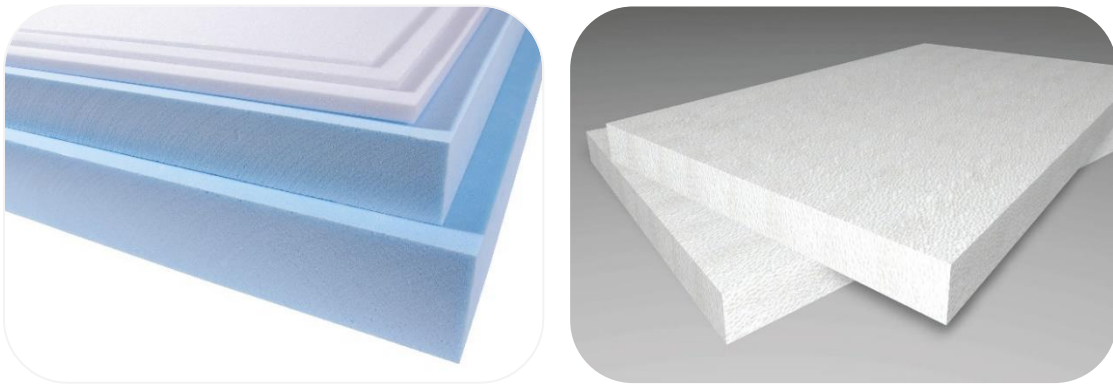


Figure 1.8: Les plastiques alvéolaires ; polystyrène extrudé et polystyrène expansé

La conductivité thermique de ces produits dépend du gaz d'expansion. Pour le polystyrène, la valeur de la conductivité thermique varie entre 0,32 et 0,45 W/(m.K) pour des masses volumiques comprises entre 10 et 40 respectivement.

Une forte empreinte d'énergie grise qui dépasse 800 kWh/m³ est associée à production des isolants de cette catégorie. De plus, ces matériaux sont non recyclables et dégagent des gaz toxiques en cas d'incendie [13].

1.3.4.5.3: Les produits d'origine végétale ou animale

Appelés aussi matériaux biosourcés, en raison de l'origine des fibres qui représentent les matières premières utilisées pour les confectionner. Les plus connus sont le chanvre, le lin, le bois, le coton..., etc. Ces fibres sont extraites afin de fabriquer des produits isolants d'origine végétale simple à mettre en œuvre. D'autres produits d'origine animaux sont produits à partir des poils, fourrure, plumes, laine des animaux [13].

Selon leur nature, ces matériaux biosourcés peuvent avoir une masse volumique variable ; ce qui donne une plage de valeurs de conductivité thermique délimitée par 0,037 et 0,045 W/(m.K) [7].

a) La ouate de cellulose :

La ouate de cellulose est un matériau issu du recyclage du papier ou de fibres de bois. Afin d'améliorer la réaction au feu, la résistance aux insectes, aux rongeurs et aux moisissures, des adjuvants sont ajoutés avec des pourcentages qui n'excèdent pas généralement 12 % du poids du produit. La ouate de cellulose est principalement utilisée comme matériau de remplissage, mais des panneaux peuvent également être produits.

La ouate de cellulose est un matériau ininflammable, recyclable et en plus de son pouvoir isolant, il peut jouer le rôle d'un traitement contre les nuisibles inoffensifs pour la santé. Cependant, le caractère écologique de ce matériau demeure controversé. Si les particules de la cellulose ne sont pas aussi fines que celles de la laine de verre, elles peuvent

néanmoins provoquer des inflammations pulmonaires lors de leur mise en œuvre en l'absence d'une protection appropriée.



Figure 1.9: Isolant biosourcés ; ouate de cellulose et laine de bois

b) Laine de bois :

La laine de bois, aussi appelée fibre de bois, est obtenue par défibrage de chutes de bois ou d'arbres autrement inexploités. Elle dispose d'une conductivité thermique légèrement supérieure aux isolants traditionnels (λ varie de 0,039 à 0,050 W/(m.K)) et nécessite donc une épaisseur un peu plus importante pour obtenir les mêmes performances d'isolation en hiver. En revanche, sa forte densité associée à une capacité thermique importante fait que la fibre de bois joue un rôle important sur le confort d'été. Les inconvénients de ce matériau se résument dans ; sa sensibilité à l'humidité, la nécessité d'être ignifugé et traité contre les rongeurs, ainsi que son prix élevé par rapport aux autres solutions isolantes.

Tous ces produits se caractérisent par des conductivités thermiques faibles, mais doivent être associés à des structures porteuses (généralement des chapes en mortier). Ces structures sont souvent denses, et donc conduit la chaleur à travers les ponts thermiques intégrés qui apparaissent dans les zones où l'isolation thermique est affaiblie (les zones de jonctions entre les feuilles de polystyrène assemblés entre eux par collage, mal ajustement des coupes dans les zones où on prévoit des réservations).

1.4:Définition du projet et de ces objectifs

L'étude présentée dans ce mémoire fait partie d'un grand projet de LafargeHolcime relatif à l'isolation thermique, qui lui-même s'inscrit dans la continuité d'autres projets qui ont pour objectifs l'isolation thermique en utilisant des mousses minérales développées et brevetées par le Centre de Recherche mondial de LafargeHolcim situé à

Lyon, et qui peuvent avoir plusieurs types d'applications ; remplissage de blocs en béton, les toits-terrasses, les chapes...

L'objectif principal de ce travail se résume en la formulation d'un béton mousse de faible densité qui va être destiné à remplacer le système d'isolation par feuilles de polystyrènes sur les toitures (Figure 1.10), le matériau doit garantir une résistivité thermique comparable à la solution classique lorsqu'il est appliqué avec des épaisseurs moyennes de 15 cm, tout en assurant des résistances mécaniques meilleures.

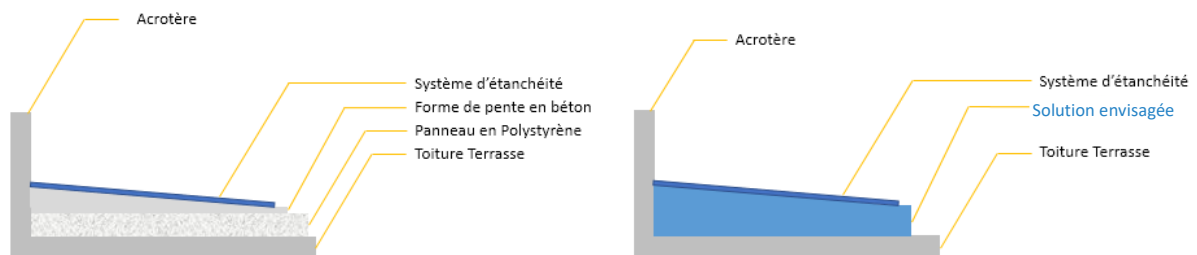


Figure 1.10: Schéma explicatif du système d'isolation envisagé

En effet, le travail a été proposé et réalisé au niveau du laboratoire de développement de la construction (CDL) de Lafarge. Premier laboratoire dédié au développement de nouveaux produits et solutions dans la construction, en Algérie et en Afrique (Implémenté en 2013), permettant de tester toutes les innovations du groupe LafargeHolcim pour l'Algérie, et développer de nouvelles solutions pour l'ensemble des besoins de la construction.

Chapitre 2

Etude Bibliographique sur les Bétons Légers

2.1: Introduction

Cette étude bibliographique aborde les bétons légers. Sa première partie est consacrée aux bétons légers obtenus par insertion de granulats de faible densité dans une suspension minérale, ces matériaux versatiles peuvent avoir des applications structurelles tout en assurant une isolation thermique répartie.

La deuxième partie de cette étude traite avec plus de détails les bétons mousse, connus aussi sous le nom de mousses minérales, obtenus par insertions d'occlusions gazeuses dans la matrice minérale, Cette catégorie de béton est appréciée par son caractère autonivelant et autoplaçant mais surtout pour son pouvoir isolant. Les constituants de tels matériaux et leurs méthodes de production seront listés dans un premier temps. Puis, on présentera les performances thermomécaniques du matériau, son comportement de retrait et les résultats de certaines études s'intéressant à sa microstructure.

Le béton léger peut être produit en remplaçant tout ou une partie des granulats standards par des matériaux légers [14]. Selon des méthodes de production, le béton léger peut être classé dans trois catégories : béton sans fines (en utilisant seulement des granulats grossiers ; cas des bétons caverneux²), béton de granulats légers (en utilisant des granulats légers dans le mélange) et béton aéré (en faisant introduire du gaz ; cas des bétons cellulaires et des bétons mousses) [15] (voir Figure 2.1).

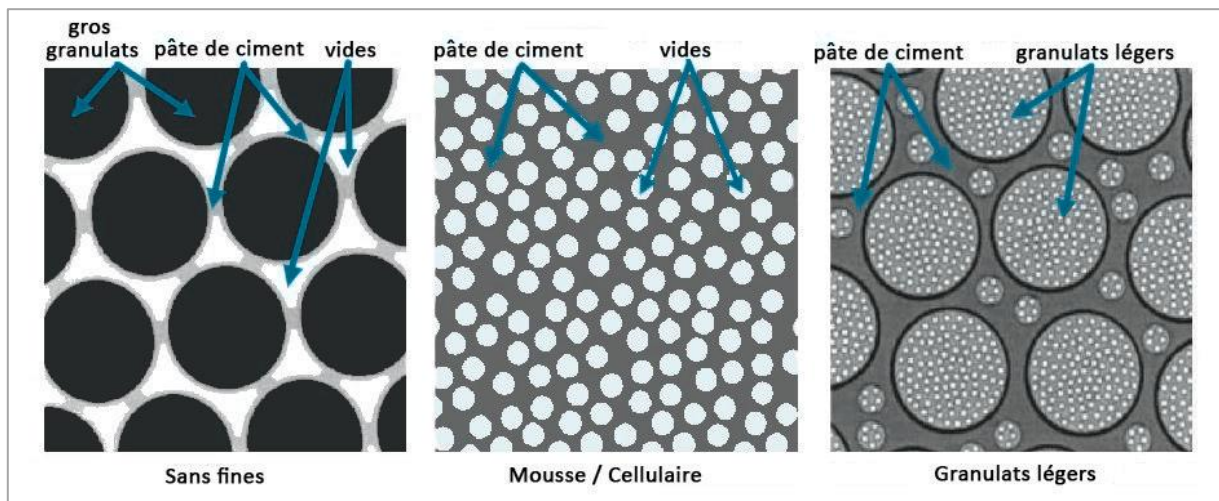


Figure 2.1: Les types basiques des bétons légers [50]

Les bétons légers se divisent en trois catégories de masse volumique. Le béton structurel de granulats légers ($1350 < \rho < 1850 \text{ kg/m}^3$) est utilisé comme élément structurel et

² Le **béton caverneux** ou béton drainant est un béton de ciment à structure ouverte permettant l'infiltration de l'eau de pluie. Le nom de ce béton provient des vides qu'il contient et qui ressemblent à des cavernes.

possède une résistance minimale à la compression de 17 MPa et une conductivité thermique comprise entre 0,40 et 0,70 W/(m.K). Le béton de résistance moyenne, comme son nom l'indique, possède des propriétés intermédiaires ($7 < R_c < 17$ MPa) en lien avec sa masse volumique ($800 < \rho < 1350$ kg/m³). Le béton léger de faible masse volumique ($300 < \rho < 800$ kg/m³) n'est pas utilisé comme élément structurel, mais est apprécié pour ses performances thermiques, $\lambda < 0,25$ W/(m.K) [15].

Au cours des dernières décennies, le béton léger a été principalement destiné pour des applications de remplissage, de remblai, d'isolation des fondations et des toits, d'isolation phonique et de jointoiment pour tunnels [16]. L'emploi du béton léger dépend principalement de la masse volumique du produit fini. Ses principales applications sont résumées dans le Tableau 2-1.

Tableau 2-1: Domaine d'utilisation du béton léger en fonction de sa masse volumique [17].

Masse volumique ρ (kg/m ³)	Domaine d'utilisation
300 - 600	Isolation thermique et phonique des toits et plafonds Isolation dans des blocs creux ou dans tout autre espace vide lorsque des propriétés isolantes importantes sont attendues
600 - 900	Mur préfabriqué et panneau pour cloisons, dalle pour faux plafonds, isolation thermique et phonique des chapes de bâtiments résidentiels à plusieurs niveaux. Remplissage divers
900 - 1200	Bloc de béton utilisé sur les derniers étages de bâtiments, ornementation architecturale, cloison, dalle de toit, chape.
1200 - 1800	Panneau préfabriqué de dimensions diverses (utilisations industrielle-commerciale). Béton de structure isolant.

2.2: Béton de granulats légers

La façon la plus simple de produire du béton léger est de remplacer une partie de ses constituants par des granulats légers ($\rho < 1100$ kg/m³) insérés dans la suspension minérale fraîche, De nombreux granulats naturels ou synthétiques peuvent être utilisés

pour obtenir du béton léger, la caractéristique commune de tels agrégats est leur faible densité en raison de leur porosité interne élevée [18]. Les masses volumiques sèches de divers agrégats légers sont données dans la Figure 2.2.

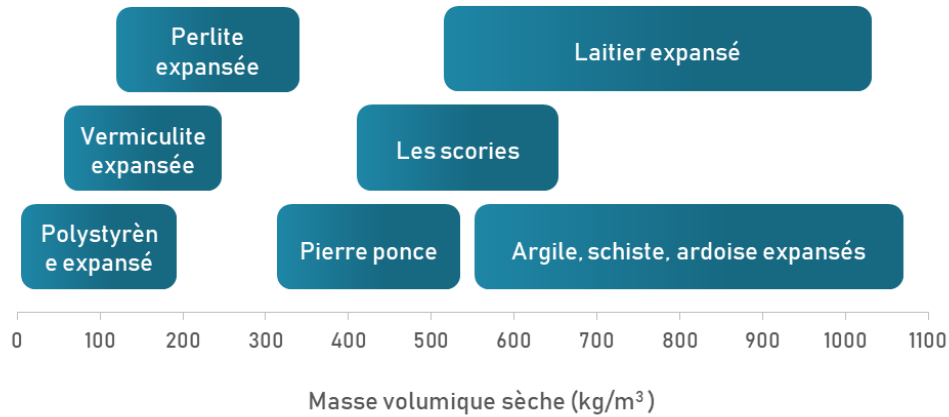


Figure 2.2: Masses volumiques sèches des différents agrégats légers [18].

La résistance des bétons de granulats légers dépend largement du type et du volume d'agrégats utilisés. Les agrégats très poreux situés du côté gauche de la Figure 2.2 sont faibles et, par conséquent, ils sont principalement utilisés pour la fabrication de béton isolant. De faibles rapports eau-ciment sont nécessaires pour obtenir une résistance suffisante dans les bétons légers structuraux. Cependant, une forte absorption (10% - 20%) des agrégats légers rend très difficile le calcul de la teneur exacte en eau de gâchage [18].

Couasnet [19] propose une classification des principaux bétons de granulats légers tout en indiquant la conductivité thermique associée, voir Tableau 2-2 (cité par [20]).

Tableau 2-2: Propriétés de bétons de granulats légers [19] [20].

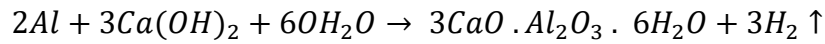
Matériau	ρ (kg/m ³)	λ (W/(m.K))	
		50 % HR	80 % HR
Béton à base de schiste expansé	1100	0,34	0,36
	1200	0,36	0,38
	1300	0,39	0,40
	1400	0,41	0,42
Béton avec granulats de pierre ponce	500	0,12	0,13
	700	0,17	0,18
	900	0,24	0,25
	1100	0,32	0,33

	1300	0,41	0,43
	400	0,10	0,10
	600	0,16	0,17
	800	0,23	0,24
Béton d'argile expansé	1000	0,31	0,32
	1200	0,40	0,42
	1400	0,50	0,52
	1000	0,18	0,20
Béton de laitier de haut-fourneau	1200	0,25	0,27
	1400	0,36	0,39
	1600	0,50	0,53
	500	0,16	0,17
Béton de polystyrène expansé	700	0,23	0,25
	900	0,28	0,32
	1500	0,52	
Béton de pouzzolane ou de laitier expansé	1300	0,44	
	1100	0,35	
Béton de cendres volantes frittées (ρ granulats = 650 kg/m ³)	1100	0,35	
	1000	0,27	
Béton de ponce naturelle (ρ granulats = 600 kg/m ³)	1100	0,46	
	1500	0,85	
	1300	0,70	
	1100	0,46	
Béton d'argile expansée	900	0,33	
	700	0,25	
	700	0,31	
Béton de perlite ou de vermiculite	500	0,24	
	550	0,16	
Béton de bois	550	0,16	

2.3: Bétons mousse et cellulaire

2.3.1: Voie chimique (béton cellulaire)

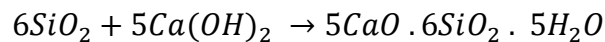
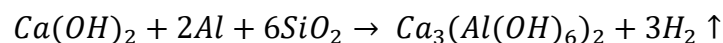
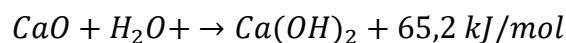
La production du béton cellulaire commence par l'introduction des bulles de gaz dans un mortier à travers l'ajout d'une faible quantité de poudre métallique (environ 0.2% de la masse du ciment). Cette dernière va réagir avec l'eau et les hydroxydes dans un milieu alcalin et va former des bulles de gaz se dilatant dans le béton. Ce premier est souvent connu comme le béton gazeux.



La poudre d'aluminium peut être remplacée par d'autres métaux, à savoir le Silicium ou le Zinc. Elle joue le rôle d'un agent expansif suivant une réaction analogue. La pâte du ciment est caractérisée par une consistance suffisante, et cela pour empêcher les bulles de remonter à la surface. A noter que le béton gaz peut contenir des granulats. Cette technique de fabrication peut entraîner de l'anisotropie. Ce phénomène a été étudié par Cabrillac et Al (cité dans [21]), en réalisant différentes matrices de bétons et bétons aérés non-autoclavés. De la chaux et du sable, en proportion variable, sont ajoutés au ciment Portland ordinaire ainsi qu'une quantité variable en agent d'expansion, l'aluminium. Tout d'abord, l'ajout de chaux et de sable tend à diminuer la porosité quels que soient le dosage en ciment et la quantité d'aluminium tandis qu'une augmentation du dosage en aluminium augmente la porosité [21].

Le béton cellulaire autoclavé se compose principalement d'un mélange stable quartzeux $\pm 44\%$, de ciment $\pm 3\%$, de chaux $\pm 12\%$, d'eau $\pm 41\%$ et une faible quantité de la poudre d'aluminium $\pm 0,06\%$. Ces derniers peuvent varier légèrement, mais d'une façon assez précise, en fonction de la masse volumique souhaitée. Après que le mélange soit fait, la suspension minérale est coulée dans des moules partiellement remplis, et cela pour éviter tout débordement de la pâte lors de la phase d'expansion où son volume se multiplie par cinq. Ensuite, les panneaux sont découpés et mis dans un four (Ayant une pression de 10 bars et une Température de 180°C) pour un traitement thermique en autoclave. Une réaction chimique aura lieu permettant la liaison du sable avec la chaux, formant ainsi, des cristaux (Tobemorite) [21].

Le processus se traduit par l'ensemble des réactions chimiques suivantes :



Le béton cellulaire est un matériau entièrement différent du béton dans lequel le sable est exclu de la réaction chimique et par conséquent la formation des cristaux. C'est le traitement thermique en autoclave qui confère au béton cellulaire ses propriétés définitives [21].

La structure est constituée de millions de cellules ($0,05 < d_{\text{pore}} < 3 \text{ mm}$) qui confèrent au matériau ses propriétés isolantes ($0,13 < \lambda < 0,27 \text{ W/(m.K)}$). Enfermé de façon homogène dans la matrice, l'air joue le rôle d'isolant parfait. La matrice rigide permet au béton cellulaire d'être utilisé comme un matériau partiellement porteur ($2 < R_c < 8 \text{ MPa}$).

Cependant, la phase d'autoclavage, à haute température et haute pression, augmente significativement la consommation énergétique de production [21].

L'énergie grise associée est de 340 kWh/m³, ce qui correspond à une émission de 168 kg CO₂/m³. Cette énergie grise est proche de celle d'un béton classique (≈ 500 kWh/m³ selon Couasnet) (citée dans [20]) alors que la masse volumique du béton cellulaire est de 2 à 4 fois inférieure ($300 < \rho < 1000$ kg/m³). Jerman et al relèvent une très grande dépendance de la conductivité thermique à la teneur en eau du béton cellulaire. La conductivité est multipliée par six lorsque le matériau passe de l'état sec à l'état d'humidité maximale [21].

2.3.2: Voie mécanique (béton mousse)

Le béton mousse est un matériau qui contient plus de 20% en volume d'air, cela est obtenu par l'incorporation d'une mousse dite « mousse préformée » ou d'un surfactant moussant dans une base cimentaire.

2.3.2.1: La composition du béton mousse

2.3.2.1.1: La mousse aqueuse

Il existe deux méthodes d'introduction de la mousse pour la production de ce type de béton. La méthode par mousse préformée repose sur l'ajout d'une mousse aqueuse légère stable à un coulis minéral produit séparément. La méthode par malaxage direct consiste en l'ajout d'agents moussants au sein de la suspension minérale qui permet la création d'une mousse minérale stable au cours de l'opération de malaxage du mélange. La méthode mousse préformée est généralement préférée à la méthode de malaxage rapide, car elle nécessite moins d'agents moussants (surfactants) donc le procédé de formation de bulles d'air le plus économique et contrôlable. De plus, sa mise en place est facile sur chantier lors de la construction [22].

La mousse préformée comprend un agent moussant aqueux et de l'air. L'agent moussant est important car il confère au béton mousse ses propriétés finales. Si la structure de la mousse s'effondre, la mousse minérale peut s'effondrer en laissant un mélange de base très dense. La qualité de la mousse est affectée par sa densité, le facteur de dilution de l'agent, le processus de fabrication de la mousse et le processus avec lequel l'ajout et de mélange avec le coulis minéral se fait. La mousse doit pouvoir rester stable et ne pas s'effondrer pendant le pompage, la mise en place et le durcissement [23].

