

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Amar Telidji - Laghouat



Faculté de Technologie

THÈSE DE DOCTORAT EN SCIENCES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE DOCTORAT EN GÉNIE CIVIL

Spécialité : Matériaux de construction

Présentée par :

BELHADJ Belkacem

THEME

Contribution à la valorisation des matériaux et des déchets locaux pour la formulation de bétons de sables légers isolants-porteurs destinés à la construction en milieux arides (Cas de la ville de Laghouat)

Soutenue publiquement le : 14 Avril 2016

JURY :

Monsieur M. M. KHENFER	Président du jury	Professeur	U.A.T. Laghouat
Monsieur M. BEDERINA	Rapporteur	Professeur	U.A.T. Laghouat
Madame M. QUÉNEUDEC	Co-rapporteur	Professeur	U.P.J.V. Amiens, France
Monsieur A. KRIKER	Examineur	Professeur	Université d'Ouargla
Monsieur S. GUETTALA	Examineur	M.C.A	Université de Djelfa
Monsieur Z. MAKHLOUFI	Examineur	M.C.A	U.A.T. Laghouat

REMERCIEMENTS

J'adresse mes vifs remerciements à mon encadreur le Professeur **Madani BEDERINA**, de l'université Amar TELIDJI de Laghouat, qui m'a honoré en acceptant de m'encadrer, de mener à terme cette recherche par sa contribution inestimable, sans oublier ses précieux remarques et orientations. Qu'il puisse trouver ici toute ma reconnaissance et mes respects les plus profonds.

Je remercie également mon co-encadreur madame **Michèle QUÉNEUDEC T'KINT**, Professeur à l'université de Picardie Jules Verne à Amiens en France, qui m'a fait l'honneur d'accepter de m'encadrer et qui m'a toujours offert de bonnes conditions de travail et aussi pour sa constante disponibilité durant les stages de courts durés au niveau de son laboratoire appartenant à l'unité de recherche EPROAD-IMap (Amiens), ainsi que, sa contribution inestimable à l'aboutissement de ce travail par ses précieux conseils et orientations éclairés et tant appréciés.

Je tiens à remercier le Professeur **M. M. KHENFER**, Directeur du laboratoire de recherche à l'université Amar TELIDJI de Laghouat, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de soutenance, qu'il puisse trouver ici toute l'assurance de ma respectueuse gratitude et reconnaissance. Je remercie également les examinateurs d'avoir accepté d'examiner cette thèse : messieurs **A. KRIKER**, Professeur à l'université d'Ouargla, **S. GUETTALA**, Maître de conférences à l'université de Djelfa et **Z. MAKHLOUFI**, Maître de conférences à l'université de Laghouat.

Je remercie pareillement toute l'équipe de l'unité de recherche EPROAD-IMap, de l'université de Picardie Jules Verne à Amiens en France, madame **R. M. Dheilily**, Madame **A. Goullieux** et messieurs : **N. Montrelay** et **J. Houessou** pour leurs contributions, leurs aides techniques qui m'ont été très indispensables dans l'étude expérimentale.

Enfin, je remercie tous les enseignants du département de génie-civil de l'université Amar TELIDJI de Laghouat, plus particulièrement messieurs : **A. Ferhat** et **B. Krobba**. Je remercie profondément M^r **S. Biga** responsable du laboratoire de génie civil et M^{elle} **S. Benarrache** responsable du DRX au laboratoire de physique ainsi que toute personne ayant contribué de près ou de loin dans l'élaboration de ce modeste travail.

DEDICACES

A mes très chers parents.

A ma femme qui m'a toujours soutenu et aidée.

A mes deux fils Nouredine et Mohamed.

A mes frères et sœurs.

A ma grande famille.

A tous mes amis.

SOMMAIRE

RESUMES

NOMENCLATURE

Liste des Tableaux

Liste des Figures

INTRODUCTION GENERALE 01

CHAPITRE I :

GENERALITES ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION	03
I. CONTEXTE DU DEVELOPPEMENT DURABLE	03
I. 1. Développement durable dans la construction	03
I. 2. Le béton : un matériau écologique ?	05
II. GENERALITES SUR LES PROPRIETES DES MATERIAUX	06
II. 1. Propriétés physiques des matériaux	06
II. 2. Propriétés thermiques des matériaux	07
III. SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE	09
III. 1. Béton de sable	09
III. 1. 1. Aperçu historique	09
III. 1. 2. Description du béton de sable	10
III. 1. 2. 1. Constituants du béton de sable	10
III. 1. 2. 2. Propriétés essentielles du béton de sable	11
III. 1. 3. Formulation des bétons de sables	12
III. 1. 4. Microstructure des bétons de sables	13
III. 1. 5. Intérêt et domaine d'emploi	15
III. 2. Généralités sur les bétons légers	16
III. 2. 1. Classification des bétons légers	16
III. 2. 2. Propriétés des bétons légers	17
III. 2. 3. Retrait de matrice cimentaire	18
III. 2. 4. Particularités des granulats légers	18
III. 2. 5. Les bétons de bois	19
III. 3. Ajouts minéraux cimentaires	22
III. 3. 1. Classification d'ajouts minéraux	22
III. 3. 2. Méthodes d'ajouts minéraux	22
III. 4. Ressources végétales	23
III. 4. 1. Granulats de bois	24
III. 4. 2. Paille d'orge	25
III. 5. Comportement thermo-physique de l'enveloppe bâtie	26
III. 5. 1. Stratégie bioclimatique dans les milieux arides	27
III. 5. 2. Méthode d'évaluation de la performance thermique du bâtie	28
IV. CONCLUSION	29

CHAPITRE II :

MATERIAUX UTILISES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

INTRODUCTION	30
I. LES MATIERES PREMIERES	30
I. 1. Sable	30
I. 1. 1. Granulométrie	30
I. 1. 2. Caractéristiques physiques	31
I. 1. 3. Caractéristiques chimiques	32
I. 2. Le ciment	33
I. 3. Ajouts minéraux	34
I. 3. 1. Fillers de calcaire	34
I. 3. 2. Pouzzolane naturelle	35
I. 3. 3. Chaux hydraulique	36
I. 3. 4. Composition chimique des ajouts minéraux	37
I. 4. Eau de gâchage	37
I. 5. Adjuvant	38
I. 6. Matériaux lignocellulosiques	38
I. 6. 1. Copeaux de bois	38
I. 6. 2. Paille d'orge	41
II. TECHNIQUES DE MESURE EXPERIMENTALES	43
II. 1. Maniabilité	43
II. 2. Détermination des propriétés mécaniques	44
II. 2. 1. Caractérisation des bétons	44
II. 2. 1. 1. Rupture par flexion	44
II. 2. 1. 2. Rupture par compression	44
II. 2. 1. 3. Détermination du module d'élasticité	45
II. 2. 2. Caractérisation de la paille	46
II. 3. Mesure du retrait	46
II. 4. Caractérisation thermo-physiques	47
II. 5. Porosité accessible à l'eau	47
II. 6. Analyse de la microstructure	48
III. CONCLUSION	50

CHAPITRE III :

RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

INTRODUCTION	52
I. EFFET DE SUBSTITUTION DU CIMENT PAR DES AJOUTS MINERAUX	52
I. 1. Elaboration des matériaux	52
I. 2. Résultats expérimentaux et analyse	54
I. 2. 1. Maniabilité	54
I. 2. 2. Résistance à la flexion et la compression	55
I. 2. 3. Retrait	57
I. 2. 4. Choix de la composition optimale	57
II. EFFET D'ALLEGEMENT PAR DES MATERIAUX LIGNOCELLULOSIQUES ..	59
II. 1. Elaboration des bétons légers	60
II. 2. Résultats expérimentaux et analyse	62
II. 2. 1. Maniabilité	62
II. 2. 2. Retrait	63

II. 2. 3. Propriétés thermo-physiques	64
II. 2. 3. 1. Teneur en matériaux lignocellulosiques et masse volumique	64
II. 2. 3. 2. Masse volumique sèche et porosité accessible à l'eau	64
II. 2. 3. 3. Propriétés thermiques	65
II. 2. 4. Propriétés mécaniques	67
II. 2. 4. 1. Résistance à la flexion et la compression	67
II. 2. 4. 2. Effet de la paille sur la ductilité et la ténacité	68
II. 2. 4. 3. Module d'élasticité en flexion et en compression ..	70
II. 2. 4. 4. Effet de la paille sur l'ouverture de la fissure	72
III. ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE	76
III. 1. Analyse par spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier	76
III. 2. Analyse par diffraction de rayons X	79
III. 3. Analyse par microscopie optique et électronique à balayage	82
III. 3. 1. Porosité	82
III. 3. 2. Adhérence matrice/matériaux lignocellulosiques	83
III. 3. 3. Développement des espèces	85
IV. SYNTHÈSE DES RESULTATS	88
IV. 1. Apport des ajouts minéraux	88
IV. 2. Contribution favorable de la paille d'orge	89
IV. 2. Potentiel d'utilisation des bétons de sables légers	90
V. CONCLUSION	91

CHAPITRE IV :

SIMULATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT THERMO-PHYSIQUE DES BETONS ETUDIES

INTRODUCTION	92
I. SIMULATION NUMERIQUE	92
I. 1. Stratégie bioclimatique (Cas de la ville de Laghouat)	92
I. 2. Equation de la chaleur	94
I. 3. Temps de retard, facteur d'amortissement et température sol-air	95
I. 4. Températures de surfaces du mur	96
I. 5. Méthode de simulation	98
II. RESULTATS DE LA SIMULATION	100
II. 1. Effet de l'épaisseur du mur (Mur orienté sud)	100
II. 2. Effet de l'ajout d'un vide d'air (Mur orienté sud)	105
II. 3. Effet de l'orientation du mur (Mur double paroi)	107
II. 4. Effet de l'ajout des revêtements (Mur double paroi)	111
II. 5. Synthèse des résultats	115
II. 5. 1. Zoning climatique	115
II. 5. 2. Choix du béton de sable léger	116
II. 5. 3. Avantage et mise au point du béton de sable léger	117
III. CONCLUSION	118
CONCLUSION GENERALE	120

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

RESUMES

RESUME

En Algérie, la contribution du secteur résidentiel et tertiaire à la consommation d'énergie électrique s'explique par le niveau des besoins dans les périodes estivales notamment en zones arides. La question qui se pose est alors : comment peut-on contribuer, en termes de matériaux de construction, à la réduction de la consommation d'énergie électrique en été dans les habitations en milieux arides?

Par ailleurs, dans les milieux arides, de nouveaux bétons légers destinés à la construction des murs extérieurs et des toits sont vraiment nécessaires afin de fournir une meilleure résistance thermique. La réponse à ce défi passe par la valorisation des matériaux locaux et la réutilisation des déchets industriels. Cette approche a déjà fait l'objet de nombreuses recherches ces derniers temps. C'est dans ce contexte que s'ouvrait la réflexion sur la formulation d'un béton de sable léger isolant-porteur.

Les objectifs retenus pour ce travail sont, tout d'abord, la substitution partielle ou totale des copeaux de bois déjà étudiés par un autre matériau lignocellulosique local et durable. Le choix s'est porté sur la paille d'orge. Ensuite, il s'agissait d'étudier l'application des matériaux élaborés à l'optimisation de l'inertie thermique des murs extérieurs.

Les résultats expérimentaux montrent que le béton de sable allégé par 15 kg/m³ de paille d'orge et le béton de sable allégé par (30 kg/m³ de copeaux de bois et 5 kg/m³ de paille d'orge) ont donné les meilleurs résultats pour les propriétés physico-mécaniques et structurales. L'avantage est au profit de la dernière composition. La présence de la paille d'orge a amélioré la ductilité et la ténacité ainsi que la réduction du retrait.

La simulation numérique a été faite dans le but d'apprécier le comportement thermo-physique de ces bétons destinés à la construction d'un mur extérieur dans la ville de Laghouat. On peut conclure que lorsque l'épaisseur du mur augmente, sans et avec vide d'air, le temps de retard (Φ) augmente et le facteur d'amortissement (f) diminue. Cela signifie que la résistance thermique du mur augmente. L'avantage est au profit du béton ayant des propriétés thermo-physiques améliorées. De plus, les résultats de la simulation sont conformes à la littérature. Les orientations favorables sont, donc, l'est et le sud et les orientations défavorables sont le nord et l'ouest.

Enfin, les résultats obtenus sont encourageants, prometteurs dans l'option de l'éco-conception et incitent largement à promouvoir ce type de béton léger, car il est possible de concevoir des habitations passives par les deux principes fondamentaux de l'architecture bioclimatique : l'inertie thermique et l'orientation. Cette approche que l'on peut qualifier d'éco-architecture contribue favorablement à l'amélioration du niveau de confort thermique ainsi qu'aux économies d'énergie dans les habitations en milieux arides, tel que le sud de l'Algérie.

Mots clés :

Béton de sable, bétons légers, matériaux locaux, déchets industriels, ajouts minéraux, paille d'orge, copeaux de bois, propriétés thermiques, propriétés mécaniques, microstructure, orientation du mur, inertie thermique, temps de retard, facteur d'amortissement.

ABSTRACT

In Algeria, the contribution of residential and tertiary sector to the electricity consumption is explained by the level of needs in summer periods, especially in arid areas. The question is then: how can we contribute in terms of building materials to the reduction of electrical energy consumption in summer in houses in arid environments?

In arid environments, new lightweight concretes for the construction of exterior walls and roofs are really necessary in order to provide a better thermal resistance. The answer to this challenge is through the valorisation of local materials and reuse of industrial waste. This approach has already been the subject of several researches recently. It is in this context that the reflexion on the formulation of insulation-porter lightweight sand concrete is opened.

The objectives for this work are, first of all, the partial or complete substitution of wood shavings already studied by another local and sustainable lignocellulosic material. The choice was carried on the barley straw. Then, the application of the materials developed to optimize the thermal inertia of the exterior walls was studied.

Experimental results show that the sand concrete lightened by 15 kg/m³ of barley straw and the lightweight sand concrete lightened by (30 kg/m³ of wood shavings and 5 kg/m³ of barley straw) gave the best results for the physical-mechanical and structural properties. The advantage is in favor of the latter composition. The presence of barley straw has improved the ductility and toughness as well as shrinkage reduction.