Mousses sèches / humides

Les mousses préformées peuvent être classées comme sèches ou humides selon la teneur en liquide, qui peut être représentée par la fraction volumique liquide ϕ . Cela va de

beaucoup moins de 1% à environ 30%. Les ingénieurs appellent la fraction gazeuse ($1-\phi$) la qualité de la mousse. À chaque extrême (les limites sèches et humides) les bulles se réunissent pour former une structure qui ressemble à l'un des paradigmes idéalisés classiques de la morphologie de la nature : la division de l'espace en cellules dans la limite sèche et le rapprochement des sphères dans la limite humide [24].

La mousse humide est produite en pulvérisant une solution d'agent moussant (généralement synthétique) et de l'eau à partir d'une maille fine. Cette action provoque une chute de pression à travers la maille permettant à l'air d'être aspiré de l'atmosphère pour égaliser la pression. Cet équilibre de pression provoque l'expansion de la solution dans ce qui peut être décrit comme une mousse d'aspect similaire à la mousse à bain moussant, avec une taille de bulle allant de 2 à 5 mm. La mousse a une structure de bulles plus "lâche" et, bien que relativement stable, elle n'est pas recommandée pour la production de béton mousse de faible densité (masse volumique inférieure à 1100 kg/m^3). Il ne convient pas non plus pour pomper de longues distances ou pour couler à grande profondeur [25].

La mousse sèche est produite en forçant une solution similaire d'agent moussant et d'eau à travers une série de restriction à haute densité tout en forçant en même temps l'air comprimé dans une chambre de mélange. L'action de forcer cet air pressurisé dans la solution dilate la solution à une mousse épaisse et serrée, semblable en apparence à la mousse de rasage. La taille des bulles est typiquement inférieure à 1 mm de diamètre et de taille égale. Ce type de mousse est extrêmement stable et cette propriété donnée au béton mousse lorsque la mousse est mélangée avec le coulis de base [25].

Cette stabilité est particulièrement importante lorsque le rapport de la mousse aux matériaux de base est supérieur à 0,50. Lorsque la mousse devient le constituant dominant dans le mélange, elle doit conserver sa stabilité pour éviter l'affaissement pendant le pompage, le coulage, la prise...etc. Un béton mousse produit en utilisant une mousse sèche peut être pompé davantage, versé plus profondément et présente de meilleures caractéristiques d'écoulement qu'un mélange similaire produit avec une mousse humide [25].

Agents moussants (Les tensioactifs)

Pour fabriquer une mousse, il faut disposer d'un liquide, d'un gaz et d'une certaine quantité de tensioactifs. On appelle tensioactif, surfactant, ou encore agent de surface, les molécules modifiant les propriétés des interfaces. On qualifie ces composés d'amphiphiles, ces molécules comportant une partie hydrophile (ayant une affinité pour l'eau) et une autre hydrophobe (n'ayant pas d'affinité pour l'eau). C'est grâce à la présence de ces deux parties antagonistes que ces molécules s'adsorbent aux interfaces et en modifient les propriétés [26].

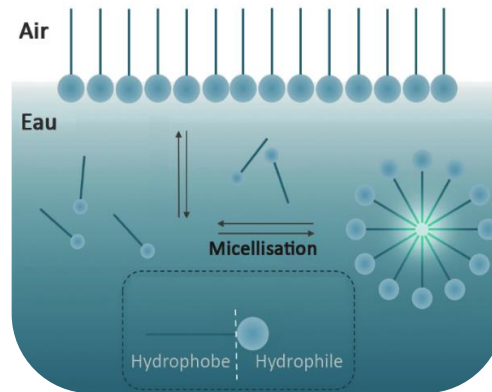


Figure 2.3: Schématisation de processus de formation des micelles

Ces composés peuvent être de différents types, en fonction de la polarité de la tête hydrophile : anionique, cationique, amphotère ou non-ionique. Ces molécules tendent toujours à s'adsorber aux interfaces (liquide-gaz ou liquide/liquide) jusqu'à ce que celles-ci soient saturées. Puis, de manière à minimiser le contact des queues hydrophobe avec l'eau, elles s'assemblent en micelles (Figure 2.3) [26]. La concentration pour laquelle l'interface est saturée et les micelles commencent à se former est appelée Concentration Micellaire Critique ou CMC. Cette grandeur dépend bien entendu du tensioactif utilisé et est exprimée en $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ou en mM . A titre indicatif, pour le SDS (Sodium Dodecyl Sulfate), tensioactif anionique très courant, elle vaut $2.4 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ et pour le TTAB (tetradecyltriméthylammonium bromide), tensioactif cationique, $1.2 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ [26]. Une faible charge électrique ; cas des composés avec une tête hydrophile non-ionique peut donner une plus grande stabilité au mélange de béton mousse [26].

Un tensioactif diminue la tension de surface (ou tension superficielle) d'un système. Cette grandeur notée γ s'exprime en $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ et correspond à une force par unité de longueur, exercée par le liquide sur la paroi qui le limite et tendant à réduire la surface du liquide. Cela correspond par ailleurs à l'énergie nécessaire pour maintenir des molécules à la surface du liquide. Ainsi, un liquide cherchera toujours naturellement à diminuer sa surface au maximum. L'eau a une tension de surface de $72 \text{ mN}\cdot\text{m}^{-1}$. Dès que l'on ajoute des tensioactifs γ diminue fortement. Les molécules présentes à la surface contrebalancent en effet la tendance à la diminution de la taille de l'interface [26].

Des tensioactifs synthétiques ou à base de protéines peuvent être utilisés pour produire de la mousse. Ces agents sont formulés pour produire des bulles d'air stables et capables de résister aux forces physiques et chimiques imposées dans le processus de fabrication du béton mousse.

Les tensioactifs à base de protéines sont les premiers qui ont été utilisés. Il s'agissait de matériaux relativement bruts dérivés de résidus de carcasses d'animaux hydrolysés qui

ont été soumis à une biodégradation. Cependant, les tensioactifs à base de protéines ont été développés pour être hautement raffinés et stabilisés. La mousse produite est à cellules fermées, stable et a une texture ferme qui se fond facilement dans le coulis de ciment avec une faible dégradation [27] (cité par [28]). Les surfactants à base de protéines produisent du béton mousse avec un rapport résistance / densité d'environ 50% à 100% supérieur à celui des tensioactifs synthétiques [29] (cité par [28]).

Les surfactants synthétiques sont stables, faciles à formuler et constants dans leurs performances. Cependant, la taille des bulles est plus grande et les cellules sont plus ouvertes en raison d'une expansion plus élevée. Ces résultats se traduisent par un béton mousse de plus faibles résistances par rapport au béton mousse produit avec des tensioactifs à base de protéines [27] (cité par [28]).

Stabilité de la mousse aqueuse

Au cours de sa vie, la mousse est exposée à des phénomènes et des mécanismes qui causes son effondrement. Lorsque des bulles se forment et se rapprochent, des différences de pression et de tension de surface se produisent dans deux zones distinctes de ces bulles.

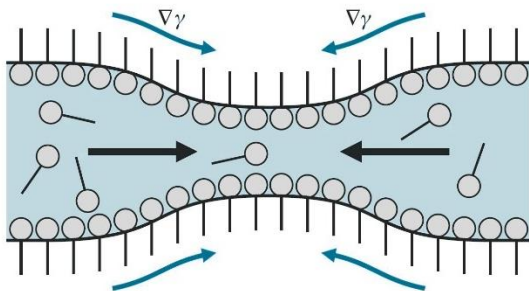


Figure 2.5: Effet Gibbs-Marangoni [30]

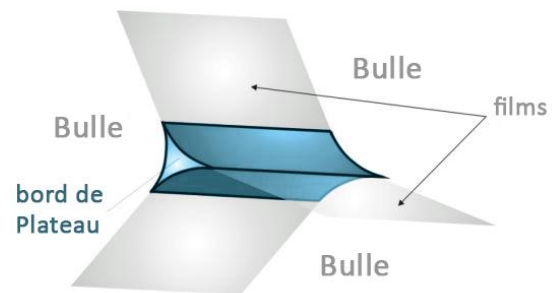


Figure 2.4: contacte entre les bulles

À la frontière aux bords de Plateau, la tension de surface est inférieure à celle au milieu du film liquide, où la tension superficielle est plus élevée à cause d'une faible adsorption superficielle du surfactant, c'est l'effet Gibbs [30] (Figure 2.5). Ce gradient de tension superficielle entre le film (faible adsorption) et les bords (adsorption plus forte) induit une migration des molécules surfactives de la couche adsorbée vers la zone étirée du film, lequel entraîne le liquide sous-jacent vers la zone étirée, c'est l'effet Marangoni [30] (Figure 2.5). En conséquence, l'amincissement s'arrête. Ces deux phénomènes garantissent la survie de la mousse durant les premiers instants.

Après un certain temps, des phénomènes vont s'opposer à ces deux effets stabilisants. D'abord, à cause des forces gravitationnelles, le drainage de liquide dans le réseau constitué des bords de plateau, (Figure 2.4), se produit vers le bas de la mousse ce qui

cause l'amincissement des films séparant les bulles d'airs. Cet amincissement est renforcé par un autre mécanisme [30].

A l'interface gaz-liquide, la différence de pression (ΔP) et la tension de surface (γ à un élément de la surface est exprimée selon la loi de Laplace :

$$\Delta P = \gamma \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{r} \right)$$

ΔP : différence de pression à travers une interface incurvée.

γ : tension superficielle de la solution.

R, r : rayons de courbure principaux de la surface (bords de plateau et régions moins incurvées de film).

Les différences de courbure (R, r) provoquent un drainage du liquide des film vers les bordures du plateau pour rétablir le déséquilibre de la pression du liquide. Le drainage liquide par gravité, lorsque la mousse est formée pour la première fois, tandis que le drainage par tension de surface se produit lorsque les films sont minces.

Aussi, du fait de la loi de Laplace, la pression dans une bulle est inférieure à la pression dans une autre bulle adjacente ayant un diamètre plus petit, cette différence de pression provoque la diffusion de l'air à travers le film liquide séparant les deux bulles. Cette diffusion gazeuse entre les bulles appelé aussi mûrissement ou grossissement (Coarsening), fait que les petites bulles tendent à disparaître au profit des grandes [30].

Ces phénomènes, et d'autres qui ont une relation avec la chimie des surfactifs, causent l'amincissement des films séparant les bulles d'airs qui continuent jusqu'à ce qu'une épaisseur de film critique soit atteinte à 50-100 Å où le film se rompt spontanément, quand il est incapable de résister à la pression exercée [30].

2.3.2.1.2: Ciment

Le ciment Portland ordinaire est le liant le plus couramment utilisé pour produire le béton mousse (Ravindra et al). La teneur totale en ciment se situe généralement entre 300 et 400 kg/m³. Une teneur en ciment allant jusqu'à 500 kg/m³ a été utilisée pour atteindre des résistances supérieures, au-dessus desquelles le gain de résistance obtenu a été jugé minimal (Jones, 2000).

2.3.2.1.3: Eau

L'eau potable doit être utilisée dans le béton mousse, en particulier lorsque des agents moussants à base de protéines sont utilisés pour produire la mousse aqueuse. En effet, la contamination organique peut avoir un effet négatif sur la qualité de la mousse, d'où

le béton produit [31]. De même, il est essentiel pour la stabilité du béton mousse d'utiliser de l'eau de gâchage non acide ou chaude (60 ° C) car ces conditions présentent un taux de chute plus élevé de la mousse préformée [32].

2.3.2.1.4: Sable

L'utilisation de sable d'une taille maximale de 2 mm est une pratique courante qui donne des forces de béton plus élevées que le sable de 5 mm. Les granulats grossiers ne peuvent pas être utilisés dans le béton mousse car la structure à bulles fines ne peut pas les supporter, ce qui entraîne une ségrégation [28]. Il est suggéré d'utiliser du sable fin dans des mélanges ayant des masses volumiques sèches jusqu'à 600 kg/m³ et de le remplacer par des fillers telles que des cendres volantes grossières à des densités de béton plus faibles [27] (citée par [28]). Le sable n'est pas préoccupant pour produire bétons mousse de faibles densités (masse volumique sèche égale à 300 kg/m³ ou moins).

2.3.2.1.5: Les Ajouts

Des ajouts cimentaires peuvent être utilisés diverses raisons : réduire les coûts de production, modifier la consistance de la pâte, diminuer le temps de prise, augmenter les performances au jeune âge [33]

Les cendres volantes

Les cendres volantes (Fly Ash) ont été utilisées comme composant alternatif du béton mousse. Par exemple, elles peuvent être ajoutée à des mélanges de béton mousse comme remplacement partiel de ciment (cendres volantes fines) et comme fillers (cendres volantes grossières) pour remplacer les agrégats fins.

Lorsque des cendres volantes fines ont été ajoutées à des taux allant jusqu'à 80% en masse, on a constaté que cela réduisait les coûts, améliorerait la consistance et la stabilité du mélange et contribuait à l'augmentation de la résistance à long terme. L'avantage additionnel de l'utilisation des cendres volantes fines était qu'elles réduisent la chaleur d'hydratation [31].

Le calcaire

Xingang Yu et al ont étudié l'effet du calcaire sur la résistance mécanique du béton mousse de faible densité ; Du calcaire fin pulvérisé est ajouté en proportions variable à un ciment portland 42,5 R. Les résultats expérimentaux révèlent que l'augmentation de la teneur en calcaire de 0% à 10% améliore nettement les résistances à la compression et à la flexion du béton mousse, tandis qu'une teneur en calcaire qui excède la limite de 10% réduit considérablement la résistance du béton de mousse [34] (voir Figure 2.6).

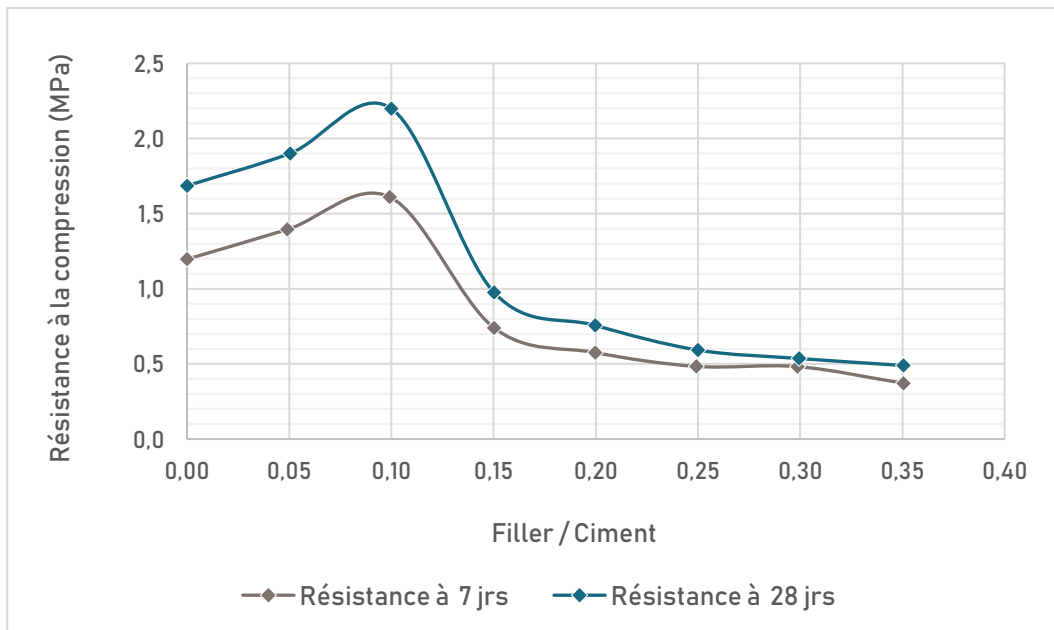


Figure 2.6: L'influence de la teneur en ajouts calcaire sur la résistance en compression [34]

La fumée de silice

La fumée de silice a été utilisée dans le béton mousse en pourcentage de 10% en masse de ciment pour améliorer la résistance à la compression [31]. L'utilisation de la fumée de silice comme ajout diminue la conductivité thermique du béton à granulats légers [35], ce qui peut améliorer encore l'excellente performance d'isolation thermique du béton mousse.

2.3.2.2: Méthode de formulation

Il n'y a pas de méthode standard pour déterminer les proportions de mélange de béton mousse. Une approche sur la base volumétrique est couramment utilisée pour concevoir le mélange en visant une masse volumique fraîche cible de béton mousse [31], car il est difficile de concevoir pour la densité sèche cible, avec des valeurs de désorption de 50 à 200 kg/m³ de béton mousse [31] [36].

L'approche consiste à déterminer la quantité de mousse nécessaire pour atteindre la masse volumique fraîche cible en utilisant les teneurs en ciment et en agrégat fin, le rapport E/C et la densité spécifique de tous les constituants correspondants y compris la mousse.

Les caractéristiques de béton mousse dépendent fortement de sa densité, qu'il s'agisse de densité sèche ou fraîche. Par conséquent, une tolérance de ± 50 kg/m³ de la masse

volumique fraîche cible est généralement acceptable, ce qui est également appliqué dans la pratique industrielle pour la production de béton cellulaire [23] [31]. De plus, les instabilités dues à l'effondrement de la mousse entraînent une augmentation de la masse volumique cible qui peut entraîner des altérations des propriétés du béton résultant [32]. Par conséquent, il est essentiel de maintenir la stabilité du mélange, d'où la masse volumique cible dans les limites de tolérance afin d'obtenir les propriétés du béton mousse envisagées.

2.3.2.3: La stabilité de béton mousse à l'état frais

Nambiar et Ramamurthy définissent l'état de stabilité du béton mousse comme étant le rapport entre la masse volumique fraîche ciblée et celle mesurée, dans les limites d'acceptation de ($\pm 50 \text{ kg/m}^3$). Plus ce rapport se rapproche de l'unité meilleure est la stabilité du béton mousse [37]. C'est la définition qu'on utilisera pour décrire la stabilité du béton mousse.

Les principaux facteurs affectant la stabilité du mélange comprennent principalement les conditions environnementales, les matériaux utilisés et le processus de production ainsi que les facteurs dépendant du temps. Brady et al ont énuméré les facteurs environnementaux externes influençant la stabilité du béton mousse comme la vibration, le vent, l'évaporation et la température (cité dans [31]). D'un autre côté, beaucoup d'autres considéraient la qualité de la mousse utilisée comme cause dominante d'instabilité du mélange [25] [37] [32].

Aldridge souligné l'importance de la qualité de la mousse aqueuse pour maintenir un mélange stable tout au long du processus de mélange, de pompage et de coulage (bulles stables) et le risque d'instabilité lorsque la teneur en mousse comprend plus de 50% du mélange [25]. En accord avec Aldridge, McCarthy et mohammad rapportent que pour un type donné de constituants, les mélanges deviennent plus enclins à l'instabilité à mesure que la densité de béton mousse diminue [29] [32]. Plus spécifiquement, Mohammad a trouvé qu'il était impossible de produire des bétons mousse stables avec des masse volumique inférieures à 400 kg/m^3 en utilisant un ciment portland [32].

Le rapport E/C joue un rôle essentiel dans la stabilité du béton mousse, il doit être choisi en tenant compte du type des constituants utilisés et de leurs caractéristiques afin de garantir la maniabilité requise du mélange de base mais aussi la stabilité du mixe final [33]. Une quantité insuffisante d'eau dans le mélange a tendance à provoquer l'extraction de l'eau de la mousse, entraînant la désintégration de la mousse, d'où un effondrement potentiel du mélange. En revanche, l'excès d'eau dans le mélange favorise la ségrégation qui peut également entraîner des effondrements et un rétrécissement du séchage [25].

2.3.2.4: Propriétés thermiques des bétons mousses

Tableau 2-3: : Propriétés des bétons mousses [25]

Masse volumique sèche (kg/m ³)	Résistance en compression (MPa)	Conductivité thermique W/(m.K)	Retrait %
400	0,5 – 1,0	0,1	0.3 – 0.35
600	1,0 – 1,5	0,11	0.22 – 0.25
800	1,5 – 2,0	0,17 - 0,23	0.20 – 0.22
1000	2,5 – 3,0	0,23 – 0,30	0.18 – 0.15
1200	4,5 – 5,5	0,38 – 0,40	0.11 – 0.09
1400	6,0 – 8,0	0.50 – 0.55	0.09 – 0.07
1600	7,5 – 10,0	0,62 – 0,66	0.07 – 0.06

Les résultats des études de recherche concernant les bétons mousse ont été résumés par D Alderidge [25]. La conductivité thermique se situe entre 0,1 et 0,66 W/(m.K) pour des masses volumiques variant de 400 à 1600 kg/m³ (Tableau 2-3). Un béton mousse de masse volumique 1000 kg/m³ est six fois moins conducteur thermiquement qu'un béton standard. Les travaux de recherche de CNERIB 1994 ont mené à la production des bétons mousse de faible densité sans granulats (mousse minérale), avec des conductivités thermiques plus ou moins proportionnelles aux densités, Les valeurs obtenues vont de 0,09 à 0,124 W/(m.K) pour des masses volumiques comprises entre 300 et 440kg/m³ [36].