The numerical simulation was made in order to appreciate the thermophysical behavior of these concretes devoted to building an exterior wall in the city of Laghouat. We can conclude that when the thickness of the wall increases, without and with air-gap, the time lag (ϕ) increases and the decrement factor (f) decreases. This means that the thermal resistance of the wall increases. The advantage is in favor of concrete with improved thermophysical properties. Moreover, the simulation results are in accordance with the literature. The favorable orientations are, then, the east and the south, and the unfavorable orientations are the north and the west.

Finally, the results are encouraging, promising in the eco-design option and are largely incentives to promote this type of lightweight concrete, as it is possible to design passive houses using the two basic principles of bioclimatic architecture: thermal inertia and orientation. This approach that we can qualify as eco-architectural, contributes favorably to improve the level of thermal comfort and the economy of energy in houses in arid environments such as the south of Algeria.

Keywords:

Sand concrete, lightweight concrete, local materials, industrial waste, mineral additives, barley straw, wood shavings, thermal properties, mechanical properties, microstructure, wall orientation, thermal inertia, time lag, decrement factor.

ملخص

في الجزائر، مساهمة القطاع السكني و القطاع الثالث لاستهلاك الطاقة الكهربائية هو بسبب مستوى الاحتياجات في أشهر الصيف وخاصة في المناطق الجافة. لهذا فإن السؤال الذي يطرح هو: كيف يمكن أن نساهم من حيث مواد البناء للحد من استهلاك الطاقة الكهربائية في فصل الصيف في السكنات بالمناطق الجافة؟

و اعتبارا أن الخرسانة الجديدة الخفيفة بأنواعها ضرورية لبناء الجدران الخارجية والأسقف بهذه المناطق من أجل توفير أفضل مقاومة للحرارة. لذا الجواب على هذا التحدي يكون من خلال تقييم المواد المحلية وإعادة استخدام النفايات الصناعية. و في الآونة الأخيرة كان هذا النهج موضوع الكثير من الأبحاث. وفي هذا السياق، انبثقت الفكرة حول اعداد خرسانة الرمل الخفيفة.

أهداف هذا العمل: أولا استبدال جزئي أو كامل من نجارة الخشب بواسطة مواد أخرى لينيو سليلوزيك محلية ومستدامة. لذا وقع الاختيار على قش الشعير. ثانيا استخدام خرسانة معدة لتحسين أمثل للعزل الحراري للجدران الخارجية.

وقد اظهرت النتائج التجريبية أن خرسانة الرمل المخففة بنسبة 15 كغ/م³ من قش الشعير وخرسانة الرمل المخففة بنسبة (30 كغ/م³ من نجارة الخشب و 5 كغ/م³ من قش الشعير) أعطت خصائص فيزيائية-ميكانيكية وبنية مجهرية أفضل. الفائدة هي لصالح خرسانة الرمل المخففة الثانية. وجود قش الشعير عززت الليونة والمتانة وكذلك تقليل الانكماش. من جهة أخرى تم اجراء دراسة نظرية (صورية بإصدار إشارات متطابقة مع القياسات) بهدف تقييم التفاعل الحراري-الفيزيائي للخرسانة المدروسة لبناء الجدار الخارجي في مدينة الأغواط. يمكننا أن نستنتج أنه عندما يزيد سمك الجدار، دون أو مع الفراغ الهوائي، تزيد مدة التأخير (Φ) و يقل عامل التخفيف (f). الفائدة هي لصالح الخرسانة ذات الخصائص الحرارية-الفيزيائية المحسنة. وعلاوة على ذلك، فإن نتائج الدراسة النظرية (صورية بإصدار إشارات متطابقة مع القياسات) هي وفقا للمراجع. الاتجاهات الملائمة هم الشرق والجنوب والاتجاهات غير الملائمة هم الشمال والغرب.

و في الأخير فإن النتائج المتحصل عليها هي مشجعة و تعد بالكثير، واعدة بالنسبة لوضع تصميم إيكولوجي وتشجع على نطاق واسع تعزيز هذا النوع من الخرسانة الخفيفة. لأنه من الممكن تصميم سكنات سالية من قبل اثنين من المبادئ الأساسية للهندسة المعمارية المناخية (الخمول الحراري والاتجاه). هذا النهج الذي يمكن وصفه بالهندسة المعمارية البيئية يساهم بشكل ايجابي في تحسين مستوى الرفاهية الحرارية واقتصاد الطاقة في السكنات بالمناطق الجافة مثل الجنوب الجزائري.

الكلمات المفتاحية :

خرسانة الرمل، الخرسانة الخفيفة، المواد المحلية، النفايات الصناعية، المضافات المعدنية، قش الشعير، نجارة الخشب، الخواص الحرارية، الخواص الميكانيكية، البنية المجهرية، اتجاه الجدار، الخمول الحراري، مدة التأخير، عامل التخفيف.

NOMENCLATURE

E_T	: Eau totale de la composition (l/m ³).
E_M	: Eau de mélange de la composition (l/m ³).
E_{Abs}	: Eau d'absorption des matériaux lignocellulosiques (l/m ³).
E_{T/C}	: Eau totale / ciment
Q	: Densité de flux de chaleur (W/m ²).
k	: Conductivité thermique (W/mK).
grad T	: Gradient de température.
a	: Diffusivité thermique (m ² /s).
ρ	: Masse volumique du matériau (kg/m ³).
cp	: Chaleur spécifique massique (J/kgK).
SA	: Sable alluvionnaire.
SD	: Sable dunaire.
SAD	: Sable alluvionnaire-dunaire.
γ	: Masse volumique apparente du sable (kg/m ³).
γ_s	: Masse volumique absolu du sable (kg/m ³).
MF	: Module de finesse.
ES_v	: Equivalent de sable visuel.
ES_p	: Equivalent de sable au piston.
C_p	: Compacité.
C_{ab}	: Coefficient d'absorption d'eau (%).
A	: Affaissement (cm).
SP	: Adjuvant « super-plastifiant ».
ML	: Matériaux lignocellulosiques.
BSML	: Béton sans matériaux lignocellulosiques.
BAP-5	: Béton allégé par 5 kg/m ³ de paille d'orge.
BAP-10	: Béton allégé par 10 kg/m ³ de paille d'orge.
BAP-15	: Béton allégé par 15 kg/m ³ de paille d'orge.
BAP-20	: Béton allégé par 20 kg/m ³ de paille d'orge.
BACP-35 ..	: Béton allégé par 30 kg/m ³ de copeaux de bois et 5 kg/m ³ de paille d'orge.
BAC-60	: Béton allégé par 60 kg/m ³ de copeaux de bois.
T_{se}	: Température de la surface extérieure du mur (°C).
T_{si}	: Température de la surface intérieure du mur (°C).
Φ	: Temps de retard (h).
f	: Facteur d'amortissement.
t_{Tse (max)}	: Temps auquel la température de surface extérieure du mur est maximale.
t_{Tsi (max)}	: Temps auquel la température de surface intérieure du mur est maximale.
h	: Heures.
G	: Grossissement

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I : **GENERALITES ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

Tableau I. 1 : Quelques compositions des bétons de sable	13
Tableau I. 2 : Classification des bétons légers selon CSTB	16
Tableau I. 3 : Propriétés thermo-physiques de quelques types de bois	25

CHAPITRE II : **MATERIAUX UTILISES** **ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES**

Tableau II. 1 : Caractéristiques physiques des sables	31
Tableau II. 2 : Analyse chimique du ciment utilisé en (%)	34
Tableau II. 3 : Analyse chimique des ajouts minéraux	37
Tableau II. 4 : Résultats d'essai de traction d'une paille d'orge	42
Tableau II. 5 : Classes de consistance du béton	44

CHAPITRE III : **RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE**

Tableau III. 1 : Propriétés mécaniques des bétons étudiés de 05% d'ajout	55
Tableau III. 2 : Propriétés mécaniques des bétons étudiés de 10% d'ajout	55
Tableau III. 3 : Propriétés mécaniques des bétons étudiés de 15% d'ajout	56
Tableau III. 4 : Propriétés mécaniques et retraits des bétons étudiés	58
Tableau III. 5 : Compositions des différents bétons étudiées	61
Tableau III. 6 : Rapport E_T/C et consistance des différents bétons étudiés	63
Tableau III. 7 : Retraits des différents bétons étudiés	63
Tableau III. 8 : Propriétés thermo-physiques des bétons étudiés	65
Tableau III. 9 : Propriétés mécaniques des bétons étudiés	67
Tableau III. 10 : Module d'élasticité en flexion et en compression des bétons étudiés .	71

CHAPITRE IV :
SIMULATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT
THERMO-PHYSIQUES DES BETONS ETUDIES

Tableau IV. 1 : Temps de retard et facteur d'amortissement pour différentes épaisseurs des murs et bétons étudiés	102
Tableau IV. 2 : Temps de retard et facteur d'amortissement des murs (à une seule paroi et double paroi) et bétons étudiés	107
Tableau IV. 3 : Temps de retard et facteur d'amortissement pour différentes orientations des murs sans revêtements pour les différents bétons étudiés	110
Tableau IV. 4 : Propriétés thermo-physiques des revêtements du mur	111
Tableau IV. 5 : Temps des températures maximales et minimales des murs extérieurs et intérieurs (BSML)	111
Tableau IV. 6 : Temps des températures maximales et minimales des murs extérieurs et intérieurs (BAP-15)	112
Tableau IV. 7 : Temps des températures maximales et minimales des murs extérieurs et intérieurs (BACP-35)	112
Tableau IV. 8 : Temps des températures maximales et minimales des murs extérieurs et intérieurs (BAC-60)	112
Tableau IV. 9 : Temps de retard et facteur d'amortissement pour différentes orientations des murs des bétons étudiés avec revêtements	113
Tableau IV. 10 : Effet des revêtements sur le temps de retard et le facteur d'amortissement pour différentes orientations des murs des bétons étudiés	114

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : GENERALITES ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Fig. I. 1 : Les trois piliers du développement durable	04
Fig. I. 2 : Inertie thermique de quelques matériaux	09
Fig. I. 3 : Retrait total	12
Fig. I. 4 : Aspect général du béton de sable (G=29)	14
Fig. I. 5 : Aspect des grains de sable dans la pâte (G=60)	14
Fig. I. 6 : Aspect des hydrates (G=5000)	15
Fig. I. 7 : Conductivité thermique pour quelques bétons de granulats légers	17
Fig. I. 8 : Evolution de la conductivité thermique des bétons étudiés	20
Fig. I. 9 : Différents traitements des copeaux de bois	21
Fig. I. 10 : Aspects des copeaux de bois à différentes échelles	25
Fig. I. 11 : Représentation schématique du temps de retard et facteur d'amortissement..	28
Fig. I. 12 : Position des sondes à l'intérieure de la paroi	28

CHAPITRE II : MATERIAUX UTILISES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

Fig. II. 1 : Courbe granulométrique des sables utilisés	31
Fig. II. 2 : Analyse chimique du sable de dune	32
Fig. II. 3 : Analyse chimique du sable alluvionnaire	33
Fig. II. 4 : Analyse chimique par DRX du ciment portland au calcaire	34
Fig. II. 5 : Analyse chimique par DRX des fillers de calcaire	35
Fig. II. 6 : Analyse chimique par DRX de la pouzzolane naturelle	36
Fig. II. 7 : Analyse chimique par DRX de la chaux hydraulique	36
Fig. II. 8 : Aspect général des copeaux de bois	39
Fig. II. 9 : Analyse granulométrique des copeaux de bois	40
Fig. II. 10 : Absorption d'eau des matériaux lignocellulosiques	41
Fig. II. 11 : Aspect général de la paille d'orge	42
Fig. II. 12 : Déplacement en fonction de la force de traction	43
Fig. II. 13 : Dispositif utilisé pour l'essai de rupture à la flexion	44

Fig. II. 14 : Dispositif de rupture en compression	45
Fig. II. 15 : Presse de type Shimadzu	45
Fig. II. 16 : Instrument de type Shimadzu	46
Fig. II. 17 : Appareillage pour la mesure du retrait	46
Fig. II. 18 : Instrument de mesure des propriétés thermo-physiques «Hot Disk TPS 500» et la sonde	47
Fig. II. 19 : Instrument de mesure de la porosité accessible à l'eau	48
Fig. II. 20 : Shimadzu IR Prestige-21	49
Fig. II. 21 : X'Pert PHILIPS	49
Fig. II. 22 : Imagerie optique et loupe binoculaire	50

CHAPITRE III : **RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE**

Fig. III. 1 : Maniabilité des bétons étudiés	54
Fig. III. 2 : Résistance à la compression à 90 jours des bétons à base de différents types et teneurs en addition minérale	56
Fig. III. 3 : Retrait des bétons étudiés à 90 jours	57
Fig. III. 4 : Résistance à la compression à 28 et 90 jours des différents des bétons étudiés	58
Fig. III. 5 : Relation entre la teneur en matériaux lignocellulosiques et le rapport E_T/C	62
Fig. III. 6 : Relation entre la masse volumique et la teneur en matériaux lignocellulosiques	64
Fig. III. 7 : Relation entre la masse volumique sèche et la porosité accessible à l'eau	65
Fig. III. 8 : Relation entre la masse volumique et la conductivité thermique	66
Fig. III. 9 : Relation entre la résistance à la compression et la masse volumique	67
Fig. III. 10 : Relation entre le rapport E_T/C et la résistance à la compression	68
Fig. III. 11 : Fissuration de l'éprouvette après l'essai de flexion et compression	69
Fig. III. 12 : Adhérence matériaux lignocellulosiques et matrice cimentaire	70
Fig. III. 13 : Relation entre le module d'élasticité en flexion et la contrainte maximale en flexion	71
Fig. III. 14 : Déplacement en fonction de la contrainte maximale des bétons étudiés ...	72
Fig. III. 15 : Béton allégé par la paille d'orge	73
Fig. III. 16 : Effet de la paille d'orge sur la ductilité (Partie basse)	73