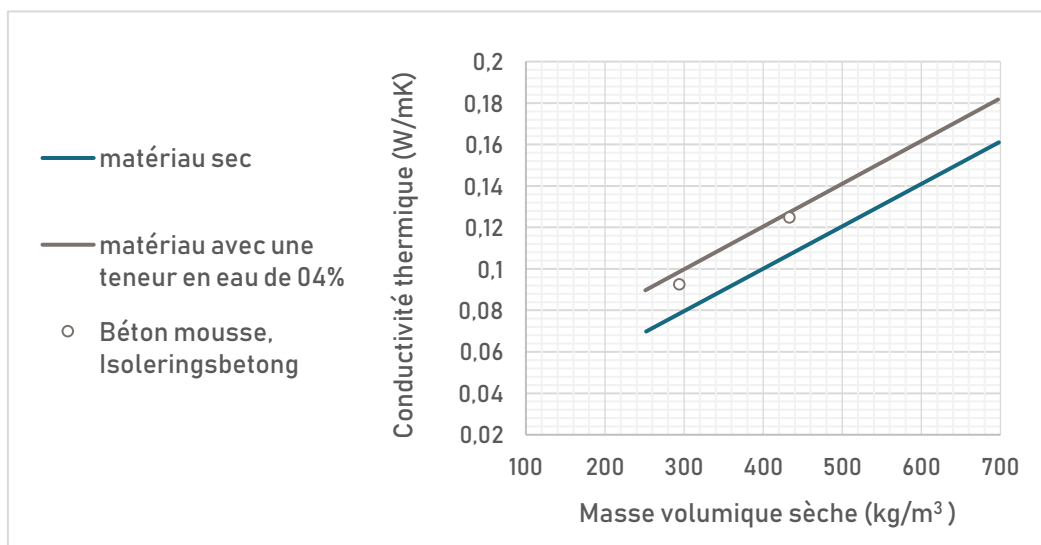


Figure 2.7: Conductivité thermique en fonction de la densité du béton mousse fabriqué en Algérie [36]

2.3.2.5: Propriétés mécaniques des bétons mous

La résistance à la compression du béton mousse diminue avec la diminution de sa masse. Les valeurs typiques de résistance à la compression pour les bétons mousse ayant des masses volumiques sèches jusqu'à 400 kg/m^3 sont indiquées dans le Tableau 2-3. Les principaux paramètres affectant la résistance à la compression du béton mousse sont la taille et la forme des échantillons, le type de constituants, la teneur en eau, l'âge et la méthode de cure, les rapports ciment/sable et eau/ciment, le type d'agent moussant et sable ainsi que la distribution granulaire du sable [33]. De plus, on a constaté que l'augmentation du diamètre des vides du béton mousse réduisait sa résistance mécanique [38].

Les travaux de recherche de CNERIB & Lund University montrent que les meilleures résistances en compression de bétons mousse sans granulats sont obtenues en utilisant le ciment à haute résistance initiale et le ciment d'injection, exception faite pour une résistance bien plus forte pour le ciment d'injection pour une masse volumique plus forte (540 kg/m^3) (voir Figure 2.8). Cependant, le ciment de basse résistance initiale a donné des résistances bien plus basses que les autres types [36].

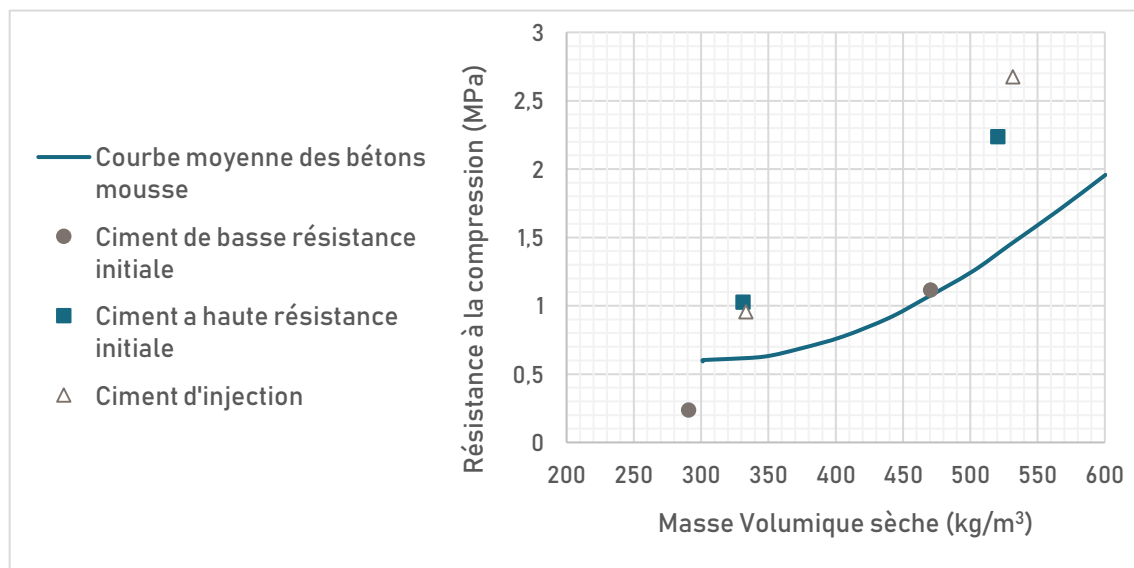


Figure 2.8: Conductivité thermique en fonction de la densité du béton mousse (CNERIB 1993 [36])

2.3.2.6: Retrait de séchage

Le béton mousse présente un retrait de séchage jusqu'à 10 fois supérieur à celui du béton standard en raison du manque d'agrégats dans le béton [33]. Les valeurs plus élevées du béton mousse peuvent aussi être attribuées à sa teneur en ciment relativement élevée et à sa forte teneur en eau [33]. La quantité de retrait de séchage tend à augmenter avec

l'augmentation de la teneur en mousse, c'est-à-dire avec une densité décroissante du béton ce qui correspond bien au béton ordinaire à haute teneur en eau et en air qui provoquent un plus grand retrait (Tableau 2-3) [25].

Le retrait de séchage peut être réduit en remplaçant partiellement le ciment portland par les cendres volantes, en ajoutant du sable et, ou, en ajoutant un agrégat léger au mélange, ou encore, en diminuant le rapport E/C (à environ 0,45) mais en conservant sa consistance par l'utilisation d'un superplastifiant [31], le rétrécissement se produit généralement dans les premiers 20 jours.

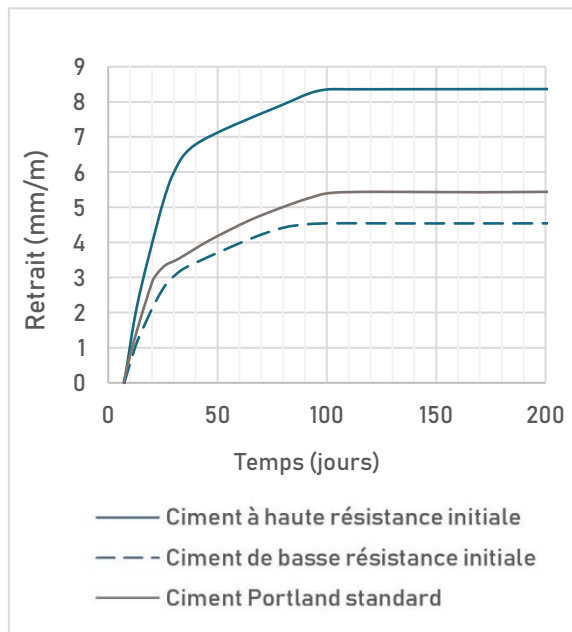


Figure 2.10: Retrait de béton mousse, masse volumique cible 500 kg/m³ [36]

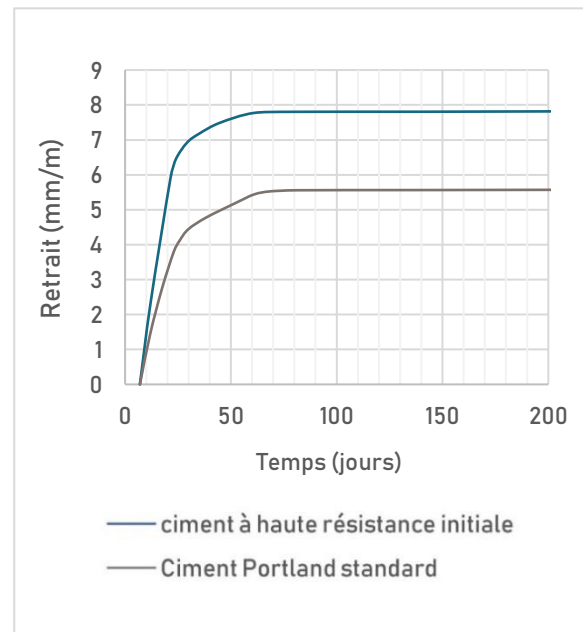


Figure 2.9: Retrait de béton mousse, masse volumique cible 300 kg/m³ [36]

Le retrait du béton mousse varie largement en fonction du type de ciment. Les ciments à haute résistance initiale donnent des retraits beaucoup plus importants que ceux des ciments standards et presque le double de ceux des ciments de basse résistance initiale (Figure 2.10). Cela pourrait être expliqué par le haut degré d'hydratation des ciments à haute résistance initiale qui ont une surface spécifique plus grande. Ces résultats montrent aussi que l'effet de la densité du béton mousse est minime sur la valeur du retrait, que ce soit pour les ciment standards ou pour les ciments à haute résistance initiale [36] (voir Figure 2.9).

2.3.2.7: La microstructure des vides

En raison de sa forte porosité, les propriétés mécaniques, physiques et de durabilité du béton mousse doivent être contrôlées principalement par la nature de ses pores, leur taille et distribution. Selon Visagie et Kearsley, la porosité, la perméabilité et la distribution de la taille des pores influent sur la résistance mécanique et la durabilité de béton mousse tandis que ces propriétés mécaniques sont principalement influencées par la distribution des pores dans l'ensemble durci [39].

Les cendres volantes ont tendance à réduire les diamètres des vides d'air lorsqu'elles sont utilisées comme ciment et/ou sable [32]. De même, Nambiar et Ramamurthy [38] ont signalé l'influence du remplacement du sable par des cendres volantes sur la réduction de la taille des vides d'air et l'obtention d'une distribution plus uniforme (voir Figure 2.11). Ce résultat a été justifié par la capacité des matériaux plus fins à recouvrir les bulles empêchant leur fusion.

La quantité de mousse utilisée a aussi son effet sur la microstructure ; l'augmentation du diamètre des vides et de leur nombre avec une densité décroissante (plus de mousse) a été signalée par Nambiar et Ramamurthy [38], cet accroissement est associé à une distribution moins uniforme des vides d'air.

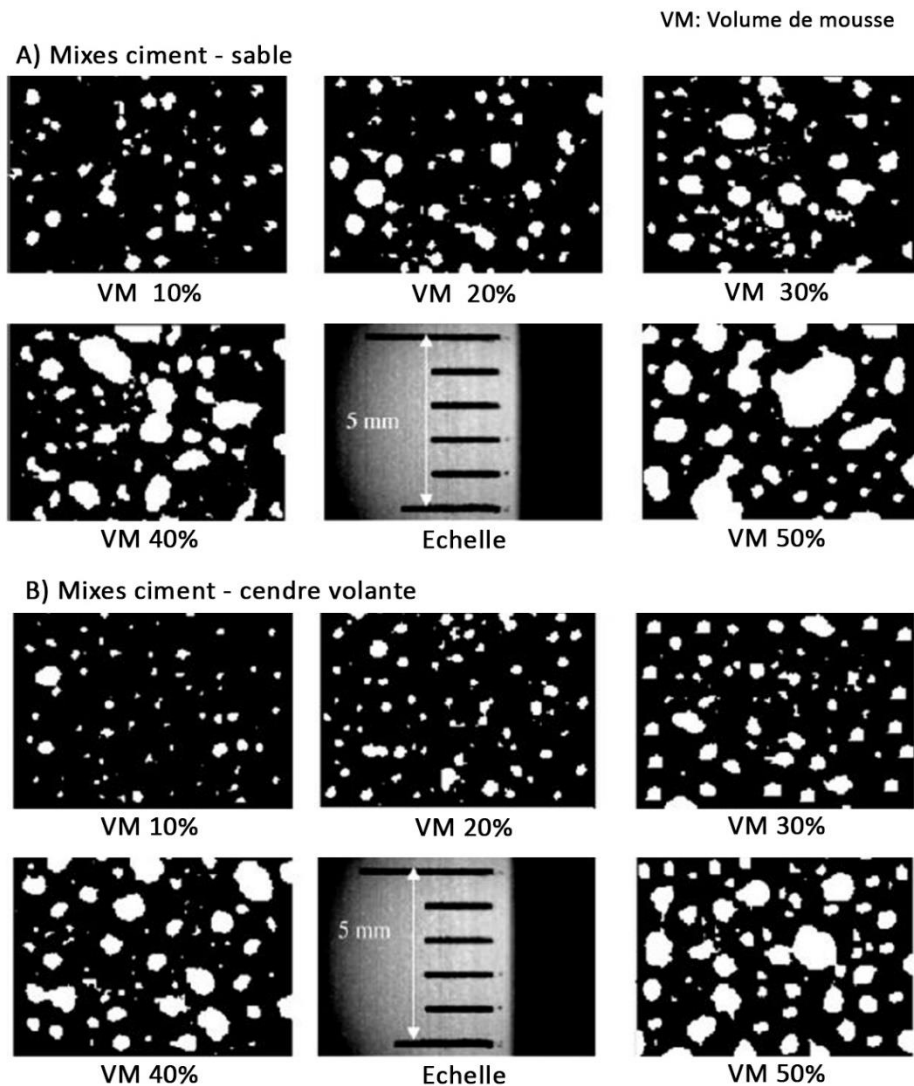


Figure 2.11: images binaires typiques de différentes densités de béton de mousse et combinaisons de matériaux [38]

2.4: Conclusion

Ce chapitre a résumé de manière exhaustive les études précédentes sur le béton mousse tout en identifiant les paramètres clés influençant sa stabilité et ses performances thermomécaniques. La qualité ou la stabilité de la mousse aqueuse est le premier paramètre affectant la stabilité de béton mousse à son état frais, elle lui confère ses propriétés. Une forte teneur en mousse aqueuse augmente aussi le risque d'instabilité du mélange, cela est procurant dans le cas des bétons mousse ultralégers (masses volumiques inférieures à 400 kg/m^3). Les principaux paramètres affectant la résistance mécanique du béton mousse sont la densité, le rapport ciment-sable, le type de ciment, sa finesse et sa teneur, les granulats, la taille et la distribution des pores, le type de tensioactifs et le régime de cure.

Les performances thermiques de béton mousse sont fortement influencées par sa densité, sa porosité (quantité d'air à l'intérieur) ; l'influence de la composition de sa matrice est négligeable.

Par conséquent, comme premier objectif, on tentera d'éviter les problèmes d'instabilité des bétons mousse à ultra-basse densité en se concentrant sur les facteurs cités précédemment. Une fois ce but atteint, les caractéristiques et les performances de béton mousse seront évaluées pour sélectionner la meilleure formulation, et fournir des informations sur le produit final destiné pour l'isolation thermique des toitures.

Chapitre 3

Etude de Formulation et d'Optimisation

3.1: Introduction

Pour produire un béton mousse, il convient tout d'abord de comprendre les conditions de sa stabilité qui sont en relation avec la mousse aqueuse qui elle-même doit être stable, mais aussi de bien connaître les constituants de sa matrice minérale afin de maîtriser ses performances mécaniques.

Ce chapitre parle dans sa première partie de la première formulation de béton mousse qui est faite à base d'un ciment blanc. Ensuite, la deuxième partie sera dédiée à une formulation optimisée basée sur l'utilisation des fillers calcaires dans la phase solide. Pour chacune des formulations, les résultats des essais de caractérisation des constituants, ainsi que les essais d'identifications des performances thermomécaniques et du comportement au retrait des bétons mousse produits seront présentés séparément.

3.2: Béton mousse de ciment sans ajout

3.2.1: Matériaux et caractérisation

Dans cette première étude, le béton mousse est produit à partir d'un ciment blanc portland et une mousse aqueuse protéique, suivant le procédé de la mousse préformée. Nous présenterons dans ce qui suit les résultats des essais de caractérisations de ces constituants.

3.2.1.1: Ciment

Un ciment blanc Portland CPJ - CEM 1 52,5 R de Lafarge a été utilisé pour la confection de notre béton mousse (mousse minérale). C'est un ciment à hautes résistances initiales et finales, issu du broyage d'un clinker blanc qui représente 97% de sa composition. Le clinker contient au moins 50% de silicates de calcium C3S et environ 9% d'aluminates de calcium C3A.

3.2.1.1.1: Essais de flexion et compression

Ces essais ont été réalisés selon la méthode décrite par la norme Algérienne [40], afin de définir la classe vraie de résistance du liant à 28 jours.

Préparation des éprouvettes

La détermination des résistances mécaniques d'un ciment se fait sur éprouvettes prismatiques 40×40×160 mm en mortier d'essai composé "d'une partie" (en masse) de ciment (450g) et de "trois parties" (en masse) de sable normalisé (1350g), avec un rapport E/C de 0,5 (225 ml d'eau).

Afin de préparer la pâte de mortier, l'eau est versée dans le récipient du malaxeur suivie du ciment puis le malaxeur est mis en marche à vitesse lente pendant 30 secondes. Le sable est versé progressivement au cours des 30 secondes qui suivent, puis on met le malaxeur en vitesse rapide pendant 30 secondes supplémentaire. On arrête le malaxeur pendant 1 min 30s, le temps d'enlever le mortier adhérent au bord vers l'intérieur, puis nous remettons le malaxeur en marche pendant 60 secondes à vitesse rapide.

Les moules étant préparés au préalable (montage et graissage), nous introduisons dans chaque compartiment du moule le mortier en deux couches, chaque couche subit 60 chocs sur l'appareil à choc. Les éprouvettes sont conservées à une température de 20°C et une humidité relative de 90% pendant 24H, puis elles sont placées dans l'eau jusqu'au jour de l'essai à une température de 20°C.



Figure 3.2: Moule à éprouvettes Prismatiques



Figure 3.1: Moule sur table à choc



Figure 3.4: Moule remplie de mortier



Figure 3.3: Epreuve après démoulage

Résistance à la traction par flexion

Nous plaçons les éprouvettes entre les appuis de l'appareil de Flexion, en prenant soin que les faces latérales (lisses) soient en contact avec les appuis. Nous rapprochons l'appui supérieur pour entrer en contact avec la face supérieure de l'éprouvette puis nous appliquons la charge.



Figure 3.6: Appareillage de Traction par flexion

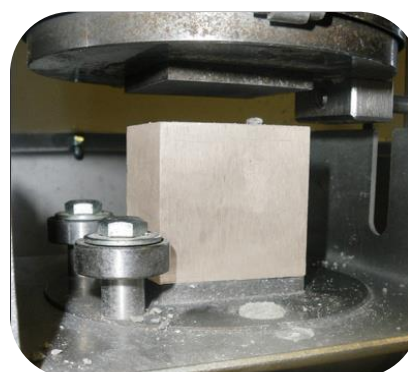


Figure 3.5: Appareillage de compression

Résistance à la Compression

La compression est mesurée sur les demi-prismes obtenus à partir de l'essai de traction par flexion. Nous plaçons les corps d'essai de manière à ce que les faces de l'éprouvette en contact de la presse soient perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette, puis nous amenons les plateaux de la presse en contact avec l'éprouvette et nous appliquons la charge.

La Norme NA 234 stipule que les résistances à la compression doivent être supérieures à 20 MPa à 2 jours, et supérieur à la résistance minimale garantie (52,5 MPa) à 28 jours. Notre échantillon de ciment est donc conforme (voir Tableau 3-1).

Tableau 3-1: Résultats des essais de résistances sur prisme de mortier

Age (jours)	2	7	28
Resistance a la compression (MPa)	38,16	51,90	63.35
Resistance a la flexion (MPa)	6.48	7.46	9.35

3.2.1.1.2: Temps de prise

L'association ciment-eau génère des réactions extrêmement complexes. Les silicates et aluminates qui se développent dans la phase d'hydratation, forment un gel cristallin qui marque le début du phénomène de "prise". Le développement et la multiplication de ces microcristaux au cours de la phase de "durcissement" (peut durer plusieurs mois) expliquent l'augmentation des résistances mécaniques et font du ciment une "roche composite". Avant d'atteindre son stade final, la pâte de ciment passe par trois phases successives :

- **La phase dormante** : La pâte reste en apparence inchangée malgré le démarrage des premières réactions.

- **Le début et la fin de prise** : Après une à deux heures, pour la plupart des ciments, une augmentation brusque de la viscosité se produit, accompagnée d'un dégagement de chaleur ; c'est le début de prise. La fin de prise est effective lorsque la pâte cesse d'être déformable et devient un matériau rigide.
- **Le durcissement** : L'hydratation du ciment se poursuit et la résistance mécanique continue à croître durant plusieurs mois. La résistance à 28 jours est la valeur conventionnelle de contrôle.



Figure 3.8: Appareil de VICAT

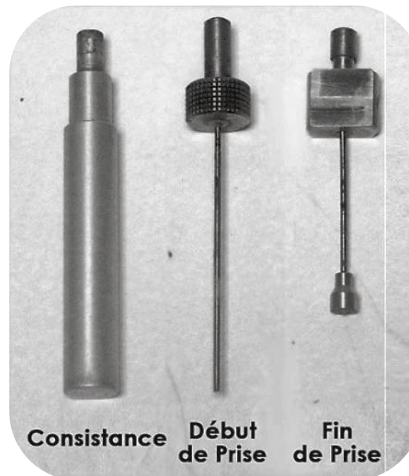


Figure 3.7: Sondes de l'appareil de VICAT

Le temps de prise est déterminé par la pénétration d'une aiguille de 1,13mm de diamètre (appareil de Vicat) dans la pâte de ciment de consistance normalisée jusqu'à atteindre une valeur spécifique (après 30s). Le début de prise est l'intervalle de temps entre l'instant de gâchage et celui où l'aiguille de Vicat pénètre à une distance de 4 ± 1 mm du fond du moule. Le temps de Fin de prise, quant à lui, est l'intervalle de temps entre l'instant de gâchage et celui où la sonde de Vicat ne s'enfonce dans la pâte de ciment que de 0,5mm. Ces deux essais sont réalisés à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Tout d'abord, nous déterminons la consistance normalisée (NA229/1990) à l'aide de l'appareil de Vicat pour pâte de ciment (Ciment(500g) + eau(125ml)), puis nous déterminons la quantité d'eau correspondant à une pénétration de la sonde de 6 ± 1 mm par essai de pénétrations successives sur les pâtes de ciments. Cette quantité représente celle de la consistance normalisée recherchée, puis nous recherchons les temps de prise.

Nous obtenons les résultats suivants :

- Consistance normalisée : 35,2%.
- Temps de début de prise : 140 min.
- Temps de fin de prise : 230 min.

Ces valeurs rentrent bien dans les plages indiquées dans la fiche technique du ciment.

3.2.1.1.3: Mesure de la finesse Blaine NF EN 196-6/NA 231

Sachant que la vitesse d'écoulement d'un fluide à travers un corps granulaire est liée à la finesse de mouture de ses grains et que cette même finesse de mouture est liée à la notion de "Surface Spécifique" qui désigne le total des aires de tous les grains contenus dans une quantité unité (1 gramme), l'essai qui relie ces trois grandeurs a donc pour but de calculer le débit d'air susceptible de passer à travers la poudre de ciment. Plus la surface massique de cette poudre est importante, plus le temps mis par l'air pour traverser la poudre est long.