Fig. III. 17 : Adhérence de la paille d'orge / la matrice (Partie basse)	73
Fig. III. 18 : Effet de l'orientation de paille d'orge / la force (Partie basse)	73
Fig. III. 19 : Béton allégé par les copeaux de bois et la paille d'orge	74
Fig. III. 20 : Effet des fibres des copeaux de bois et de la paille d'orge sur la ductilité	74
Fig. III. 21 : Effet du grain de sable et de la fibre sur la déviation de la fissure	74
Fig. III. 22 : Fissuration du béton (BAP-15)	75
Fig. III. 23 : Spectre du béton sans et avec ajouts minéraux	76
Fig. III. 24 : Spectre des bétons allégés par des matériaux lignocellulosiques	78
Fig. III. 25 : Diffractogramme du béton de sable sans ajouts minéraux	80
Fig. III. 26 : Diffractogramme du béton de sable avec ajouts minéraux	80
Fig. III. 27 : Diffractogramme des bétons de sables allégés par des matériaux lignocellulosiques	81
Fig. III. 28 : Porosité des bétons étudiés	82
Fig. III. 29 : Adhérence matrice/granulats par MEB	83
Fig. III. 30 : Adhérence matrice/copeaux de bois	84
Fig. III. 31 : Adhérence matrice/paille d'orge	85
Fig. III. 32 : Développement des espèces	86
Fig. III. 33 : Espèces de nature calcique	87
Fig. III. 34 : Espèces dans le vide de la paille	87
Fig. III. 35 : Structure alvéolée de la paille	88
Fig. III. 36 : Relation entre la masse volumique et le rapport (Rf/Rc) à 28 jours	89

CHAPITRE IV :

SIMULATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT THERMO-PHYSIQUE DES BETONS ETUDIES

Fig. IV. 1 : Température moyennes mensuelles de l'année 2012	93
Fig. IV. 2 : Carte nationale des zones climatiques	94
Fig. IV. 3 : Schéma du transfert de chaleur dans un mur extérieur	94
Fig. IV. 4 : Représentation schématique du temps de retard (Φ) et du facteur d'amortissement (f)	95
Fig. IV. 5 : Les différents nœuds étudiés dans les couches de la paroi	97
Fig. IV. 6 : Effet de l'épaisseur du mur en (BSML) sur Tsi	100
Fig. IV. 7 : Effet de l'épaisseur du mur en (BAP-15) sur Tsi	101
Fig. IV. 8 : Effet de l'épaisseur du mur en (BACP-35) sur Tsi	101

Fig. IV. 9 : Effet de l'épaisseur du mur en (BAC-60) sur Tsi	102
Fig. IV. 10 : Relation entre l'épaisseur du mur et le temps de retard des différents bétons étudiés	103
Fig. IV. 11 : Relation entre l'épaisseur du mur et le facteur d'amortissement des différents bétons étudiés	104
Fig. IV. 12 : Relation entre le temps de retard et le facteur d'amortissement des différents bétons étudiés	104
Fig. IV. 13 : Température de surface extérieure et intérieure des murs de 25 cm et (10+5+10) cm en (BSML)	105
Fig. IV. 14 : Température de surface extérieure et intérieure des murs de 25 cm et (10+5+10) cm en (BAP-15)	106
Fig. IV. 15 : Température de surface extérieure et intérieure des murs de 20 cm et (10+5+10) cm en (BACP-35)	106
Fig. IV. 16 : Température de surface extérieure et intérieure des murs de 20 cm et (10+5+10) cm en (BAC-60)	107
Fig. IV. 17 : Température de surface extérieure et intérieure du mur en (BACP-35) d'épaisseur (10+5+10) cm orienté vers le sud	108
Fig. IV. 18 : Température de surface extérieure et intérieure du mur en (BACP-35) d'épaisseur (10+5+10) cm orienté vers l'est	108
Fig. IV. 19 : Température de surface extérieure et intérieure du mur en (BACP-35) d'épaisseur (10+5+10) cm orienté vers le nord	109
Fig. IV. 20 : Température de surface extérieure et intérieure du mur en (BACP-35) d'épaisseur (10+5+10) cm orienté vers l'ouest	109
Fig. IV. 21 : Effet de l'orientation et la teneur en matériaux lignocellulosiques sur le facteur d'amortissement	110
Fig. IV. 22 : Effet orientation des murs avec revêtements et teneur en matériaux lignocellulosiques sur le facteur d'amortissement	114
Fig. IV. 23 : Zoning climatique	115
Fig. IV. 24 : Effet des revêtements et l'orientation des murs sur le temps de retard - Cas du mur à double paroi -	116
Fig. IV. 25 : Effet des revêtements et l'orientation des murs sur le facteur d'amortissement - Cas du mur à double paroi -	117

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

En Algérie, le secteur résidentiel et tertiaire se trouve parmi les secteurs les plus énergivores [1], c'est l'un des soucis majeurs exprimés dans le cadre du modèle de consommation énergétique algérienne. La contribution de ce secteur s'explique par le niveau de consommation d'énergie électrique dans les périodes estivales notamment en zones arides qui occupent presque les trois quarts de la superficie du pays. Cela, est principalement dû à l'utilisation des systèmes de climatisation afin d'améliorer les conditions de confort thermique. La question qui se pose est alors : **Comment peut-on contribuer, en termes de matériaux de construction, à la réduction de la consommation d'énergie électrique en été dans les habitations en milieux arides?**

Par ailleurs, dans les milieux arides, de nouveaux bétons légers destinés à la construction des murs extérieurs et des toits sont vraiment nécessaires afin de fournir une meilleure résistance thermique et à rivaliser avec les matériaux de construction traditionnels (bloc de béton, brique, etc.) [2]. La réponse à ce défi passe par une exploitation rationnelle des matériaux locaux dont dispose notre pays. La **valorisation des matériaux locaux** est donc devenue une solution nécessaire à la résolution des problèmes économiques. De même les grandes quantités de déchets résultant chaque jour des différents travaux industriels constituent une gêne environnementale et soulèvent des problèmes particulièrement difficiles à résoudre. **Leur réutilisation** dans la construction pourrait résoudre un triple problème : problèmes environnementaux, économiques et techniques. Cette approche a également fait l'objet de nombreuses recherches ces derniers temps [3].

C'est dans ce contexte que s'ouvrirait la réflexion sur la formulation d'un **béton de sable léger isolant-porteur** qui utiliserait des ressources abondantes, peu ou pas exploitées, et présenterait, soit des caractéristiques comparables à celles des bétons légers usuels, soit des caractéristiques répondant à certaines exigences mal assurées par ces derniers.

La visée initiale de cette recherche est la continuité d'une étude relative aux bétons de sable allégés par des copeaux de bois réalisée dans le but d'améliorer leurs propriétés thermo-physiques pour la construction des murs extérieurs en milieux arides (cas de la ville de Laghouat).

Les objectifs retenus pour ce travail sont :

- ✚ La substitution partielle ou totale des copeaux de bois par un autre matériau lignocellulosique local, annuellement renouvelable et disponible en grande quantité sans affecter les propriétés du béton. Le choix s'est porté sur la paille d'orge.
- ✚ L'application des matériaux élaborés à l'optimisation de l'inertie thermique des murs extérieurs. Cette inertie thermique est en effet un principe de base de l'architecture bioclimatique en milieux arides.