Figure 3.9: Perméabilimètre de Blaine



Figure 3.10: Echantillon de ciment

Nous calculons donc ce temps pour les trois ciments utilisés, et nous l'introduisons dans la formule suivante :

$$SSB = \frac{K \times \sqrt{e^3} \sqrt{t}}{\rho_{abs}(1 - e) \sqrt{\eta}}$$

Avec :

- K : Constante de l'appareil.
- T : Temps calculé.
- e : Porosité du lit de ciment.
- n : Porosité fixé à 0,5.
- ρ_{abs} : Masse volumique apparente du ciment.
- η : Viscosité dynamique de l'air au moment de l'essai
(En relation avec la température de l'air).

La surface spécifique mesuré pour le ciment 52,5 R est de **4390 (cm²/g)**.

3.2.1.2: La mousse aqueuse

La stabilité de la mousse minérale est liée à la stabilité de la mousse aqueuse utilisée qui peut être affectée par plusieurs phénomènes (Page.32). Il existe certaines méthodes qui permettent d'étudier l'un de ces phénomènes. Dans ce travail, nous nous sommes limités à la méthode de Ross-Miles [41] pour choisir le meilleur agent moussant en termes d'abondance de la mousse produite et de sa persistance, ou stabilité.

3.2.1.2.1: Choix de l'agent moussant

Trois solutions moussantes ont été essayées, elles ont été préparées à partir de trois agents moussants différents et avec les concentrations massiques recommandées par les fabricants (Tableau 3-2).

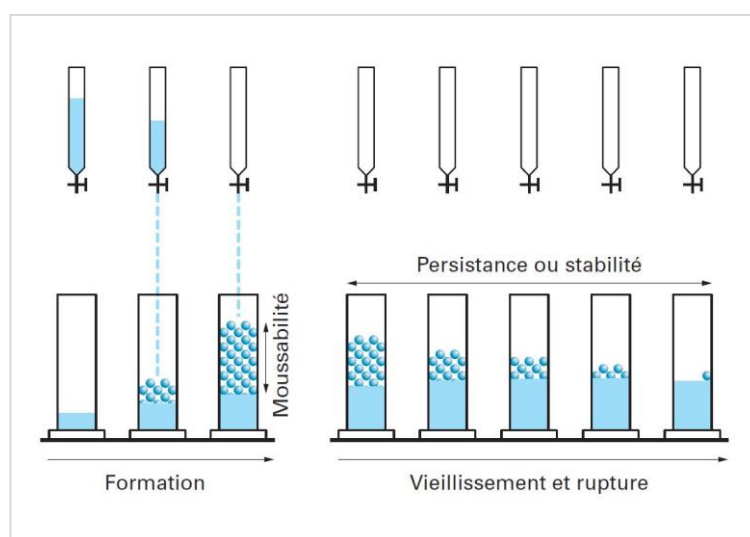


Figure 3.11: Méthode de Ross-Miles [41]

Tableau 3-2: Caractéristiques des agents moussants et leurs concentrations dans les solutions

Agent moussant	A	B	C
Origine	Protéique	Synthétique	Synthétique
Densité	1.03	1.02	1.05
Couleur	Jaune- paille	Noir	Marron foncé
Concentration de la solution	0.03	0.025	0.03

Pour chaque essai, on remplit une burette par une quantité de 200 ml de la solution moussante, puis, en ouvrant le robinet, on la verse depuis une hauteur de 90 cm dans un tube gradué contenant 50 ml du même liquide. Quand toute la solution est sortie de la pipette, on commence à chronométrer et on prend une lecture de la hauteur initiale de la mousse dans le tube. Et on continue en faisant d'autres lectures chaque 5 minutes.

La Figure 3.12 représente l'évolution de la hauteur de la mousse dans le temps.

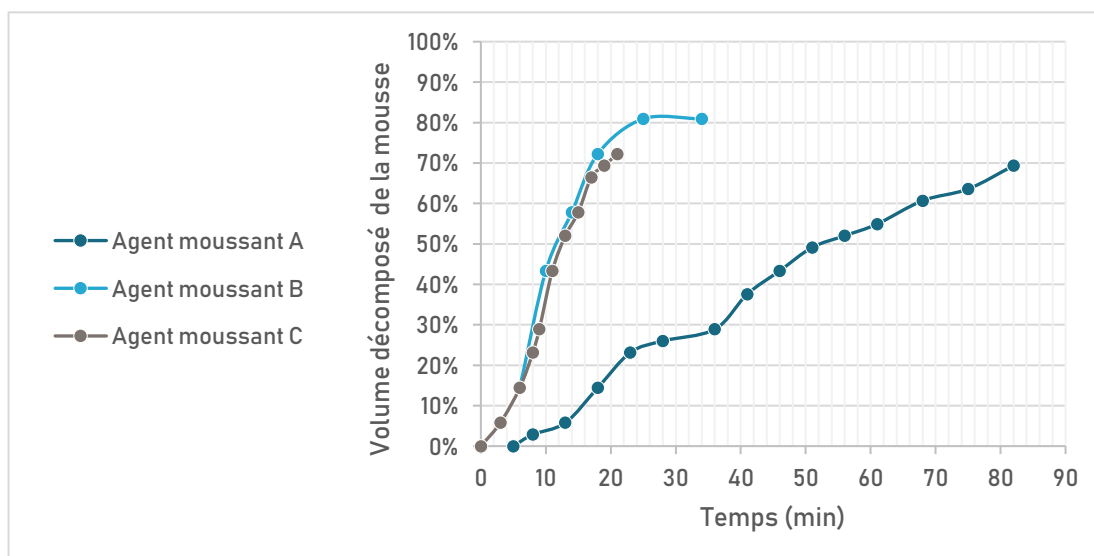


Figure 3.12: Décomposition des mousses dans le temps

Les deux mousses produites par les agents moussants B et C (synthétiques) avaient un aspect et un comportement presque identiques. Les bulles générées étaient grandes, de forme sphérique vers le bas de la colonne et de forme polygonale vers la face libre de la mousse, contrairement à la mousse produite par l'agent moussant A (Protéique) qui présentait des bulles de tailles plus petites.

La Figure 3.12 montre que la vitesse de décomposition dans les colonnes B et C est quatre fois plus grande que celle dans la colonne A. On en déduit que parmi les trois agents moussants, le surfactant A est le meilleur en termes de moussabilité et de pertinence.

3.2.1.2.2: Choix de la masse volumique de la mousse aqueuse

La mousse aqueuse a été produite à l'aide de la machine S*CM équipée d'un générateur de mousse. Son principe de fonctionnement consiste à sélectionner le débit d'eau souhaité, d'injecter l'agent moussant avec une concentration choisie à travers le doseur, puis l'air comprimé est entraîné dans la solution pour former la mousse avec une densité visée ; Cette densité doit avoir, selon la norme, des valeurs de 30 à 65 kg / m³ [42]. Par conséquent, des essais ont été effectués pour produire de la mousse dans cette plage de densité en variant la pression d'air pour un débit d'eau donné. Ces essais ont permis de fixer la pression à 2,1bars pour un débit d'eau fixée à d=500 l/h ce qui donne des valeurs de densité de la mousse égales à 65 ± 3 kg/m³.

3.2.2: Formulation de la mousse minérale

Dans cette étude la formulation des bétons mousse va suivre le procédé de la mousse préformée. Avant de procéder à la formulation, certains paramètres de béton mousse doivent être choisis tel que la masse volumique cible, le rapport E/C, et d'autres relatives à ses constituants comme la nature de la mousse aqueuse et sa masse volumique.

3.2.2.1: Choix de la masse volumique fraîche cible

Afin de formuler la mousse minérale, nous avons commencé par le choix des densités visées qui vont nous permettre d'atteindre les performances thermiques envisagées. Un classement des masses volumiques de bétons légers suivant le domaine d'utilisation montre que les bétons ayant des masses volumiques entre 300 kg/m^3 et 600 kg/m^3 sont destinés pour des applications d'isolation thermique des toitures. Sachant que le séchage de la mousse minérale aqueuse induit une augmentation de la masse volumique, cette variation atteint la valeur de 100 kg/m^3 dans les travaux de recherches de CNERIB [36]. Sur la base de ces données, nous avons choisi trois valeurs de masse volumique fraîche cible : 400 kg/m^3 , 450 kg/m^3 et 500 kg/m^3 .

3.2.2.2: Choix du rapport E/C

Le rapport E/C joue un rôle essentiel sur la qualité et la stabilité des bétons mousse. Une quantité insuffisante d'eau dans le mélange a tendance à provoquer l'extraction de l'eau de la mousse, entraînant sa désintégration, d'où un effondrement potentiel du mélange. D'un autre côté, l'excès d'eau dans le mélange favorise la ségrégation qui peut également entraîner des effondrements [43]. Ces études ont souligné que le rapport E/C optimal du béton varie entre 0,50 et 0,55 tandis que la norme ASTM C796 recommande une valeur de 0,65 en cas d'utilisation des ciments à haute résistance initiale [42]. Dans cette étude, le rapport E/C a été maintenu constant à 0,55 car il a été observé qu'il fournissait une consistance suffisante pour la plupart des densités et facilite l'incorporation de la mousse dans le coulis minéral.

Ce rapport nous permet d'écrire :

$$m_e = 0,55 m_c \quad \text{3-1}$$

$$m_{cou} = m_e + m_c = 1,55 m_c$$

Le volume de la mousse minérale aqueuse est égal à la somme des volumes du coulis minéral et de la mousse.

$$V_f = 1 = V_{cou} + V_M$$

$$V_f = 1 = \frac{m_{cou}}{\rho_{cou}} + \frac{m_M}{\rho_M}$$

$$m_M = \rho_M \left(1 - \frac{m_{cou}}{\rho_{cou}}\right) \quad 3-2$$

En posant l'hypothèse que pour 1m³ de volume de béton mousse frais, la valeur de sa masse volumique est égale à la somme des masses de ses constituants dans le mélange :

$$\rho_{f.cible} \times 1m^3 = m_{cou} + m_M$$

$$m_{cou} = 1 - m_M$$

En remplace cette équation dans (3-1) :

$$m_M \left(1 - \frac{\rho_M}{\rho_{cou}}\right) = \rho_M \left(1 - \frac{1}{\rho_{cou}}\right)$$

La masse de la mousse à utiliser est :

$$m_M = \rho_M \frac{\left(1 - \frac{1}{\rho_{cou}}\right)}{\left(1 - \frac{\rho_M}{\rho_{cou}}\right)} \quad 3-3$$

Les équations (3.1), (3.2), et (3.3) permettent le calcul des masses nécessaires de chaque constituant pour produire les bétons mousse ayant les masses volumiques visées. (400 kg/m³, 450 kg/m³ et 500 kg/m³). Les valeurs sont indiquées dans le Tableau 3-3

Tableau 3-3: Dosages des constituants pour 1m³ de béton mousse.

$\rho_{f.cible}$ (kg/m ³)	Ciment (kg)	Eau (kg)	Mousse (kg)	$\rho_{f.réelle} / \rho_{f.cible}$
400	224.2	123.3	52.5	1,06
450	257.7	141.7	50.6	1,02
500	291.2	160.1	48.7	1,01

Nous avons suivi un mode opératoire similaire à celui décrit dans les travaux de Kearsley. D'abord nous versons l'eau dans le récipient du malaxeur suivie du ciment puis nous mettons en marche le malaxeur à une vitesse de 165 tours/min pendant 2 minutes. On arrête le malaxeur pendant 30 secondes, le temps d'enlever la pâte adhérente au bord vers l'intérieur. Puis, on reprend le malaxage avec la même vitesse pour 2 autres minutes. Le coulis minéral obtenu est ensuite versé dans un grand récipient métallique à base hémisphérique.

Pendant ce temps, la mousse préformée a été produite par le générateur de mousse et la quantité nécessaire calculée de mousse est ajoutée au coulis minéral immédiatement après la vérification de sa densité. Et à l'aide d'une grande spatule en silicone, on incorpore la mousse dans le coulis minéral en faisant des mouvements rotatoires du fond en haut jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.



Figure 3.14: Mousse minérale fraîche



Figure 3.13: Coulis de ciment

Nous disposons maintenant d'un béton mousse frais, il nous reste de vérifier sa stabilité à travers la détermination du rapport entre sa masse volumique fraîche réelle et celle ciblée, (la définition est dans le paragraphe (2.3.2.3:)). Les masses volumiques fraîches réelles des bétons mousse produits sont mesurées à l'aide d'un récipient de masse et volume connus (1L). Ensuite, nous avons calculé le rapport identifiant l'état de stabilité pour chaque béton. Les valeurs de ce rapport indiquées dans le Tableau 3-3 témoignent la stabilité de nos bétons mousse, car elles signifient des écarts de 5 kg/m^3 , 9 kg/m^3 et 25 kg/m^3 entre les masses volumiques réelles, et celles ciblées (500 kg/m^3 , 450 kg/m^3 et 400 kg/m^3 respectivement).

3.2.2.1: Préparation des éprouvettes

Les premiers mélanges de la mousse minérale fraîche ont été coulés dans des moules en métal, elles ont montré une forte adhérence à la surface du moule quel que soit le type et la quantité d'agent de démoulage utilisé. De plus, nous avons remarqué que la mousse minérale présentait une hétérogénéité dans une couche de 5 mm d'épaisseur au niveau des faces des éprouvettes qui ont été en contact avec le moule (de gros vides, des ceux...) (voir Figure 3.15). Ces éprouvettes sont encartées de l'étude.



Figure 3.15: Aspect de la surface de la mousse minérale, cas d'utilisation des agents de démoulage, (échelle 1/1)

Afin d'éviter tous ces effets indésirables, nous avons eu recours au recouvrement de toutes les plaques constituant des moules par un film plastique adhésif (voir Figure 3.16). Aucune compaction n'a été fournie afin d'empêcher l'effondrement de la mousse préformée. La surface exposée de chaque moule a été immédiatement recouverte après le remplissage par une feuille du film plastique pour minimiser la perte d'eau. Le démoulage est effectué après 48h (Figure 3.17).



Figure 3.16: Moule enveloppé par le film plastique adhésif



Figure 3.17: Moule rempli avec de la mousse minérale fraîche

3.2.2.2: La cure

Une définition typique de la cure (NORME) est « le processus de prévention de la perte d'humidité du béton tout en maintenant un régime de température satisfaisant ». La nécessité de durcir le béton a été reconnue depuis la création du béton. Bien que des méthodes de cure pour les bétons classiques aient été établies, le régime de cure pour le

béton cellulaire est encore en cours d'exploration. À la suite d'une recherche approfondie de Kearsley, les plus hautes résistances ont été obtenues sur des spécimens scellés dans des sacs en plastique et maintenus à une température constante de 22 ° C [43].

Dans les travaux de recherche de Samson [20], les échantillons ont été conservés pour une semaine dans le laboratoire à une température $T = 22\text{ °C}$ et une humidité relative de 60% à 70%. Puis ils ont été placés dans une salle sèche à une température de 25 °C. C'est le même mode de cure que nous avons suivi, sauf que pendant la deuxième phase de cure, les éprouvettes ont été enveloppées par un film plastique adhérent.

3.2.3: Caractéristiques thermomécaniques

3.2.3.1: Essai de compression

La résistance mécanique en compression R_c a été déterminée en utilisant une presse Proviteq destinée pour la réalisation des essais mécaniques sur les échantillons de sols. Cette presse qui dispose d'un capteur de force de 15 KN est pilotée par un logiciel de commande avec lequel nous avons fixé la vitesse de compression à 15 kN/s, aussi la forme des éprouvettes leurs dimensions et élancements.

Remarques :

- Les deux plateaux de la presse ont une forme circulaire de 120 mm de diamètre, Donc, les éprouvettes cubiques qui peuvent assurer un contact complet entre leurs faces supérieure et inférieure, et les deux plateaux de la presse, sont seulement celles ayant des arêtes de longueur inférieure à 84 mm. Les moules qui ont ces dimensions n'existent pas sur le marché.
- Les essais de détermination de la résistance en compression ont été effectués sur des éprouvettes cubiques de 7cm d'arête qui ont été obtenues en découpant des éprouvettes "mères" prismatiques de dimensions 70×70×280 mm. Les éprouvettes cylindriques n'ont pas été confectionnées car il a été difficile d'appliquer le film transparent sur des surfaces concaves.



Figure 3.19: Epreuve prismatique
70×70×280 mm



Figure 3.18: Epreuve cubique
70×70×70 mm

Les résultats obtenus suite aux écrasements sont indiqués dans le Tableau 3-4

Tableau 3-4: Résultats des essais de compression sur les bétons mousse à base de ciment.

Masse volumique à 28 jours (kg/m ³)	Rc 7 jours (MPa)	Rc 14 jours (MPa)	Rc 28 jours (MPa)
360	0,4	0,43	0,45
380	0,51	0,55	0,58
420	0,78	0,86	0,97

L'évolution de la résistance à la compression du béton mousse de ciment en fonction de la masse volumique est représentée dans la Figure 3.20 pour les différents âges ; 7, 14 et 28 jours.

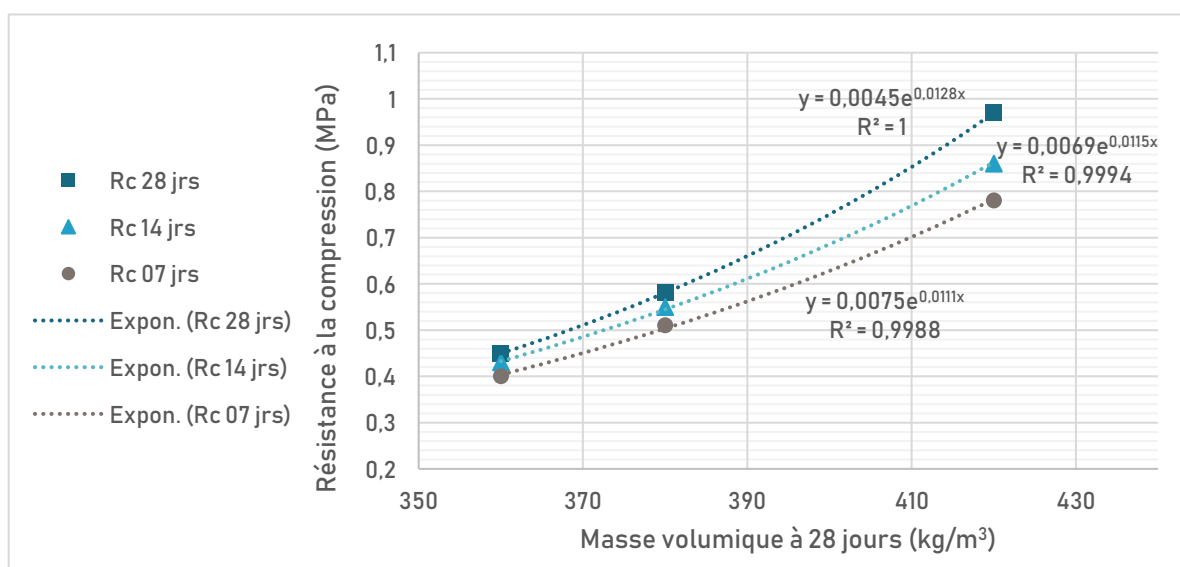


Figure 3.20: Évolution des résistances à la compression sur cubes en fonction de la masse volumique des mousses minérales pour les âges : 7, 14 et 28 jours

La résistance à la compression augmente exponentiellement pour des valeurs croissantes de la masse volumique. Pour la même masse volumique, le taux d'augmentation est plus faible au jeune âge ; il est de 40,5% à 7 jours, 42,5% à 14 jours et 48% à 28 jours.

3.2.3.2: Essai thermique

3.2.3.2.1: Essai au Ct-mètre

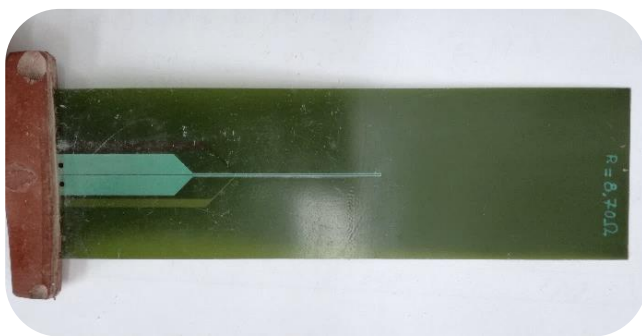


Figure 3.21: Sonde monotige utilisée pour mesurer la conductivité thermique



Figure 3.22: Essai au Ct-mètre en cours

La conductivité thermique des échantillons a été mesurée grâce à la technique du fil chaud en utilisant un appareil CT-mètre. Le principe de fonctionnement, consiste, grâce à l'association d'un capteur de température et d'un élément chauffant, à mesurer l'élévation de la température subie par le capteur au cours d'une période de chauffage choisie par l'utilisateur en fonction du matériau à tester et du type de sonde utilisée [44]. La source de chaleur se présente comme une aiguille infiniment longue, ayant une capacité thermique nulle et une conductivité thermique infinie [20]. Elle est placée entre deux faces isothermes préalablement rectifiées des deux éprouvettes de dimensions 100×150×50 mm du même échantillon à analyser. La perturbation thermique vient imposer un flux de chaleur linéique constant, la durée choisie est de 3 minutes.

Nous avons réalisé cet essai sur des échantillons séchés (humidité nulle).

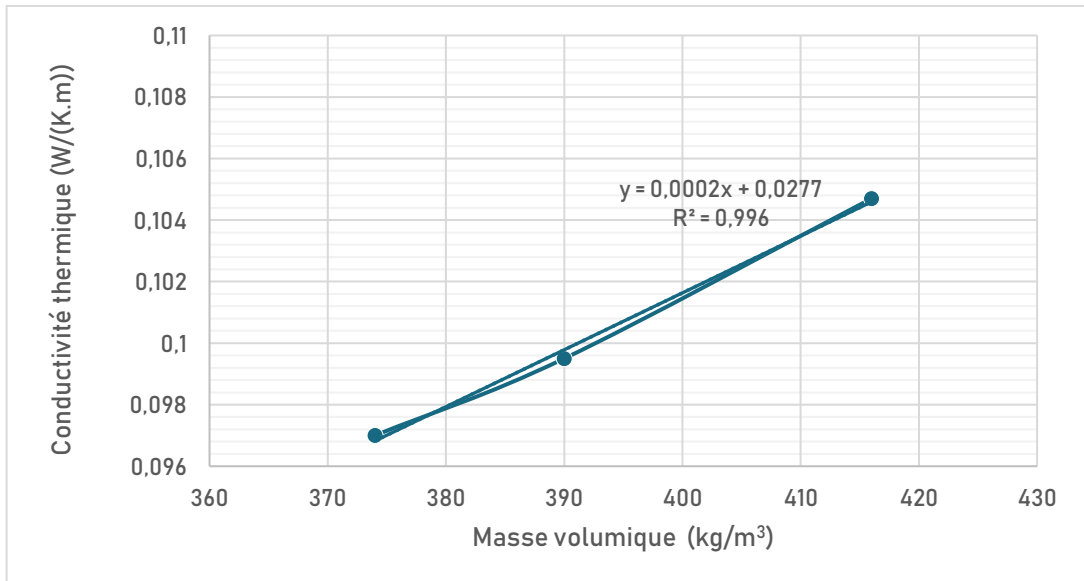


Figure 3.23: Résultats de l'essai de conductivités thermique de béton mousse de ciment sans FC.

Les résultats représentés dans la figure montrent que la conductivité thermique augmente linéairement avec l'accroissement de la masse volumique, les valeurs obtenues rentrent dans la plage de $1 \pm 0,05$ W/(m.k). Ces résultats sont similaires à ceux présentés dans la publication de CNERIB [36].

3.2.3.3: Essai à la plaque chaude gardée

L'essai de détermination de la conductivité thermique à la boîte chaude gardée devrait suivre la procédure de la norme ASTM C 177 [45]. Cet essai est généralement reconnu comme la méthode absolue principale pour la mesure des propriétés de transmission thermique des matériaux d'isolation homogènes sous la forme de dalles planes.

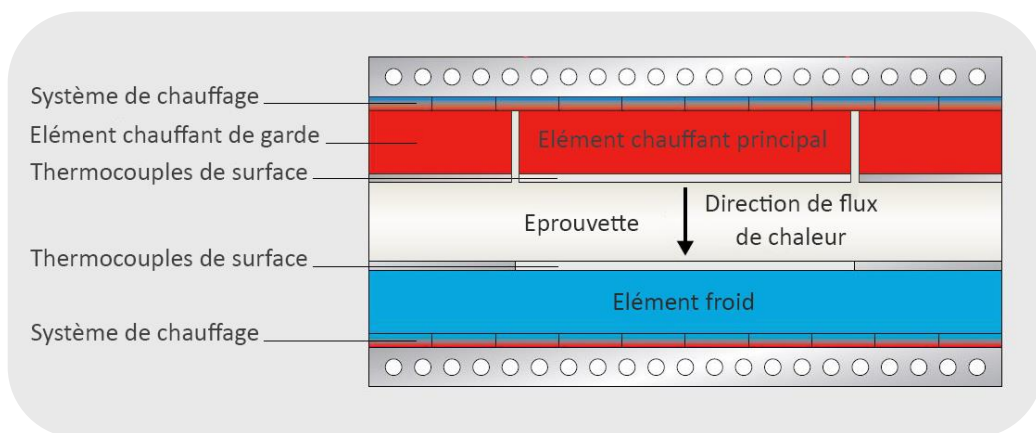


Figure 3.24: Schéma représentatif de la boîte chaude gardée

La méthode de la plaque chaude gardée de base consiste principalement en un élément chaud et un élément froid ; l'échantillon d'essai est placé sur un élément chauffant constitué d'une plaque plane interne chauffée à l'électricité (dispositif de chauffage principal) entourée d'un dispositif de chauffage de garde. Ce dernier est soigneusement contrôlé pour maintenir la même température des deux côtés de l'espace séparant l'élément chauffant principale et les dispositifs de garde. Ceci empêche le flux de chaleur latéral provenant du la source principale et assure un flux de chaleur unidirectionnel s'écoulant dans la direction de l'échantillon. Sur le côté opposé de l'échantillon se trouve l'élément froid composé d'un ensemble continu de plaques planes chauffantes qui sont commandés à une température fixe sélectionnée par l'opérateur, pour une entrée de chaleur donnée à l'élément chauffant principal, l'ensemble de plaques chauffantes augmente en température jusqu'à ce que le système atteigne l'équilibre [45].

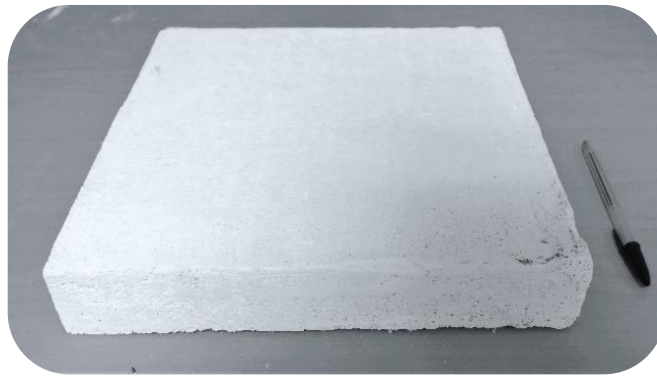


Figure 3.25: Eprouvette en mousse minérale de dimensions 30×30×05 cm

La température finale de la plaque chauffante dépend de la puissance électrique absorbée, de la résistance thermique de l'échantillon et de la température de la plaque froide. La conductivité thermique moyenne λ de l'échantillon est déterminée à partir de l'équation d'écoulement de chaleur de Fourier comme suit :

$$\lambda = \frac{W}{A} \left(1 \frac{d}{\Delta T} \right)$$

Où W est l'entrée de l'alimentation électrique de l'élément chauffant principal, A : représente sa surface, ΔT est la différence de température à travers l'échantillon, et d est l'épaisseur de l'échantillon.

Les résultats de cet essai ne sont pas présentés dans ce rapport car il n'est pas encore effectué. Les éprouvettes planes que nous avons confectionnées sont conservées dans les condition normatives, elles doivent être âgées de 4 mois avant la réalisation de l'essai.

3.2.4: Le retrait

3.2.4.1: Description de l'essai

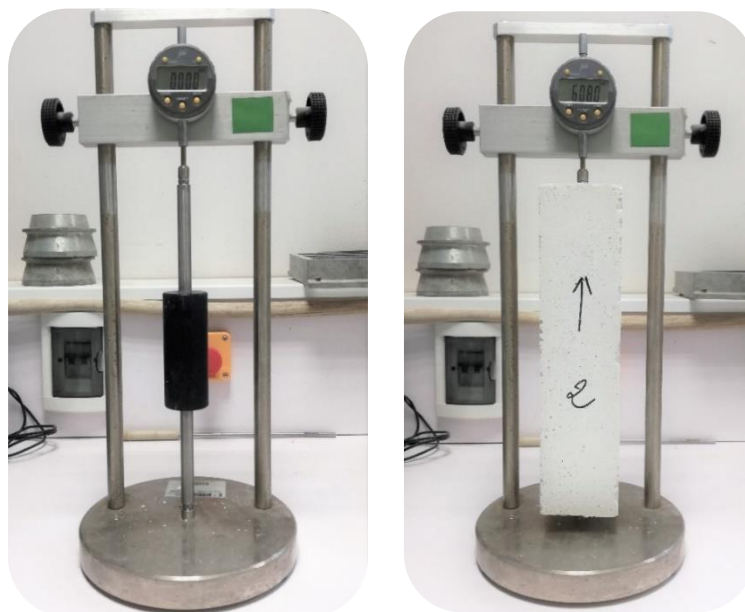


Figure 3.26: Essai du retrait sur des éprouvettes prismatiques

Le retrait a été mesuré sur des éprouvettes de dimensions $7 \times 7 \times 28$ cm en utilisant un appareil spécifique (Figure 3.26), disposant d'un capteur pour mesurer les variations de la distance entre les vis ancrées aux centres des deux faces de petite section des éprouvettes qui ont été confectionnées en visant une masse volumique cible de la mousse minérale égale à 450 kg/m^3 , et conservées à une température de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et une hygrométrie entre 50% et 60%.

Les éprouvettes ont été repérées par des flèches à un seul sens afin de garder la même orientation durant chaque opération de mesure. Les résultats sont représentés dans la Figure 3.27.

3.2.4.2: Résultats de l'essai du retrait

La mousse minérale produite à base d'un ciment 52,5 R présente un retrait important dont 90% de sa valeur maximale est atteinte après 30 jours. Cette valeur oscille entre 6 et $6,2 \text{ mm/m}$.

Suite à la perte d'humidité interne pendant les 2 premières semaines, la masse volumique de la mousse minérale décroît fortement de sa valeur initiale 420 kg/m^3 avec un taux de 7,4% pour qu'elle atteigne 489 kg/m^3 . A partir du 15ème jour, on remarque une prise de masse avec une vitesse relativement faible, chose qui pourrait être le résultat du Phénomène de carbonatation favorisé par la forte porosité du matériau.

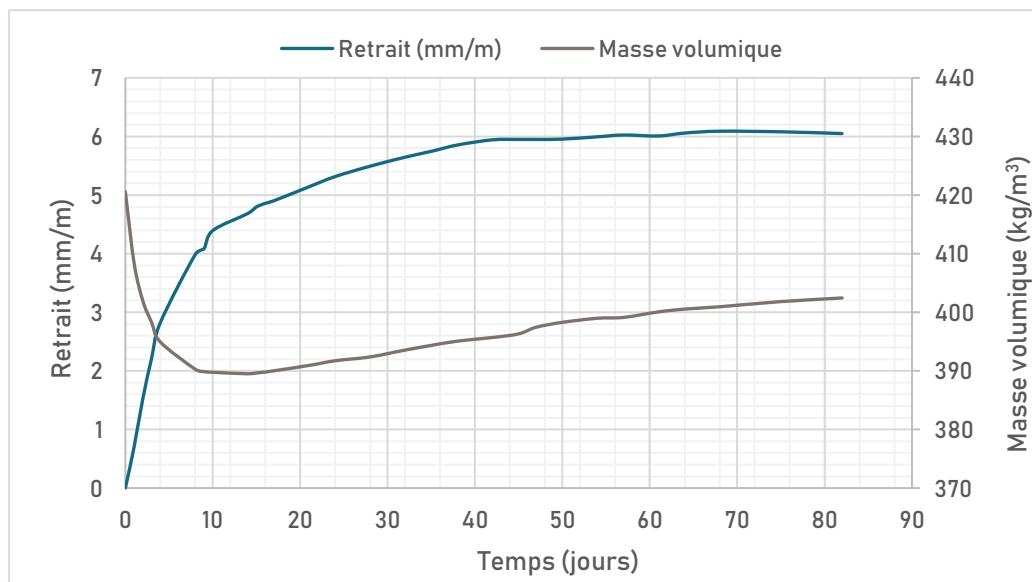


Figure 3.27: Résultat de l'essai du retrait sur mousse minérale de masse volumique 420 kg/m³.

Les essais évoqués précédemment ont été réalisés parallèlement à une étude bibliographique continue, ce qui a permis d'avoir une bonne vue d'ensemble des caractéristiques du produit, mais surtout de s'inspirer de certaines études pour optimiser la première formulation tout en améliorant les performances de notre mousse minérale (béton mousse), cela est l'objet du paragraphe suivant.

3.3: Béton mousse de ciment avec filler calcaire (FC)

Dans cette partie d'étude, les caractéristiques de la mousse aqueuse et les procédés des essais d'identification sont similaires à ceux suivis et présentés dans la partie précédente.

3.3.1: Matériaux et caractérisation

Dans cette deuxième étude, le béton mousse est produit à partir d'une phase solide composée du même ciment blanc utilisé dans la première formulation, auquel nous avons rajouté des fillers calcaires (FC) avec plusieurs rapports Filler/Ciment (F/C). Les mélanges ont été bien homogénéisés puis conservés dans des sacs loin de l'humidité. Les résultats de caractérisation du ciment et de la mousse sont présentés dans les paragraphes (§ 3.2.1.1:) et (§ 3.2.1.2:) respectivement, On se limitera dans ce paragraphe à la caractérisation du FC particulièrement puis celle de toute la phase minérale (ciment + filler).

3.3.1.1: Filler calcaire (FC)

Au début, nous avons décidé d'essayer deux classes granulométriques différentes de filler, ce sont des carbonates de calcium naturel issus du broyage des roches calcaires. La fiche technique est dans l'annexe **A.1**. Leurs caractéristiques chimique et physiques sont résumées au le Tableau **3-5**:

Tableau 3-5: caractéristiques des fillers calcaires [46]

Classe granulométrique (μm)	150	300
CaCO ₃ (%)	99	99
MgO (%)	0,14	0,14
Fe ₂ O ₃ (%)	0,01	0,01
Inférieur à 10 μm (%)	50	/
Inférieur à 200 μm (%)	92	/
Diamètre médian (μm)	10	/

Nous avons aussi effectué un essai de mesure de la Finesse Blaine pour le filler F150, sa valeur est de : **3700 cm²/g**.

Ces fillers ont été mélangés avec le ciment selon des rapports massiques filler/ciment (F/C) allant de 0,05 à 0,25 avec un pas de 0,05.

3.3.1.2: Détermination des classes vraies de résistance des différents mélanges

Afin de déterminer les classes vraies de résistance des différents mélanges, des essais de caractérisation mécanique ont été effectués selon la norme Algérienne [40], dont les procédés sont décrits au paragraphe (§ **3.2.1.1**). Nous présentons les résistances à la compression à 2, 7 et 28 jours pour les différents mélanges dans la Figure **3.28**.

Ces résultats montrent que la résistance à la compression sur mortier est inversement proportionnelle au rapport F/C pour les deux fractions granulaires du filler. Le taux de diminution de la résistance est plus fort à 28 jours qu'au jeune âge. Les classes vraies de résistance ainsi que la résistance à la traction sont résumées dans le Tableau **3-6**.

Tableau 3-6 : Résistances à la compression et à la traction à 28 jours en fonction du rapport F/C.

F/C	0	0,05	0,10	0,15	0,20	0,25
RC 28 jrs (MPa)	63,35	60,41	55,48	52,87	48,33	42,46
Rt 28 jrs (MPa)	09,45	09,23	09,11	08,65	08,11	07,15

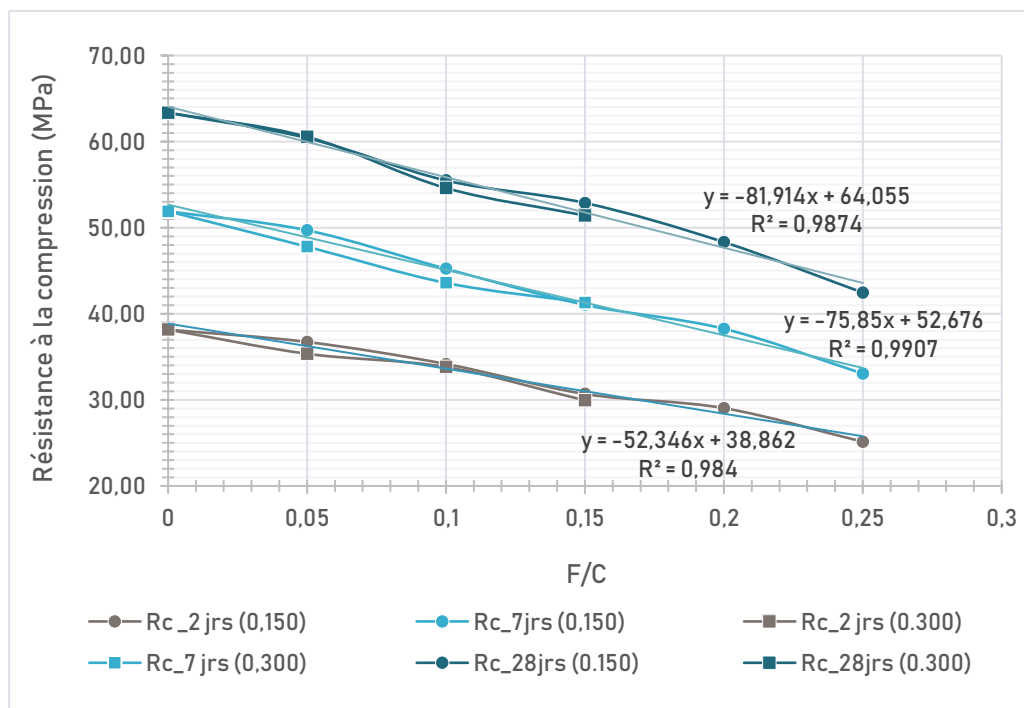


Figure 3.28: Resistance à la compression sur mortier normalisé en fonction du rapport filler/ciment

3.3.2: Formulation de béton mousse

La formulation a été faite suivant le procédé de la mousse préformée, et selon la même approche volumétrique qui permet de déterminer les quantités nécessaires des constituants. Le rapport E/C est donc fixé à 0,55 et les masses des constituants (mousse, eau et phase minérale) ont été déterminées à partir des équations (3.1), (3.2), et (3.3), en visant une masse volumique fraîche cible de 450 Kg/m³. Les valeurs obtenues sont très proches voir égales à ceux de la première formulation, (béton mousse de ciment sans ajout). Ce résultat est la conséquence des faibles teneurs en FC qui caractérisent nos mélanges (F/C ≤ 0,25), aussi, cela est dû au fait que la densité du FC utilisé s'approche beaucoup de celle du ciment. De ce fait, nous avons choisi de formuler ce béton mousse en utilisant les mêmes quantités des constituants résumées dans le Tableau 3-3.

Nous avons vérifié la stabilité des béton mousse obtenus après la mesure de leurs masses volumiques fraîches, les rapport masse volumique fraîche / masse volumique cible décrivant l'état de stabilité de chaque mousse minérale sont résumés dans le Tableau 3-7.

Tableau 3-7: Etat de stabilité des béton mousse de ciment avec ajout FC

F/C	0,10	0,15	0,20	0,25
$\rho_{f.réelle} / \rho_{f.cible}$	1,06	1,08	1,08	1,08

Ces valeurs rentrent bien dans le domaine de stabilité défini dans la page (P.39). Le critère de stabilité est donc vérifié pour les deux formulations (avec et sans ajout FC), cela pourrait être expliquée par la bonne qualité de la mousse aqueuse qui a prouvé sa pertinence et sa stabilité dans l'essai de Ross Miles (§ 3.2.1.2.1:).

3.3.3: Résistance à la compression

Les éprouvettes sur lesquelles cet essai est réalisé sont de forme cubique (70×70×70 mm). Le régime de cure suivi est présenté dans le paragraphe (§ 3.2.2.2:).

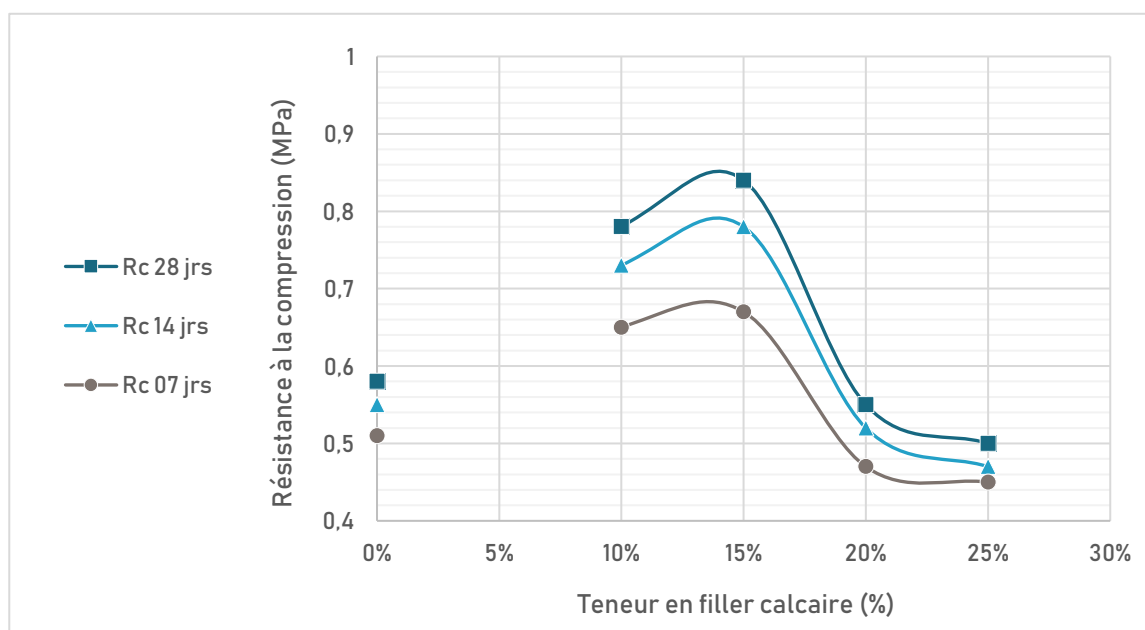


Figure 3.29: Effet du filler calcaire sur la résistance à la compression de béton mousse.

Les résultats des essais de compression représentés dans la Figure 3.29 révèlent que la résistance à la compression de béton mousse est largement influencée par la teneur en FC. Elle augmente avec tout accroissement du rapport F/C dans la plage des valeurs comprises entre 0,10 et 0,15 où elle atteint son optimum (MPa). Puis elle chute rapidement dès que la teneur en filler excède les 15%.

3.3.4: Conductivité thermique

De même pour le béton mousse de la première formulation, l'identification de la conductivité thermique de la mousse minérale à base de ciment avec ajout FC a été faite suivant le procédé décrit dans (§ 3.2.3.2.1:). Les résultats sont représentés dans la Figure 3.30.

Les valeurs de conductivité thermique obtenues sont 0,926 W/(K.m) et 1,002 W/(K.m) pour les masses volumiques 356 kg/m³ et 400 kg/m³ respectivement. Ces valeurs sont légèrement inférieures à ceux obtenues dans le cas de béton mousse sans ajouts, la différence est de l'ordre de 0,001 W/(K.m).