La première partie de ce travail est donc une étude expérimentale dans le but de déterminer la composition optimale qui constitue le meilleur compromis entre les résultats obtenus, à savoir, les caractéristiques des bétons frais, les propriétés thermo-physiques et mécaniques du béton durci, le retrait et l'analyse de la microstructure. La deuxième partie est consacrée à une simulation numérique par le logiciel EnergyPlus afin d'apprécier le comportement thermo-physique des bétons étudiés pour la construction d'un mur extérieur.

La thèse est constituée de quatre chapitres :

➤ Le premier a pour objectif une étude bibliographique sur le contexte du développement durable dans la construction, généralités sur les propriétés des matériaux de construction, les bétons de sables, les bétons légers, les ajouts minéraux pour une matrice cimentaire, les copeaux de bois et la paille de l'orge. A la fin de ce chapitre, on trouvera une présentation sommaire des propriétés thermo-physiques du mur extérieur.

➤ Le deuxième chapitre fait l'objet de la présentation des caractéristiques générales des matériaux utilisés dans les différentes compositions étudiées, ainsi qu'une description des différentes techniques de mesures expérimentales utilisées dans cette étude.

➤ Le troisième chapitre est consacré à la synthèse et à l'analyse des résultats expérimentaux. Il comprend lui-même 4 parties : tout d'abord l'effet des ajouts minéraux pour déterminer la composition optimale du béton de sable, ensuite, l'effet de l'allègement par les copeaux de bois et la paille de l'orge, séparés et en combinaison. Une troisième partie est consacrée à l'analyse de la microstructure et est suivie d'une synthèse des résultats.

➤ Dans le quatrième chapitre une simulation numérique permet d'anticiper le comportement thermo-physique des bétons étudiés pour la construction des murs extérieurs en milieux arides.

Enfin, une conclusion générale est présentée et est suivie de quelques perspectives sur les axes potentiellement exploitables dans la continuité du champ de la recherche investiguée.

PREMIER CHAPITRE

Généralités et synthèse bibliographique

CHAPITRE I : **GENERALITES ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

INTRODUCTION

Le développement des éco-matériaux dans la construction est une approche environnementale et durable, dont les enjeux se déclinent en termes de changement climatique (limitation du gaz à effet de serre), d'économies des ressources naturelles, de santé et de confort [4]. Par ailleurs, les considérations environnementales et économiques exigent la préservation des granulats minéraux, l'utilisation des coproduits végétaux dans l'objectif de la valorisation de la plante entière et la réduction de la consommation d'énergie pendant la fabrication et l'utilisation des matériaux [5].

Ces considérations ont conduit à ce travail dont, la particularité réside, à la fois, dans la manière de traiter la problématique scientifique liée à ce genre de matériau et dans le sujet d'étude lui-même. Cette étude est basée sur une approche globale, avec une analyse croisée des propriétés thermo-physiques, des propriétés mécaniques et structurales. Celle-ci explique, à la fois, la difficulté et l'intérêt d'une étude globale pour laquelle nous avons essayé de synthétiser les informations trouvées dans la bibliographie. Ce chapitre comprend le contexte du développement durable et quelques généralités sur les propriétés des matériaux. La synthèse bibliographique comprend les bétons de sables, les bétons légers, les ajouts minéraux, les copeaux de bois ainsi que la paille d'orge, enfin, le comportement thermo-physiques des murs extérieurs en milieux arides.

I. CONTEXTE DU DEVELOPPEMENT DURABLE

I. 1. DEVELOPPEMENT DURABLE DANS LA CONSTRUCTION

La prise en compte du développement durable dans le domaine de la construction devrait conduire ces prochaines années à la mise au point de nouveaux concepts, matériaux et techniques, en particulier pour les produits cimentaires [4]. Deux conditions constituent la base de ce principe [6] :

- a) Un raisonnement selon une approche intégrée : prise en compte simultanée des critères techniques, économiques, environnementaux et sociaux.

b) L'ingénierie du développement durable doit reposer sur un raisonnement à long terme qui se traduit par la prise en compte des différentes étapes de la vie de la construction : conception, fabrication, réalisation, exploitation, réhabilitation et démolition.

C'est pourquoi, les exigences principales du développement durable dans la construction sont la réduction de la consommation d'énergie, de l'émission de gaz, mais aussi de l'usage de l'eau, etc. Toutefois, les facteurs de succès de la démarche de développement durable dans le secteur du bâtiment doivent prendre en compte trois piliers (Fig. I. 1).

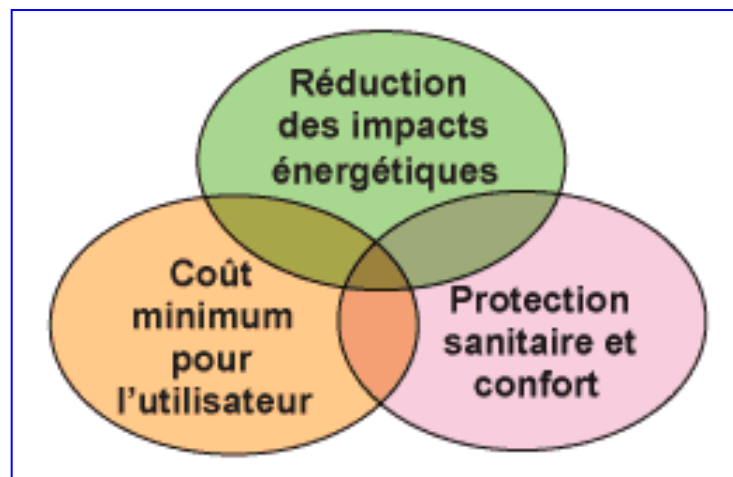


Fig. I. 1. Les trois piliers du développement durable [7]

1) L'économie

L'approche du coût global vise à optimiser le coût tout au long du cycle de vie et non pas aux coûts d'investissement en ignorant les coûts futurs d'exploitation et de maintenance.

2) L'environnement

Il convient de mesurer l'impact des produits et des ouvrages sur l'environnement à chacune des phases de leur cycle de vie : extraction des ressources, consommation d'énergie, pollution de l'eau, de l'air, production et gestion de déchets, etc.

3) Le social

Le bâti participe aux conditions du bien être social et doit prendre en compte des critères psychologiques comme l'acceptation sociale de certaines innovations technologiques.

I. 2. LE BETON : UN MATERIAU ECOLOGIQUE ?

Il est pratiquement impossible d'imaginer un monde sans béton. Toutefois, il est possible d'améliorer son impact environnemental par une utilisation durable des ressources et sa composition [8]. Les objectifs visés à travers le développement des éco-matériaux sont nombreux, on peut citer à titre d'exemple : l'utilisation des matériaux locaux, la réutilisation des déchets, la réduction des émissions de CO₂, la durabilité des matériaux et enfin, la performance énergétique et l'économie d'énergie. Citons quelques approches contribuant aux développements des éco-matériaux dans la construction :

1) BETON DE SABLE

Dans une perspective de la prise en compte des problèmes d'environnement, d'utilisation rationnelle et optimale des matériaux locaux ainsi que la réutilisation des déchets industriels, le béton de sable connaît un renouveau, en raison de ses propriétés spécifiques. Celles-ci sont autant de réponses adaptées à des problèmes parfois mal résolus par le béton traditionnel tels que, les bétons non vibrés, la projection, les techniques de reprises en sous œuvre, les préfabrications d'éléments devant rester apparents et les effets architectoniques variés [9].