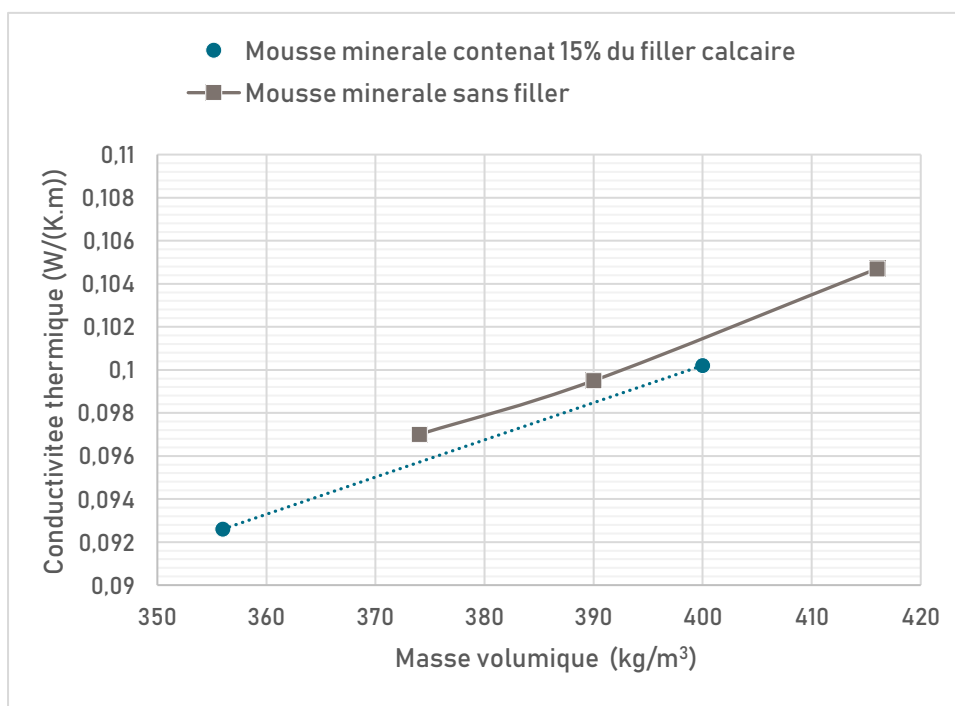


Figure 3.30: Résultats de l'essai de conductivité thermique de béton mousse de ciment avec ajout FC

3.3.5: Le retrait

L'essai de retrait sur les éprouvettes de béton mousse de ciment avec ajouts FC est effectué selon le procédé du paragraphe (§ 3.2.4.2:). La prise de mesures est toujours en cours, Nous présenterons dans la Figure 3.31 les résultats obtenus jusqu'à présent.

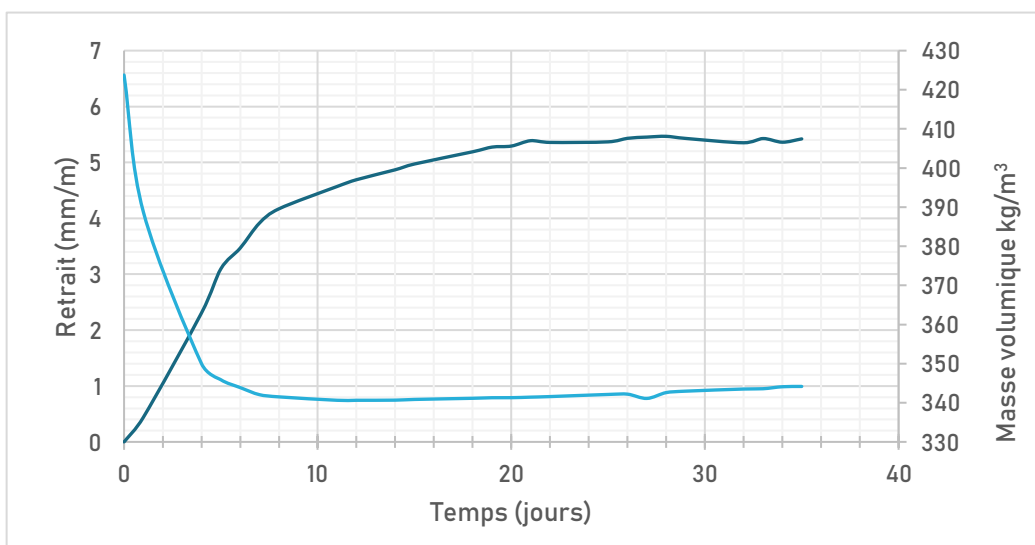


Figure 3.31: Retrait du béton mousse de ciment avec ajout FC.

Nous avons vu dans la partie bibliographique sur le béton mousse, que les fillers en général, réduisent le retrait du béton mousse, ces résultats permettent d'identifier l'effet des FC particulièrement sur le comportement au retrait du béton mousse.

La mousse minérale contenant 15% de FC a atteint 90% de son retrait maximal (5,4 mm/m) dans une durée de 14 jours seulement. Comparé avec la mousse minérale produite selon la première formulation, Ce béton mousse présente une diminution de 13% du retrait maximale qui se fait dans une durée deux fois plus courte.

3.4: Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude de deux formulations de mousse minérale ; la première à base d'un ciment blanc à haute résistance initiale sans ajouts, et la deuxième à base d'un mixe minéral de ciment avec ajout de fillers calcaires. Durant la phase de formulation qui a suivi le procédé de mousse préformée, les paramètres de la mousse aqueuse (masse volumique et nature) ont été bien choisis, cela nous a permis d'éviter les problèmes d'instabilités de béton mousse à son état frais. Les performances thermomécaniques de béton mousse de la première formulation rejoignent parfaitement les résultats des travaux de recherche cités dans le deuxième chapitre. L'introduction des ajouts FC dans le mixe minéral avec un rapport F/C de 0,15 a permis d'améliorer les performances de la mousse minérale produite ; la résistance à la compression a augmenté de 40% et le retrait a diminué de 13%.

Chapitre 4

Etude de la Structure des Pores

4.1:Introduction

Les parties précédentes de ce travail ont permis de voir l'effet de l'ajout du filler calcaire dans le mix sur la résistance mécanique et la conductivité thermique de notre mousse minérale. Afin de mieux comprendre cet effet qui doit être lié à la manière avec laquelle le filler agit sur la structure porale, nous nous sommes intéressés seulement à l'étude de deux mousses minérales qui ont été formulées en utilisant le même pourcentage de mousse dans leurs volumes à l'état frais.

4.2:Caractérisation de la structure des pores du béton mousse

Il existe plusieurs procédés qui permettent ce type d'analyse, dont les plus utilisés sont :

- La tomographie par absorption de rayons X : elle permet la reconstruction d'images tridimensionnelles des objets analysés, donc, une distribution alvéolaire volumique [20].
- Engluage des surfaces des objets poreux par une résine pigmentée : ce qui permet l'obtention d'une distribution alvéolaire surfacique [20].

Nous utiliserons dans notre cas la deuxième méthode.

4.2.1: Analyse surfacique à l'aide du Logiciel ImageJ

4.2.1.1: Le logiciel ImageJ :

Un logiciel multiplate-forme et open source de traitement et d'analyse d'images développé par les National Institutes of Health , en 1987. Il est écrit en Java et permet l'ajout de nouvelles fonctionnalités via des plugins et macros.

ImageJ a été initialement développé pour des applications biomédicales. Il permet par exemple de faire des analyses de gels d'électrophorèse, ou de la détection et analyse de tumeurs. Son usage s'est depuis étendu à d'autres domaines, comme la science des matériaux (détermination de tailles de grains, traitement d'images obtenues par microtopographie X par exemple) [47].

4.2.1.2: Préparation des échantillons

Pour chacune des deux mousses minérales, 3 tranches de dimensions 70 x 70 x 15 mm ont été découpées à partir de trois échantillons durcis. Les plans de coupe sont perpendiculaires aux faces coulées. Ensuite, ces nouveaux échantillons ont été rectifiés à l'aide d'une polisseuse afin de s'assurer de la planéité de leurs faces. La poussière créée lors de cette opération est enlevée par soufflage à l'air comprimé.

Les essais préliminaires d'analyse surfacique effectués sur des photos des faces rectifiées, ont montré qu'il est parfois difficile au logiciel ImageJ de différencier deux pores en contact ou même de différencier les pores de petite taille de la matrice minérale à cause du faible contraste entre la matrice minérale et les vides qui ont tous la même couleur blanche.

Pour renforcer ce contraste, nous avons commencé par remplir les pores sur les faces rectifiées par un coulis de ciment (couleur sombre). Après le séchage, les faces des échantillons ont été à nouveau rectifiées et nettoyées.

4.2.1.3: Traitement des images

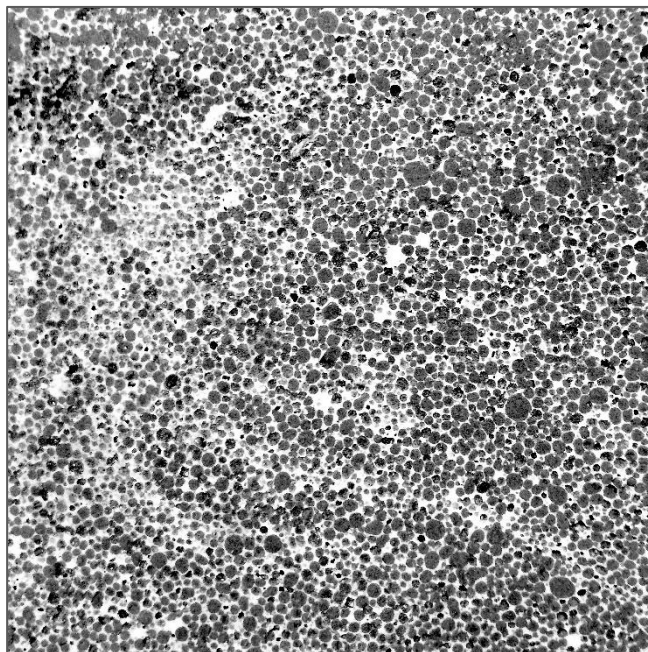


Figure 4.1: Photo du plan de coupe apres traitement avec le logiciel Photoshop, échelle réelle.

Une fois les échantillons sont prêts, on passe à la prise de photos, trois images ont été capturées pour chaque mousse minérale, puis converties en forme binaire et analysées par le logiciel ImageJ, après l'augmentation de leurs contrastes en utilisant le logiciel de traitement d'images Photoshop.

Dans le logiciel ImageJ, l'image est réduite dans un premier temps à une image 8 bits puis les niveaux du gris sont seuillés par deux valeurs, une en dessous de laquelle tous les pixels étaient considérés comme vides et une autre au-dessus desquels ils étaient considérés comme pleines en matière, ce qui permet d'obtenir une image binaire (**Figure 4.2.a**). Ensuite, la fonction de remplissage « Fill Holes » est utilisée pour supprimer les reflets présents à la surface des vides dans la photo sous forme de tache blanches (**Figure 4.2.b**). A la fin, la procédure « Watershed » est employée afin de séparer les vides (**Figure**

4.2.c). C'est à partir de ces photos traitées et en utilisant l'algorithme « Analyze Particles » qu'on a pu extraire les informations relatives aux alvéoles (Figure 4.2.d) (nombre, taille, aire...).

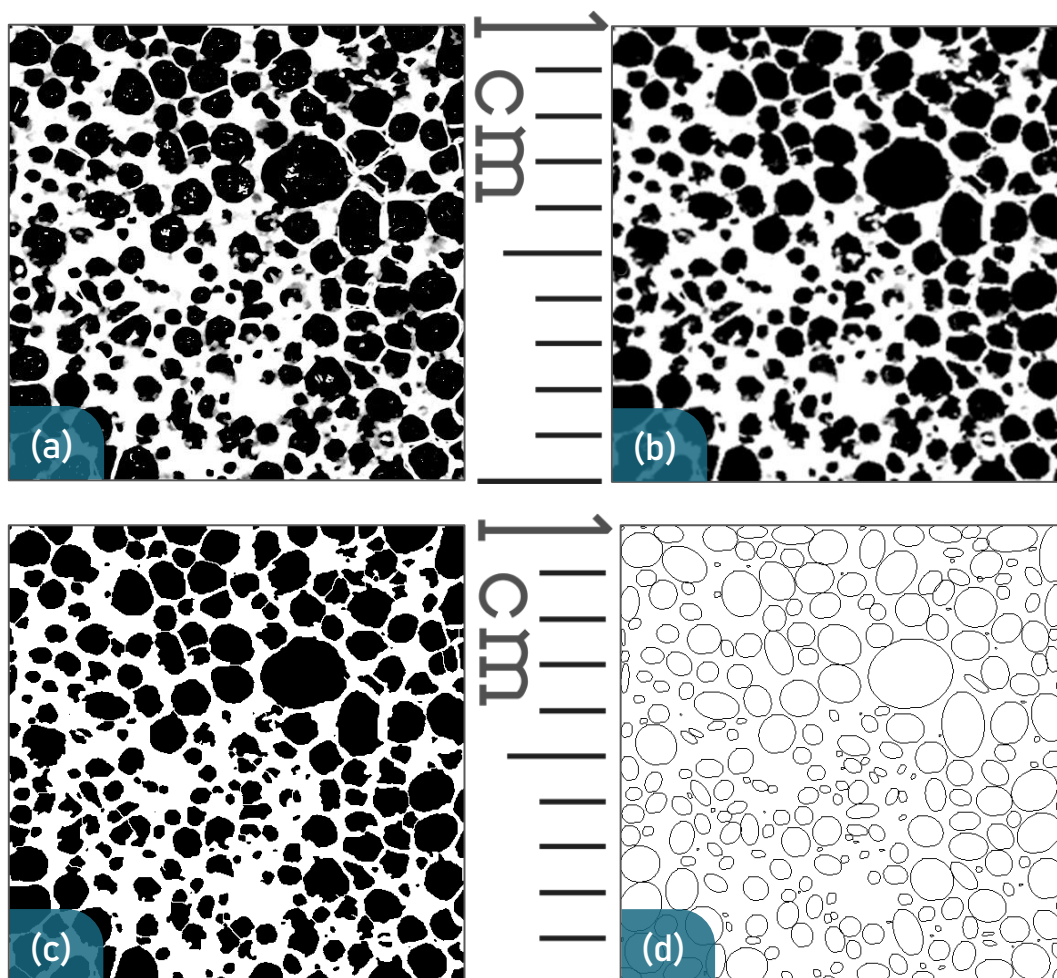


Figure 4.2: Etapes d'analyse des images par ImageJ

4.2.2: Construction et comparaison des distributions des tailles de pores

Les résultats obtenus de l'analyse des images des plans de coupe ont permis la construction des distributions alvéolaires des deux mousses minérales suivant une approche similaire à celle suivie généralement pour obtenir les courbes granulométriques des sols. Les alvéoles ont été classées dans des familles selon leurs diamètres moyens, ensuite, le pourcentage surfacique de chaque classe a été déterminé permettant la construction de la distribution partielle et cumulée des tailles de pores (Figure 4.3) et (Figure 4.4) respectivement.

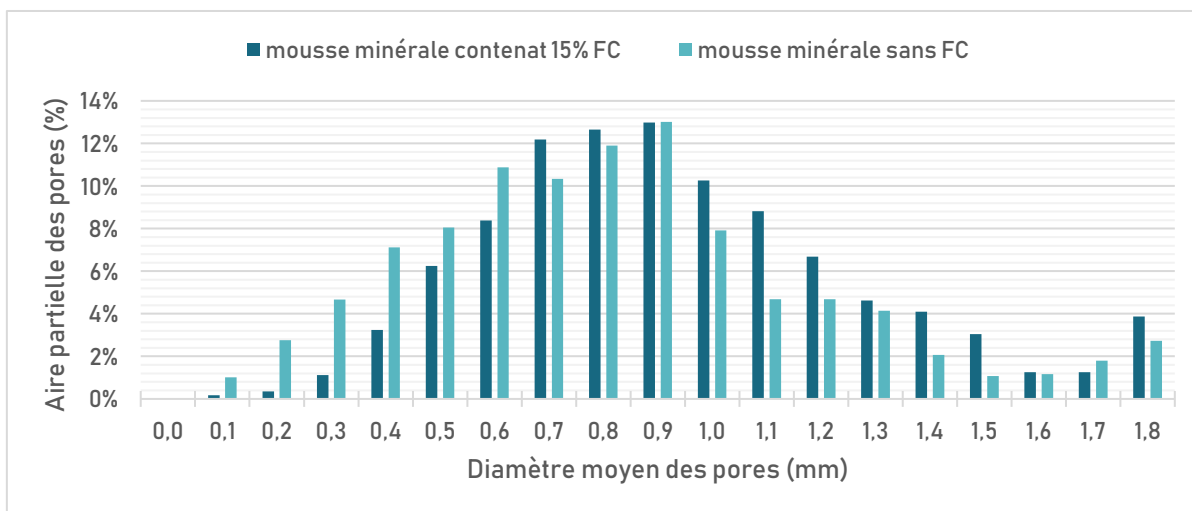


Figure 4.3: Distribution des surfaces partielles des pores

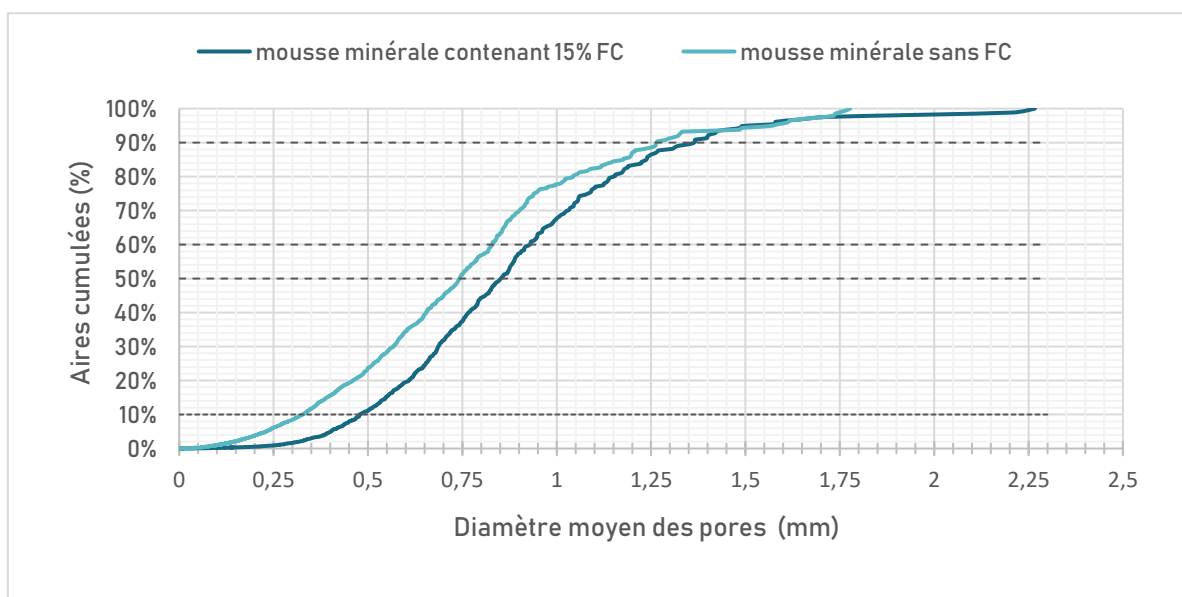


Figure 4.4: Distribution des surfaces cumulées des pores

Afin de bien caractériser les distributions des pores des deux mousses minérales, certains paramètres spécifiques à la caractérisation des sols vont être utilisés. La forme de la courbe granulométrique d'un échantillon de sol représente la distribution de la dimension de sa particule. Cette particule peut être qualifiée d'uniforme si les dimensions des particules sont voisines. La courbe granulométrique est caractérisée par deux coefficients dont un est le coefficient d'uniformité C_U [48].

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

D_{10} : diamètre moyen des grains correspondant à 10% passant par poids.

D_{60} : diamètre moyen des grains correspondant à 60% passant par poids.

La distribution des dimensions des particules est dite :

- Bien graduée : si le coefficient d'uniformité est supérieur à 10 ($C_u > 10$).
- Étalée : si le coefficient d'uniformité est compris entre 2 et 10 ($2 < C_u < 10$).
- Uniforme ou serrée : si le coefficient d'uniformité est inférieur à 2 ($C_u < 2$).

Les pores ayant les diamètres compris entre 0,8 mm et 0,9 mm représentent le maximum de pourcentage d'aire partielle pour les deux bétons mousse.

La distribution des pores de la mousse minérale à base de ciment sans ajouts FC est légèrement plus fine que celle de la mousse contenant le filler calcaire (FC). Cette dernière a un diamètre D_{50} de 0,86 et un $D_{90} = 1,35$ mm, plus grands que ceux constatés sur la mousse contenant le FC ($D_{50}=0,74$ et $D_{90}=1,25$).

4.2.3: Comparaison de la forme des pores

L'analyse de la distribution des pores a été faite sous l'hypothèse qu'ils ont la forme d'une ellipsoïde ce qui a permis l'obtention des diamètres minimal et maximal (D_{min} et D_{max}) pour chaque ellipsoïde. Nous définissons le rapport entre ces deux derniers paramètres comme étant le coefficient de sphéricité des pores S , équivalent au coefficient d'aplatissement des granulats.

$$S = \frac{D_{min}}{D_{max}}$$

Ce coefficient qui peut avoir des valeurs comprises entre 0 et 1 va nous servir pour décrire la forme des pores. Un coefficient de sphéricité égale à 1 signifie que le pore est de forme sphérique tandis qu'une valeur inférieure à 1 de ce paramètre indique que le pore a une forme ellipsoïdale. Le coefficient de sphéricité a été calculé pour nos deux mousses minérales à partir des résultats d'analyse de trois différents plans de coupe pour chacune. Les valeurs de S dans le Tableau 4-1 sont les moyennes relatives aux trois plans de coupe.

Tableau 4-1: caractéristiques de la structure porale des bétons mousse

Mousse minérale	D_{10} (mm)	D_{60} (mm)	D_{90} (mm)	C_u	S
Mousse sans FC	0,325	0,825	1,250	2,50	0,67
Mousse contenant 15% FC	0,475	0,925	1,350	1,95	0,75

La valeur du coefficient de sphéricité S est de 0,75 dans le cas de mousse contenant du FC, 12% plus grande à la valeur dans le cas du béton mousse témoin qui est de 0,67 (voir Figure 4.5). Rappelons que les deux béton mousse étudiés ont la même teneur en mousse aqueuse, ils diffèrent seulement en leurs teneurs en FC. On en déduit que le filler calcaire

a changé la forme des pores en augmentant leurs diamètres minimaux, donc une forme plus sphérique qui représenterait un état plus stable des bulles d'air par rapport aux formes aplaties.