2) AJOUTS MINERAUX

Les émissions de CO₂ libéré dans l'atmosphère sont de 900 kg pour produire une tonne de ciment [10], ce qui a un effet négatif sur l'environnement. Dans ce contexte, l'utilisation des ajouts minéraux peut apporter une amélioration des propriétés mécaniques et de durabilité du béton, tout en permettant de réduire la consommation en ciment, contribuant ainsi de manière simple et économique à résoudre les problèmes liés à l'environnement [11].

3) DECHETS LIGNOCELLULOSIQUES

Une grande quantité de déchets lignocellulosiques est générée dans le monde entier et est à l'origine de divers problèmes environnementaux. L'utilisation de ces déchets dans la fabrication des matériaux de construction liés au ciment peut réduire ces problèmes [12]. Toutefois, la formulation des bétons légers par des matériaux lignocellulosiques locaux est une façon de contribuer au développement durable dans le secteur de la construction [4]. Dans diverses littératures on observe que les matériaux de construction fabriqués à partir

de divers matériaux agro-déchets sont relativement durables, moins chers, faible conductivité thermique et respectueux de l'environnement [13].

4) ECO-CONCEPTION

L'éco-conception suppose que l'on prenne en compte, dans la démarche globale d'élaboration d'un matériau composite, des critères d'impact sur l'environnement et sur la santé pour toute la durée de vie du matériau, au même titre que les objectifs techniques et économiques. Les composites à fibres végétales représentent une alternative intéressante à des solutions plus polluantes [14].

II. GENERALITES SUR LES PROPRIETES DES MATERIAUX

II. 1. PROPRIETES PHYSIQUES DES MATERIAUX

Les principales propriétés physiques des matériaux solides ou granulats sont comme suit :

1) Masse volumique apparente

C'est la masse du matériau par unité de volume qui intègre à la fois les grains et les vides.

$$\gamma = M / V \quad (\text{I. 1})$$

où M : est la masse du matériau ;

et V : est le volume total du matériau.

2) Masse volumique absolue

C'est la masse par unité de volume de la matière qui constitue le granulat sans tenir compte des vides pouvant exister dans ou entre les grains.

$$\gamma_s = M_s / V_s \quad (\text{I. 2})$$

où M_s : est la masse du matériau;

et V_s : est le volume total du matériau solide.

3) Module de finesse

Le module de finesse des sables est défini par :

$$MF = [\sum \text{des refus (en \%)} \text{ sur les tamis } 0.16-0.315-0.63-1.25-2.5 \text{ et } 5.0] / 100 \quad (\text{I. 3})$$

4) Compacité

C'est le rapport de volume du matériau solide au volume total. Elle est définie par :

$$C_p = V_s / V = 1 - P = \gamma / \gamma_s \quad (\text{I. 4})$$

où P : est la porosité.

5) Porosité

La porosité est déterminée d'après la formule suivante :

$$P = 1 - C_p \quad (\text{I. 5})$$

6) Equivalent de sable

Le but de l'essai d'équivalent de sable est l'évaluation de l'indice quantifiant la propriété d'un sable entrant dans la composition du béton. Cet essai, référencé par la norme européenne EN 933-8, est effectué sur la fraction 0/5 mm du matériau à étudier. Le tamisage se fait par voie humide afin de ne pas perdre d'éléments fins. Ensuite on lave l'échantillon, selon un processus normalisé, et on laisse reposer le tout. Au bout de 20 minutes, on prend les mesures suivantes :

- La hauteur h_1 : sable propre + éléments fins.
- La hauteur h_2 : sable propre seulement.

D'où, on déduit l'équivalent de sable par la formule suivante :

$$ES = (h_2 / h_1) \times 100 \quad (\text{I. 6})$$

Selon que la hauteur h_2 est mesurée visuellement ou à l'aide d'un piston, on détermine :

ESv (équivalent de sable visuel) ou **ESp** (équivalent de sable au piston).

7) CAPACITE D'ABSORPTION D'EAU

Cette caractéristique permet la connaissance des qualités d'absorption d'eau de mouillage des matériaux lignocellulosiques, autrement dit de leur avidité en eau. Le coefficient d'absorption en eau (C_{ab}) a été déterminé selon les prescriptions de la norme européenne EN 1097-6.

$$C_{ab} (\text{en}\%) = [(M_h - M_s) / M_s] \times 100 \quad (\text{I. 7})$$

où M_s : Masse des matériaux lignocellulosiques sec (en kg).

et M_h : Masse des matériaux lignocellulosiques après immersion pendant au moins 48 h (en kg).

L'échantillon doit rester dans l'eau jusqu'à ce que la différence entre deux pesées successives à 24 h soit inférieure à 0,2% de la masse de l'échantillon humide.

II. 2. PROPRIETES THERMIQUES DES MATERIAUX

La thermique est le domaine de la physique qui traite des transferts de chaleur accompagnés ou non d'échanges de masse et de changements d'état. Ces transferts se produisent lorsque des écarts de température liés à un processus physique ou chimique quelconque, apparaissent. Ils s'effectuent selon trois mécanismes désignés sous les termes

de conduction, de convection et de rayonnement. Les principales propriétés thermiques des matériaux sont comme suit :

1) CONDUCTIVITE THERMIQUE

La théorie de la conduction repose sur la relation proposée par Joseph Fourier en 1822, qui exprime que la densité de flux de chaleur (**Q**) est proportionnelle au gradient de température, et que la chaleur s'écoule de la source chaude à la source froide, en tendant à diminuer l'amplitude du gradient :

$$\mathbf{Q = - k \ grad T.} \quad \mathbf{(I. 8)}$$

Le coefficient de proportionnalité (**k**) s'appelle la conductivité thermique (W/mK), c'est une constante thermo-physique caractérisant le comportement des matériaux lors du transfert de chaleur par conduction.

2) CHALEUR SPECIFIQUE

La chaleur spécifique volumique noté (ρc où **C**) en ($J.K^{-1}.m^{-3}$) traduit l'aptitude d'un matériau à emmagasiner de l'énergie calorifique. Ce stockage d'énergie se manifeste, par exemple, par l'augmentation de la température du matériau. La chaleur spécifique volumique ne dépend que de la température et de la composition du milieu considéré.

3) DIFFUSIVITE THERMIQUE

la diffusivité thermique (**a**), représente la vitesse à laquelle les changements de température peuvent avoir lieu dans une masse de béton, elle représente donc un indice de la facilité avec laquelle un béton peut subir des changements de température. La diffusivité est liée à la conductivité thermique (**k**) par l'équation :

$$\mathbf{a = k / \rho c p} \quad \mathbf{(I. 9)}$$

où (**cp**) est la chaleur spécifique massique et (**\rho**) est la masse volumique du béton.