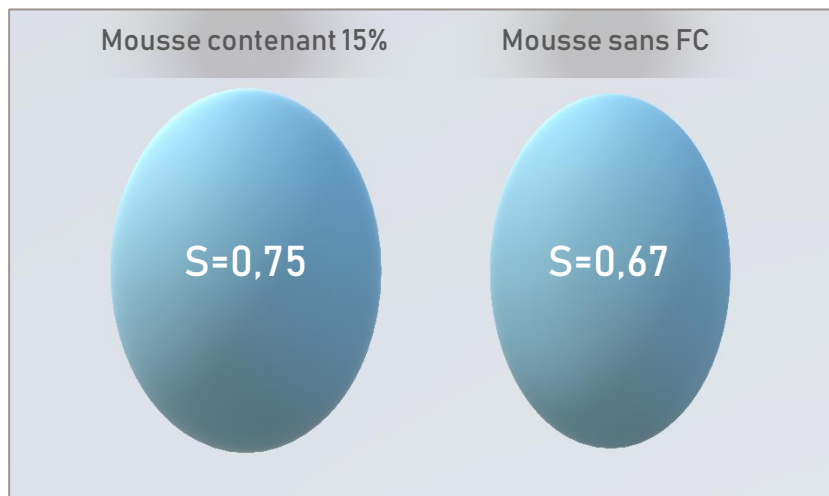


Figure 4.5: forme des pores des deux bétons mousse

4.3:Conclusion

L'analyse surfacique d'image à l'aide du Logiciel ImageJ a été utilisée pour étudier la structure des pores résultants de l'incorporation de mousse aqueuse. La distribution des tailles s'est avérée uniforme dans le cas de béton mousse de ciment avec 15% FC, et étalée pour le béton mousse témoin. Ce résultat signifie pour le premier cas ; une distribution plus homogène des pores selon leurs tailles dans le volume du béton. Les résultats ont permis aussi d'évaluer l'effet du FC comme constituant de la matrice cimentaire sur la forme des pores où nous avons constaté une augmentation de leur taille moyenne. Cette augmentation est associée à une tendance à avoir une forme plus sphérique.

Chapitre 5

Simulation Thermique Dynamique

5.1: Introduction

Le Nouveau programme national sur l'efficacité énergétique vise l'économisation de 30 millions de TEP dans le secteur du bâtiment d'ici 2030 à travers la mise en œuvre de technologies innovantes autour de l'isolation thermique et l'encouragement de l'industrie locale des matériaux isolants. Le béton mousse est un matériau écologique qui peut être produit facilement en Algérie, et dont le pouvoir isolant a été démontré dans les chapitres précédents. Dans ce chapitre, nous évaluons à travers une simulation thermique dynamique l'impact de ce matériau comme composant de la toiture à l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments.

5.2: Généralités sur La simulation thermique dynamique

5.2.1: Définition

La simulation thermique dynamique (STD) est un outil qui permet de modéliser les bâtiments et de mesurer l'impact de chaque paramètre de la construction sur le niveau de leur performance énergétique. Cet outil est devenu indispensable pour concevoir des bâtiments neufs ou pour les rénover en haute performance énergétique [49]. La différence majeure par rapport au calcul thermique réglementaire (type de la réglementation thermique Algérienne) est que la STD représente un environnement totalement ouvert et paramétrable, là où le calcul réglementaire imposera toutes les hypothèses à prendre pour la réalisation de la simulation [49].

5.2.2: Etapes de la simulation thermique dynamique

Les étapes de la STD sont les suivantes :

- Construction du modèle géométrique.
- Interaction avec l'environnement, fichier météo annuel.
- Données des matériaux pour l'ensemble des éléments du modèle géométrique, façade, toiture, sous-sol, éléments intérieurs, structure ...etc.
- Définition des équipements thermiques, chaud, froid, ventilation ;
- Hypothèses d'usage, occupation, équipements, éclairage.

5.2.3: Les résultats que fournit une simulation thermique dynamique

- Évolution des températures heure par heure pour chaque zone du bâtiment sur l'année.
- Puissance de chauffage ou de froid nécessaire.
- Consommation annuelle des équipements et du bâtiment.
- Origine des apports énergétiques.

A partir de ces résultats, la STD permet de mener différentes études de faisabilité technique en comparant entre elles les solutions techniques à mettre en œuvre sur une construction (Choix des matériaux, enveloppe, système isolations, menuiseries, mise en œuvre d'énergies renouvelables...etc.).

5.3: Choix de l'environnement de simulation

Dans le cadre de ce travail de recherche, notre choix s'est porté sur ECOTECT ANALYSE 2011 développé par la firme américaine Autodesk. Ce choix est justifié par :

- L'ergonomie de son interface de simulation
- Sons utilisation est nettement facile par rapport a d'autres logiciels
- La fiabilité du logiciel : La cotation du logiciel et sa fiabilité ne peuvent se vérifier que par un état de l'art des travaux de recherche et des études menés en utilisant ce logiciel, ainsi qu'à travers les critiques que reçoit le logiciel par les professionnels et les experts en la matière. L'utilisation d'ECOTECT est très répandue dans toutes les universités et laboratoires du monde, surtout dans les travaux de recherche anglo-saxons. Sa firme d'édition AutoDesk est une référence mondiale dans les logiciels de simulation et d'ingénierie.

5.4: Cas d'étude

Lors des calculs, nous avons considéré un bâtiment correspondant à une maison familiale moderne de quatre personnes orientées Est, disposant de quatre façades, composée de deux chambres, salon, cuisine, salle de bain et débarras et située à Alger (36,7°N,3.2°E). Le plan architectural est illustré dans la Figure 5.1, les vues du modèle tridimensionnel sont illustrées dans l'annexe A.2.

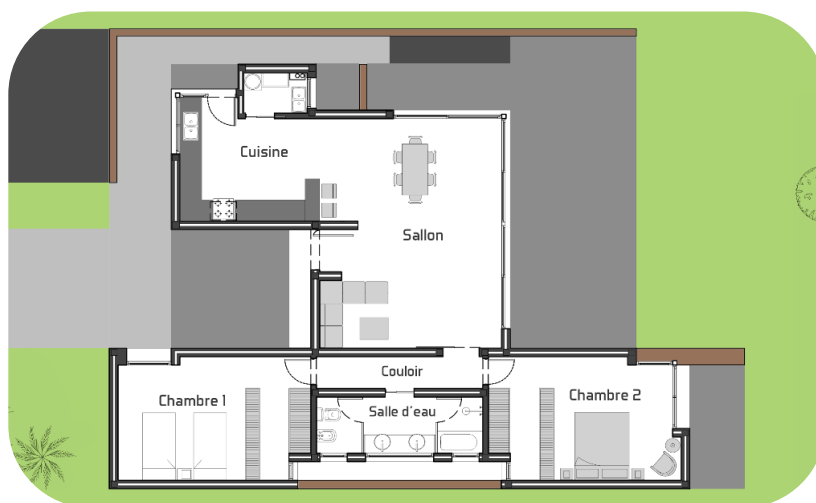


Figure 5.1: Plan d'architecture du cas d'étude

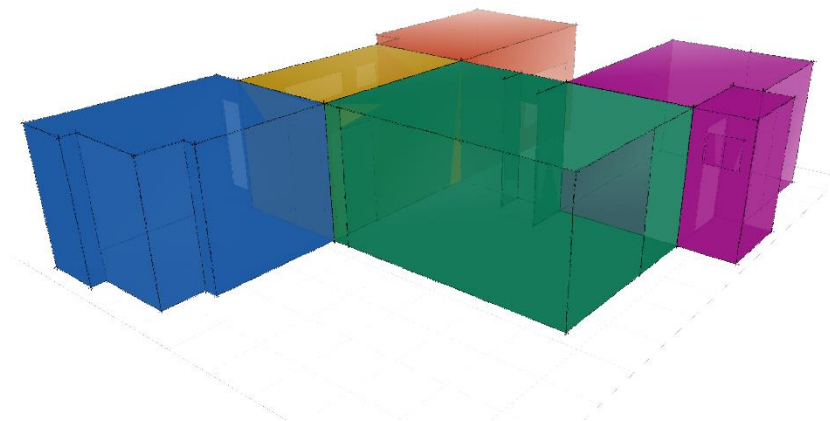


Figure 5.2: Modèle multizones du cas d'étude

5.5: Modélisation

Selon la complexité et la nature du problème posé et de l'objet d'étude, il existe différentes approches de la modélisation du comportement thermique dynamique d'un bâtiment. Pour cette étude, nous avons choisi le modèle multizone ou modèle nodal qui représente le bâtiment par un ensemble de nœuds. Chaque nœud correspond à une zone qui représente en réalité une pièce ou l'extérieur par exemple, celle-ci est définie par des caractéristiques uniformes (température, pression...). La liaison entre les zones est constituée par des ouvertures par lesquelles transite l'air (portes et fenêtres, entrées d'air, défauts d'étanchéité de l'enveloppe...). Le modèle multizone est particulièrement adapté pour simuler des logements complets, voire même des bâtiments entiers. Il est basé sur l'hypothèse des caractéristiques uniformes de l'air à l'intérieur de chaque pièce.

5.5.1: Créations du modèle géométrique

Afin de modéliser notre maison constituée de 5 pièces principales, 5 zones ont été créées auxquelles nous avons ajouté des ouvertures qui sont destinées à représenter les portes et les fenêtres, chaque zone est représentée par une couleur spécifique dans la fenêtre de modélisation (voir Figure 5.2)

Les caractéristiques géométriques de chaque zone sont résumées dans le Tableau 5-1.

Tableau 5-1: Configurations et caractéristiques des zones thermiques

Zone	Pièce	Superficie (m ²)	Volume (m ³)	Ventilation	Bande de confort	Occupants
1	Chambre 1	14,55	40,661	Complète	18°C – 27°C	2
2	Salle d'eau	10,00	28,00	Chauffage	≥ 18° C	0
3	Chambre2	11,93	33,33	Complète	18°C – 27°C	2
4	Salon	25,26	60,48	Complète	18°C – 27°C	2
5	Cuisine	16,59	46,65	Chauffage	≥ 18°C	1

5.5.2: Définition des matériaux

Les matériaux de construction déterminent la réponse thermique d'un projet. Leurs propriétés thermophysiques indiquent leur capacité à conduire la chaleur et à la stocker. Les matériaux à faible conductivité tels que le bois transfèrent mal la chaleur tandis que les matériaux à faible capacité calorifique se réchauffent plus rapidement que ceux à forte capacité calorifique volumétrique et ne servent donc pas de bons matériaux de stockage thermique. Les choix des matériaux pour les parois de notre bâtiment modèle sont les suivants :

- 80% de surface des murs externes sont construits par une double cloison en brique tandis que le reste sont des murs rideaux.
- Les murs internes sont des mono-murs en brique.
- Toutes les fenêtres sont supposées du types double vitrage.
- Les portes des pièces principales et d'entrée sont en bois de pin et celles de la salle d'eau sont coulissantes et en verre
- Plancher inférieur : Dalle en béton de 10cm d'épaisseur posée sur le sol plus un carrelage et une sous-couche de pose.

Définition des variantes pour le plancher supérieur

Afin d'isoler l'effet du béton mousse sur l'efficacité énergétique des bâtiments lorsqu'il est appliqué sur les toits, deux variantes de plancher supérieur ont été étudiées ;

- La première est une dalle de corps creux au quelle est rajoutée une couche d'étanchéité (**Figure 5.3:b**).

- La deuxième est la même que la première, sauf qu'elle dispose d'une couche en béton mousse de 15 cm d'épaisseur a la place de la couche en mortier (**Figure 5.3:a**).

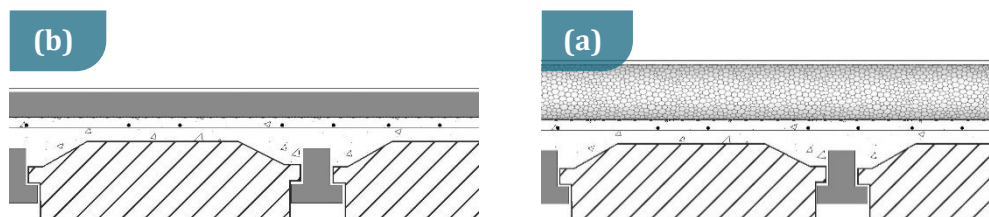
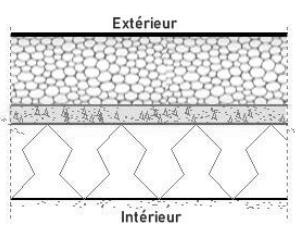

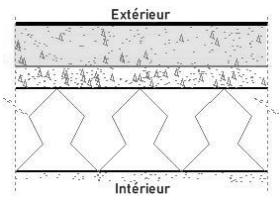


Figure 5.3: variantes pour le plancher supérieur (toit).

A part le béton mousse les propriétés thermophysiques et dimensionnelles des couches constituants les parois (murs, planchers, fenêtres...) sont prises de la réglementation thermique algérienne. Elles sont résumées dans le tableau 5-2.

Tableau 5-3: Propriétés thermophysiques des couches des parois

	Schématisation	Matériau	e (mm)	ρ (kg/m ³)	c (J/K)	λ W/(m.K)
Mur externe		Mortier	10	2200	1080	1,40
		Brique	100	1600	936	0,70
		Lame d'air	50		1004	
		Brique	100	1600	936	0,70
		Mortier	10	220	1080	1,40
		Plâtre	20	1250	936	0,35
Mur interne		Mortier	10	2200	1080	1,40
		Brique	100	1600	936	0,70
		Brique	100	1600	936	0,70
		Mortier	10	220	1080	1,40
		Plâtre	10	1250	936	0,35
Plancher bas		Sol	1500	1300	1046	0,837
		Béton	100			
		Couche de pose	30	220	1080	1,40
		Carrelage	15	1900	1	936

Toit avec béton moussé		Etanchéité	2		0,23	
		Béton	15	400	936	0,10
		Polyane	1			0,007
		Plancher hourdis	20	/	1,7	/
		Plâtre	20	1250	936	0,35
Fenêtre		Verre	6	2700	1,10	792
		Aire	35	/	/	/
		Verre	6	2700	1,10	792
Plancher haut		Sol	1500	1300	1046	0,837
		Mortier	60	2200	1080	1,40
		Corps creux	20	/	1,7	/
		Plâtre	20	1250	936	0,35

Tous ces choix sont affectés au modèle géométrique à travers la fenêtre « Materials » illustrée dans la Figure 5.4 qui permet de créer, modifier et sauvegarder des fichiers de matériaux dans la bibliothèque du logiciel qui dispose d'un grand nombre de systèmes constructifs prédéfinis.

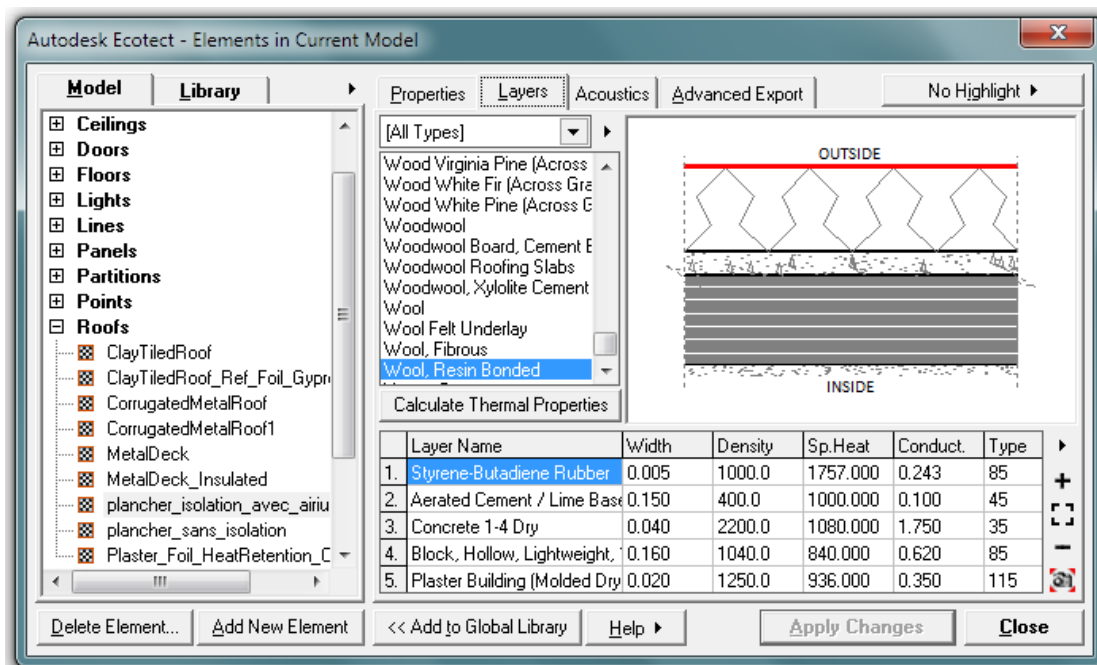


Figure 5.4: Bibliothèque des matériaux dans ECOTECT

5.5.3: Affectation des propriétés thermiques

5.5.3.1: La bande de confort

La bande de confort pour une zone thermique est la plage de valeurs de températures internes en dehors de laquelle la mise en marche des systèmes de chauffage ou de climatisation est nécessaire. Dans notre cas, cette bande est définie par une borne supérieure (27°C pour les zones : 1, 3 et 4) et une borne inférieure (18°C pour les mêmes zones).

5.5.3.2: Système de ventilation

Pour chaque zone thermique, nous avons attribué un type de système de climatisation. Les températures internes donc seront maintenues dans la bande de confort, et les charges de chauffage et / ou de climatisation seront ainsi calculées. Parmi ces systèmes on trouve :

5.5.3.2.1: Ventilation naturelle

Cela signifie simplement que pendant la période d'exploitation, si les conditions extérieures sont plus proches de la bande de confort définie que des conditions intérieures, les occupants ouvriront les fenêtres et le taux de renouvellement de l'air augmentera proportionnellement à la surface de la fenêtre dans chaque direction. La vitesse actuelle du vent. Ce taux de renouvellement d'air supplémentaire est supérieur à celui des réglages du taux de changement d'air pour la zone.

5.5.3.2.2: Climatisation complète

Cela signifie que les systèmes de chauffage et de climatisation fonctionnent selon les besoins pour maintenir la température de l'air de la zone entre les bornes de la bande de confort à tout moment durant la période de fonctionnement. Dans notre étude, ce mode est affecté aux zones thermiques 1,3 et 4.

5.5.3.2.3: Chauffage uniquement

Ce système fonctionne uniquement pour maintenir la température interne de la zone thermique au-delà de la borne inférieure de sa bande de confort.

5.5.3.3: Occupation

Dans les calculs thermiques réglementaires (cas des réglementations thermiques algérienne 2016 et française RT-2012), la vérification de la conformité à la réglementation de fait en considérant le cas le plus défavorable cela est équivalent au

maximum d'occupation possible. Le nombre de watts ajoutés aux apports thermiques internes pour chaque personne étant déterminé par leur taux d'activité. Si un horaire d'occupation est défini, cela signifie que le nombre de personnes occupant est de 100%. Dans notre cas, les zones thermiques 1, 3 et 4 sont occupées chacune par 2 personnes ayant le taux d'activité « Sédentaire » équivalent à un apport énergétique de 70W pour chacun.

5.5.3.4: Éclairage et équipements

Afin d'estimer les apports thermiques dus à l'éclairage et aux équipements, nous avons considéré une valeur de 5W/m²; cette valeur est proposée par le logiciel pour le cas des bâtiments à usage d'habitation.

5.5.4: Données climatiques

Le bâtiment choisi est supposé situé dans la ville d'Alger, son interaction avec le climat est prise en compte dans le calcul ; cela est assuré après l'introduction des données climatiques de cette zone (Alger) en important un fichier (weather data) de type (.wea). D'autres paramètres ont été fixés préalablement ; la latitude : 35°, la longitude : 7.8333°, l'orientation : Est, et l'environnement du bâtiment : urbain.

5.6: Résultats

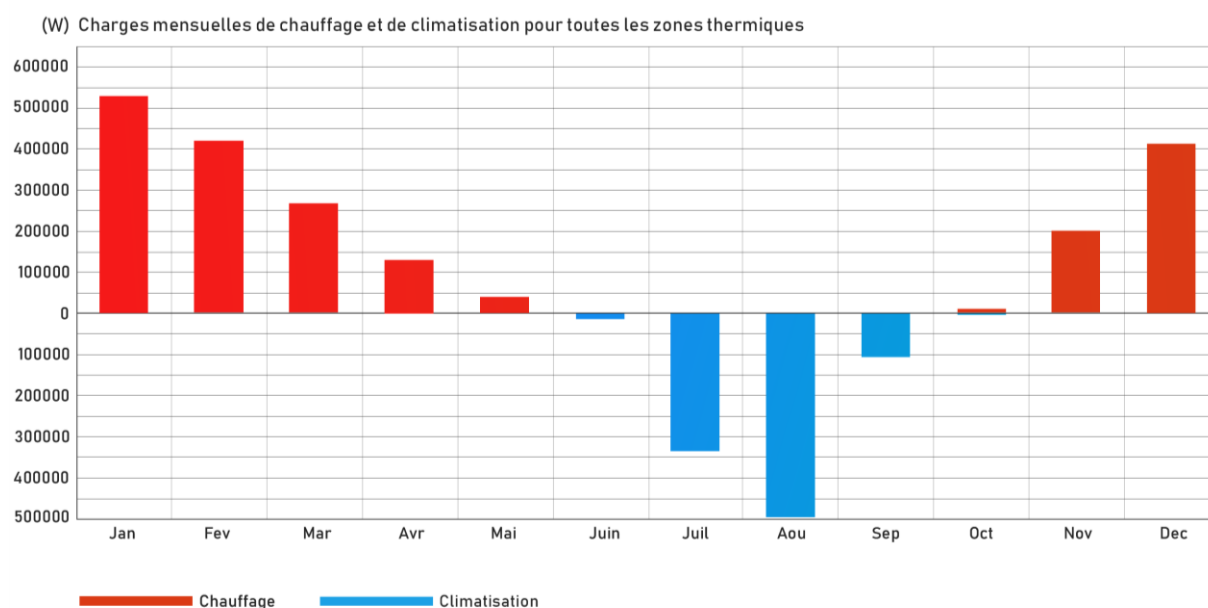


Figure 5.5: besoins énergétiques de chauffage et de climatisation pour le cas d'un plancher non isolé

Les graphiques des **Figure 1.5** et **Figure 5.6** représentent les charges (apports énergétiques) totales de chauffage et de climatisation pour l'ensemble de la maison modèle.

Les charges de chauffage sont affichées en rouge et dépassent la ligne médiane des graphiques tandis que les charges de climatisation sont en bleu et projetées en dessous de cette ligne.

Il convient de noter qu'il s'agit de charges de chauffage et de climatisation, et non de charges énergétiques (consommées par des équipements de chauffage et de climatisation).

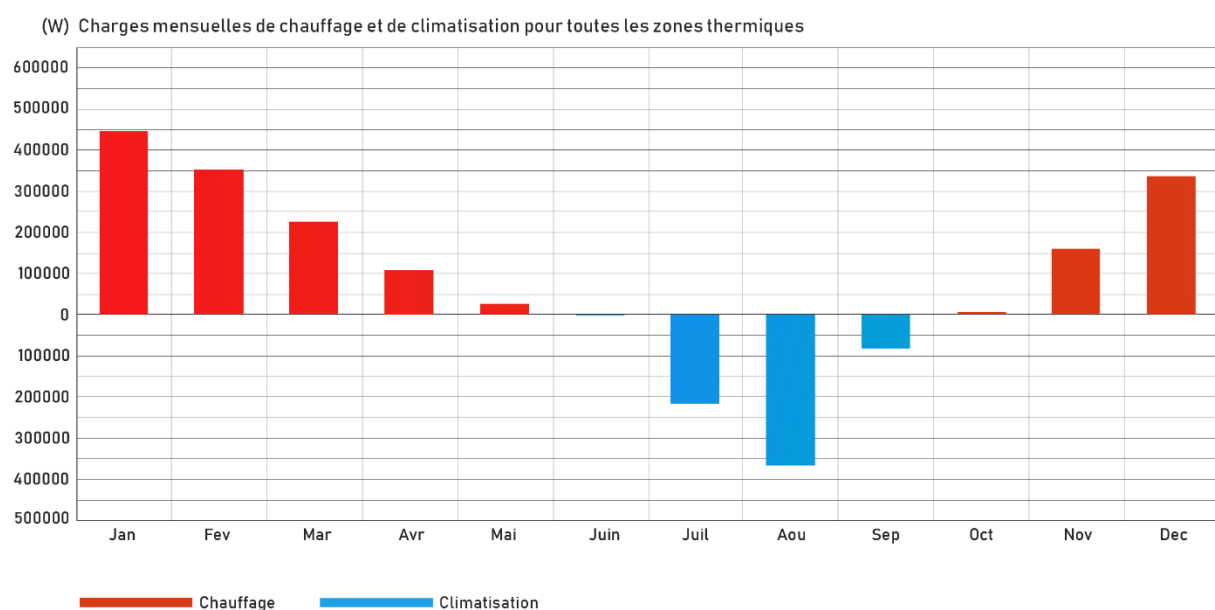


Figure 5.6: besoins énergétiques de chauffage et de climatisation pour le cas d'un plancher isolé

Les résultats obtenus et représentés sur les **Figure 1.5** et **Figure 5.6** montrent que pour les deux variantes prises, la maison présente un besoin considérable de climatisation seulement pendant les mois de Juillet, août et septembre dans le cas de la deuxième variante (plancher avec béton mousse) pendant que ce besoin s'étale pour le mois de juin pour la première variante.

Le plancher avec béton mousse permet un gain de 20% des charges de chauffage et de climatisation ; ce gain atteint la valeur de 28% durant toute la période d'hiver et 17% pendant l'été. Les rapports de calculs sont dans l'annexe **A.3**

5.7: Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les résultats de la simulation thermique multizones faite à l'aide du logiciel ECOTECT. Un bâtiment de type résidentiel a été considéré avec deux variantes pour le toit (avec et sans couche de béton mousse).

Les résultats montrent que l'isolation du toit par le béton mousse permet de réduire les besoins de chauffage et de climatisation de presque 20%.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

La croissance démographique et économique continue en Algérie ne cesse d'alourdir la facture énergétique nationale dont 40% d'elle est destiné au secteur du bâtiment. Ce contexte motive fortement la vision futuriste de l'état algérienne pour l'amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments en encourageant l'utilisation des produits d'isolation thermique performants et à faible empreinte écologique. Cela rejoint les objectifs de certains projets de Lafarge en Algérie, qui s'articulent autour de l'utilisation des mousses minérales dans des applications d'isolation thermique dans le bâtiment. Le travail fait durant mon stage de fin d'étude fait partie de l'un de ces projets.

L'étude réalisée dans ce projet de fin d'études comportait quatre axes principaux.

Dans un premier temps, le contexte énergétique en Algérie a été bien analysé, et les produits d'isolation existant sur le marché ont été bien décrits, tout en précisant l'énergie grise associée à leur production. Cela a permis de justifier notre choix de s'orienter vers la recherche d'une nouvelle solution minérale à caractère autoporteur et pouvant assurer le même niveau d'isolation des produits classiques. Cet axe d'étude fait aussi l'objet d'une synthèse bibliographique relative aux bétons légers et bétons mousse.

Par la suite, une étude de deux formulations de béton mousse a été menée, la première à partir d'un coulis de ciment à haute résistance initiale sans ajouts dans lequel nous avons incorporer une mousse aqueuse générée à partir d'un surfactant protéique. La deuxième avait pour but l'optimisation des performances mécaniques de béton mousse de la première formulation avec l'ajout des fillers calcaires dans la base cimentaire. Les résultats des essais d'identification des performances ont montré que l'utilisation de FC avec une teneur de 15% augmente la résistance à la compression à 28 jours de 40%, et diminue le retrait maximal de 13%. Les mesures de conductivité thermique de nos bétons mousse signifient qu'une couche de 15cm de ces derniers peut assurer une résistance thermique légèrement meilleure à celle du système d'isolation avec feuilles de polystyrène, l'objectif est donc atteint.

Le troisième axe de ce travail s'est intéressé à l'étude de l'effet des fillers calcaires sur la structure porale du béton mousse. A l'aide du logiciel ImageJ, une analyse d'image a été menée sur deux bétons mousse qui diffèrent en leur teneur en FC. Les résultats obtenus ont montré qu'avec une teneur de 15% en FC la distribution des pores est plus uniforme, leurs tailles sont plus grandes et leurs formes sont moins aplaties.

Le quatrième axe de cette étude fait l'objet d'une simulation thermique qui avait pour but l'estimation de l'impact de l'isolation thermique par béton mousse sur l'amélioration de l'efficacité énergétique des habitations. Le calcul a été effectué dans l'environnement de simulation ECOTECT de la firme Autodesk, sur une maison modèle supposée située à Alger. Les résultats ont montré que ce système d'isolation thermique par toit permet de réduire les besoins de chauffage et de climatisation d'environ 20%.

Nous recommandons dans le cadre du développement de ce matériau, l'utilisation des fillers calcaires de surface spécifique plus faible. Cela pourrait améliorer ces performances mécaniques selon la littérature consultée.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] G. H. BRUNDTLAND, «Rapport Brundtland (Our Common Future),» Ministère des Affaires étrangères et du Développement international, 1987.
- [2] RANDB, Michael RW, ADAMS, William M., BENNUN, Leon, et al, "Biodiversity conservation: challenges beyond 2010," 2010.
- [3] "Consommation d'énergie finale dans le monde," 2015.
- [4] M. d. l'Energie, «Bilan énergétique National 2016,» Ministère de l'Energie, Alger, 2017.
- [5] (APRUE), "Situation Energétique Régionale," Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation DE l'Energie (APRUE), 2015.
- [6] M. d. l'Energie, «Bilan Energetique National 2005,» Ministère de l'Energie, 2006.
- [7] Michel & Christophe Branchu, Isolation Thermique et Acoustique, Paris: Eyrolles, 2012.
- [8] M. d. l'Habitat, «Document Technique Réglementaire (D.T.R C 3-2): Réglementation thermique des batiments d'habitation: Règles de calcul des déperditions calorifiques,» Ministère de l'Habitat, 1997.
- [9] CNERIB, «Document Technique Réglementaire (D.T.R C 3-4): Climatisation: Règles de calcul des apports calorifiques des batiments,» Ministère de l'Habitat, 1998.
- [10] CNERIB, «Reglementation thermique Algerienne,» Cnerib, 2016.
- [11] C. (. d. D. d. E. Renouvelables), «Nouveau programme national sur l'efficacité énergétique (2016-2030),» CDER, 2015.
- [12] M. d. l'Energie, «Energies Nouvelles, Renouvelables et Maitrise de l'Energie,» Ministère de l'Energie.
- [13] "<https://conseils-thermiques.org/>".
- [14] BOUVARD, D., CHAIX, J. M., DENDIEVEL, R., FAZEKAS, A., LÉTANG, J., PEIX, G. & QUENARD, D, "Characterization and simulation of microstructure and properties of EPS lightweight concrete," Cementandconcreterearch, 2007.
- [15] A. NEVILLE, Properties of concrete, London: London Pearson Education Limited, 2011.
- [16] O. M. MA., "Lightweight foamed concrete (LFC) thermal and mechanical properties at elevated temperatures and its application to composite walling system," Manchester university, Manchester, 2010.
- [17] <http://litebuilt.com/print/hbcombo.pdf>, Applications for Litebuilt® aerated and composite concrete, litebuilt, 2014.
- [18] M. TOKYAY, CEMENT and CONCRETE MINERAL ADMIXTURES, Ankara: Taylor & Francis Group, 2016.
- [19] C. Y, Propriétés et caractéristiques des matériaux de construction pdf, E. d. moniteur, Éd., 2000.

- [20] G. Samson, «Synthèse et propriétés des mousses minérales,» Hal, 2015.
- [21] Jos Cox, Jacques Sizaire, Pascal Meulders, Elly Van Overmeire, Albert Ingelaere, Pierre Mathieu, Fabian Chupin, Le Béton Cellulaire Matériau d'Avenir, Bruxelles: La Fédération belge de Béton Cellulaire.
- [22] NARAYANAN N et RAMAMURTHY K, "Structure and properties of aerated concrete: a review," Cement and Concrete Composites, 2000.
- [23] Ravindra K Dhir, Moray D Newlands, Aikaterini McCarthy, Use of Foamed Concrete in Construction, Dundee, Scotland: Thomas Telford, 2005.
- [24] P. Stevenson, Foam Engineering Fundamentals and Applications, New Zealand: John Wiley and Sons. Ltd, 2012.
- [25] D. Aldidge, "Introduction to Foamed Concrete (What, Why, How?)," in Use of Foamed Concrete in Construction, United Kingdom, 2005.
- [26] R.-M. Guillermic, «Propriétés physico-chimiques des mousses : études approfondies sur des mousses modèles et études exploratoires sur de nouvelles mousses.,» Rennes, 2011.
- [27] J. DRANSFIELD, "Foamed Concrete: Introduction to the product and its properties," in Foamed concrete: properties, applications, University of Dundee, Scotland, 2000.
- [28] K. OZLUTAS, "BEHAVIOUR OF ULTRA-LOW DENSITY FOAMED CONCRETE," University of Dundee, Scotland, 2015.
- [29] M. G, "Manufacture and supply of ready-mix foamed concrete," in Foamed concrete: properties, applications and potential, University of Dundee, Scotland, 2000.
- [30] J.-L. S. e. L. CHOPLIN, «Mousses: Formation, formulation et propriétés,» Techniques de l'Ingénieur, 2008.
- [31] K C Brady, G R A Watts and M R Jones , Specification for foamed concrete: Application Guide AG39, United Kingdom: TRL, 2001.
- [32] M. Mohammad, "Development of foamed concrete enabling and supporting design. Thèse doctorat," University of Dundee, 2011.
- [33] K. Ramamurthy , E.K. Kunhanandan Nambiar, G. Indu Siva Ranjani, "A classification of studies on properties of foam concrete," Cement & Concrete Composites, pp. 1-9, 2009.
- [34] Xingang Yu, Lu Hu, Chao Gao and Guolin Wu, "The Effect of the Limestone on the Strength of the Foam Concrete," Advanced Materials Research, 2014.
- [35] "The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete," Cement and, 2003.
- [36] Åstrand, Johnny; Bessadi, Lynda; Johansson, Erik; Laid, Saadia; Teggour, Hocine; Toumi,, «Matériaux thermiquement isolants : béton mousse : panneaux en laine de bois,» Lund Centre for Habitat Studies, LUND UNIVERSITY, CNERIB, 1994.
- [37] E.K. Kunhanandan Nambiar et K. Ramamurthy, "Air-void characterisation of foam concrete," Cement and Concrete Research, 2007.

- [38] E.K. Kunhanandan Nambiar et K. Ramamurthy, "Air-void characterisation of foam concrete," *Cement and Concrete Research*, 2007.
- [39] VISAGIE. M. et KEARSLEY. E.P, "Micro-properties of foamed concrete," in *Specialist techniques and materials for concrete construction' from the proceedings of the International Conference 'Creating with concrete' (, University of Dundee, Scotland, 1999.*
- [40] «Méthodes d'essais des ciments détermination des résistances mécaniques,» institut algérien de normalisation, alger, 2007.
- [41] A. (. A. S. f. T. a. Materials), "Standard Test Method for Foaming Properties of Surface-Active Agents," ASTM (The American Society for Testing and Materials), 2001.
- [42] A. (. S. f. T. a. Materials), "Standard Test Method for Foaming Agents for Use in Producing Cellular Concrete Using Preformed Foam," ASTM (American Society for Testing and Materials), 2013.
- [43] E. P. Kearsley, "The effect of high volumes of ungraded fly ash on the properties of foamed concrete," University of Leeds, 1999.
- [44] S. (. M. d. Électroniques), Guide d'utilisation CT METRE, France: SMEE (Société Moderne d'Études Électroniques) , 2000.
- [45] A. (. A. S. f. T. a. Materials), "Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus," The American Society for Testing and Materials, June 1997.
- [46] L. Algérie, «Fiche technique carbonates de calcium naturel,» Algérie, Lafarge.
- [47] T. F. e. W. Rasband, " ImageJ User Guide," ImageJ, 2012.
- [48] S. Belkacemi, «Introduction Generale,» chez Cours de mécanique des sols, ENP Département de Génie Civil, 2013.
- [49] F. GAL, "Simulation thermique dynamique (STD) STD) – Maitrise des consommations d'énergie," *Techniques de l'Ingénieur*, 2015.
- [50] NEWMAN,J.B .& CHOO,B.S, *Advanced concrete technology*, Butterworth-Heinemann, 2003.

Annexes

Fiche technique du filler calcaire (page 1)

FICHE TECHNIQUE

ALGÉRIE

Carbonates de calcium naturel

La gamme des carbonates de calcium naturel se caractérise par sa très grande blancheur et sa pureté chimique.
Ses caractéristiques physico-chimiques lui permettent d'être utilisée dans toutes les applications industrielles du CaCO_3 .




Caractéristiques chimiques & physiques :

 CaCO_3 99%

MgO 0,14%

 Fe_2O_3 0,01%

PAF : Perte au feu ISO 3282	43,9%
Insoluble HCl ISO 5796/1	0,005%
PH en solution ISO 787/9	9 +/- 0,5

Dureté (Mohs)	3
Densité ISO 787/10	2,7
Indice de réfraction	1,71
Blancheur	Y=83 L*=93

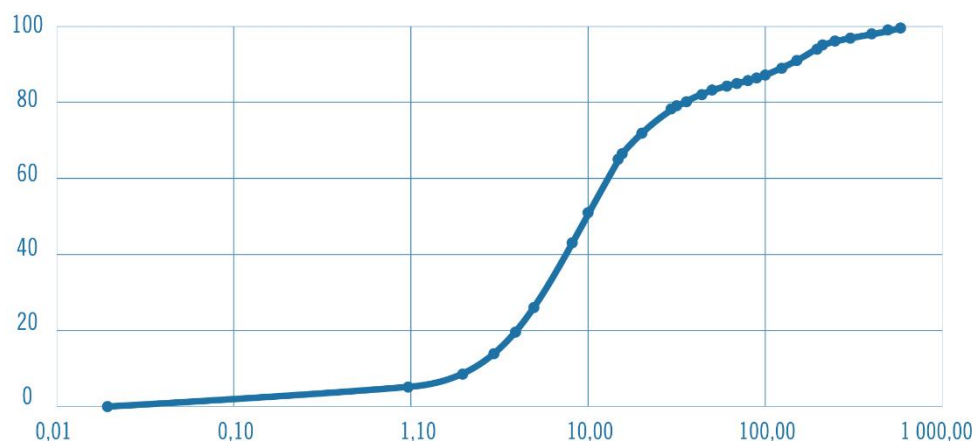
Fiche technique du filler calcaire (page 2)

Carbonates de calcium naturel

Répartition granulométrique :

Inférieur à 10 μm **50 %** Diamètre médian **10 μm** Inférieur à 200 μm **92 %**

Particle Size Distribution

**Conditionnement :**

En sac de 30 Kg/ Palettes de 28 sacs

Principales utilisations :

- Peintures
- Enduits en peinture
- Enduits à base de ciment
- Composites

- Ces informations sont basées sur nos connaissances actuelles, elles ont un caractère informatif et n'ont pas de valeur contractuelle



CMA
CEMENTS ET MORTIERS D'ALGERIE

Usine:

Région Ouest de la Zone Industrielle
de Meftah, Wilaya de Blida.

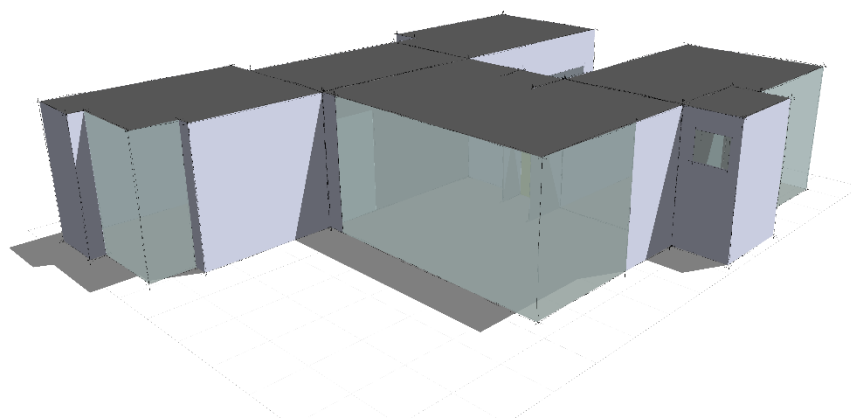
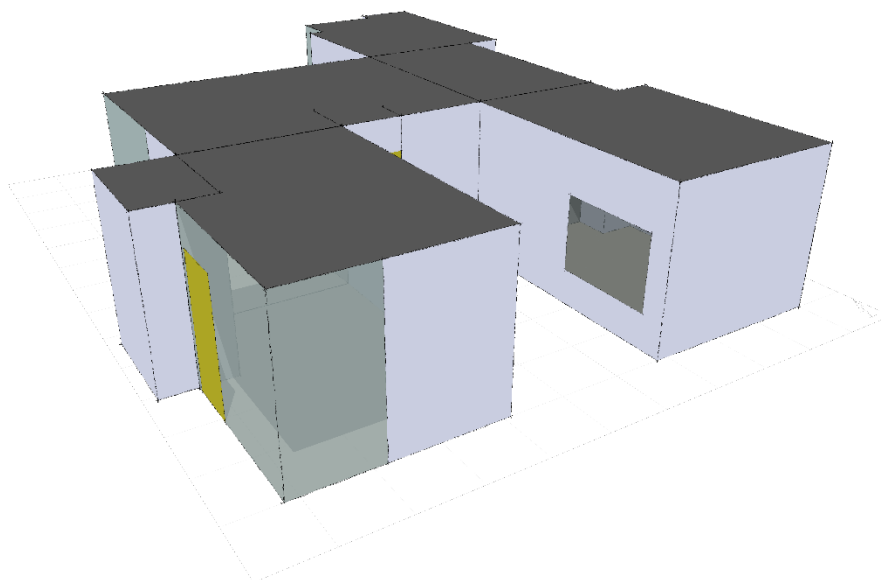
Direction Générale:

Centre Commercial Bab-Ezzouar,
5ème étage, Tour N°2, BEZ, Alger
Tél.: +213 (0) 98 54 54



Annexe A.2

Plusieurs vues du bâtiment model



Annexe A.3

**Rapport de calcul des charges mensuelles de chauffage et de climatisation
Pour la première variante**

Mois	Chauffage (Wh)	Climatisation (Wh)	Total (Wh)
Jan	530 165,00	0,00	530 165,00
Fev	421 121,00	0,00	421 121,00
Mar	267 407,00	0,00	267 407,00
Avr	129 473,00	0,00	129 473,00
Mai	35 991,00	0,00	35 991,00
Jun	0,00	13 666,00	13 666,00
Jul	0,00	337 952,00	337 952,00
Aut	0,00	498 283,00	498 283,00
Sep	0,00	104 972,00	104 972,00
Oct	6 679,00	1 862,00	8 540,00
Nov	200 250,00	0,00	200 250,00
Dec	414 552,00	0,00	414 552,00
Total	2567064	3680376	6247440
Par m ²	32772	46986	79758
Superficie m ²	78.330		

**Rapport de calcul des charges mensuelles de chauffage et de climatisation
Pour la deuxième variante**

Mois	Chauffage (Wh)	Climatisation (Wh)	Total (Wh)
Jan	448 443,00	0,00	448 443,00
Fev	354 871,00	0,00	354 871,00
Mar	224 526,00	0,00	224 526,00
Avr	106 443,00	0,00	106 443,00
Mai	29 444,00	0,00	29 444,00
Jun	0,00	6 059,00	6 059,00
Jul	0,00	221 563,00	221 563,00
Aut	0,00	371 760,00	371 760,00
Sep	0,00	85 832,00	85 832,00
Oct	4 596,00	4 892,00	9 488,00
Nov	161 646,00	14,00	161 660,00
Dec	337 975,00	0,00	337 975,00
Total	2081434	4081296	6162730
Par m ²	26573	52104	78676
Superficie m ²	78.330 m ²		