4) INERTIE THERMIQUE

L'inertie thermique joue un rôle d'amortisseur sur les variations de température et contribue à la stabilité de celles-ci. Elle permet aussi de stocker la chaleur du soleil durant la journée en hiver et la fraîcheur en été. La propriété d'une construction à forte inertie thermique est de conserver une température stable et ensuite de se réchauffer ou se refroidir très lentement. L'inertie thermique est, en fait, liée aux matériaux et à la manière dont on construit un bâtiment.

La Fig. I. 2. montre l'inertie thermique de quelques matériaux. Lorsque l'épaisseur de la paroi augmente, le temps de retard ou le temps de déphasage augmente suivant une tendance linéaire. L'inertie thermique des matériaux possède donc une grande influence sur le confort d'été, et doit donc être considérée dans la conception bioclimatique de la construction, notamment dans les régions les plus chaudes.

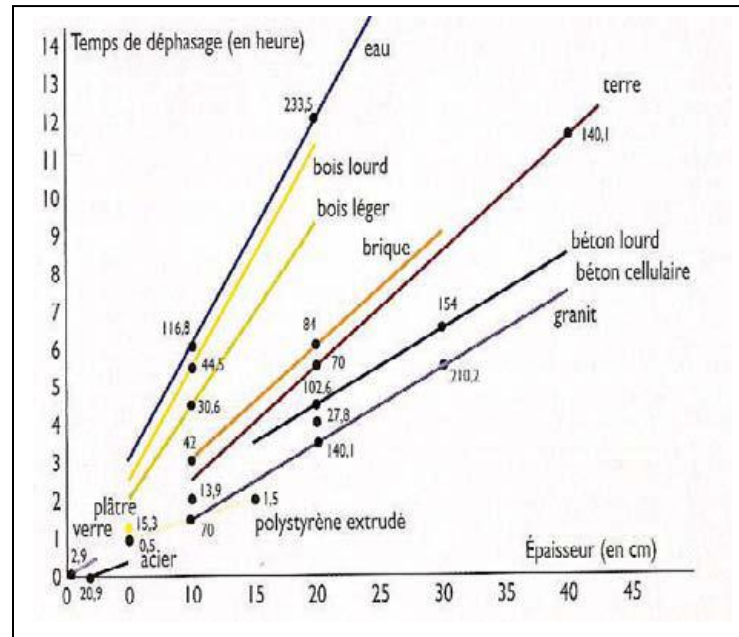


Fig. I. 2. Inertie thermique de quelques matériaux [15]

III. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette synthèse bibliographique comprend les bétons de sables, les bétons légers, les ajouts minéraux, les copeaux de bois ainsi que la paille d'orge, enfin, le comportement thermophysiques des murs extérieurs en milieux arides.

III. 1. BETON DE SABLE

III. 1. 1. APERÇU HISTORIQUE

Le béton de sable a commencé à être employé très tôt en France avec les premières réalisations de l'ingénieur François Coignet qui mit au point « le béton aggloméré » en 1853 dans la perspective de réaliser des constructions économiques. Ensuite, ce type de béton s'est étendu avec succès à de nombreuses réalisations dans le domaine du génie civil, en France et à travers certains pays du monde riches en sable afin d'apporter des

économies par rapport au béton traditionnel. A titre d'exemple, nous pouvons citer le grand mur de soutènement à Paris, la tour de port Saïd d'une hauteur égale à 52 m, construite en 1869 en Egypte ainsi que des réalisations en union soviétique, principalement depuis 1941 : pistes d'aérodromes, routes, tunnels et métros, mobiliers urbains et architecturaux, etc.

III. 1. 2. DESCRIPTION DU BETON DE SABLE

Le béton de sable se distingue d'un béton traditionnel par un fort dosage en sable et par l'absence ou un faible dosage en gravillons. Il se différencie également des mortiers par un plus faible dosage en ciment et surtout par l'utilisation qu'on veut en faire. L'emploi des bétons de sable en remplacement des bétons classiques peut constituer une variante intéressante sur le plan économique lorsque le sable est facilement accessible et à un coût moindre que les granulats courants [16].

III. 1. 2. 1. CONSTITUANTS DU BETON DE SABLE

Un béton de sable est composé de sable, de ciment, d'eau et de fillers. Par rapport à cette composition de base et pour répondre à certains usages, d'autres ajouts spécifiques peuvent être envisagés : gravillons, fibres, adjuvants, etc. [9].

1) Sables : Aucun critère granulométrique n'est a priori exigible pour réaliser un béton de sable : on peut utiliser un sable de dune (sable fin), ou un sable alluvionnaire (moyen ou grossier). La seule restriction d'emploi des sables réside dans leur propreté, car aucune application n'a été réalisée avec des sables pollués.

2) Ciment : Comme pour le béton classique, le ciment utilisé pour la confection d'un béton de sable doit être conforme à la norme européenne EN 197-1.

3) Eau : La quantité d'eau utilisée pour la confection des bétons de sable est conforme à la norme européenne EN 1008. L'eau efficace comprend, en plus de l'eau de gâchage, une quantité non négligeable d'eau apportée par les additions, adjuvants, autres ajouts et surtout par les sables.

4) Fillers : Ce sont des matières minérales, naturelles ou artificielles, passant au tamis de maille 80 µm. L'utilisation des fillers réduit le dosage en ciment, très coûteux, ainsi que les

phénomènes physiques associés. La quantité nécessaire de ciment pour assurer la résistance coïncide avec celle qu'il faut en fillers pour obtenir la bonne compacité.

5) Autres ajouts spécifiques :

a. Fibres : Elles sont surtout utilisées dans le but de réduire le retrait au premier âge, le dosage et la nature sont des paramètres très importants pour assurer l'efficacité de cet ajout. On utilise dans la plupart des cas des fibres organiques (polypropylène), des fibres d'acier ou des fibres de fonte.

b. Gravillons : L'ajout de gravillons en faible dosage peut améliorer sensiblement certaines caractéristiques (retrait, résistance et maniabilité).

c. Adjuvants : La spécificité du béton de sable privilégie, toutefois, l'usage de plastifiants ou de superplastifiants, ils améliorent la maniabilité. On utilise également, pour certains usages, des entraîneurs d'air dont l'objectif est de créer un réseau de microbulles dans le béton de sable pour le protéger du gel.

III. 1. 2. 2. PROPRIETES ESSENTIELLES DU BETON DE SABLE

Les propriétés essentielles du béton de sable sont comme suit :

1) Résistance à la compression : La résistance à la compression des bétons de sable est fonction des dosages de chaque constituant. Le dosage, la finesse et la nature des fillers ainsi que la granulométrie du sable et le rapport E/C ont également une grande influence sur la résistance à la compression.

2) Comportement thermique : Le comportement thermique des bétons de sable a été comparé à celui d'un béton témoin traditionnel. Les résultats trouvés sont légèrement meilleurs au profit des bétons de sable [9]. A titre d'exemple la conductivité thermique est de 1,26 contre 1,75 W/mK, avec une masse volumique d'environ 2160 contre 2390 kg/m³.

3) Durabilité : D'une façon générale, les bétons de sable sont plus poreux que les bétons traditionnels. Leurs pores sont plus nombreux, plus petits et davantage monodimensionnels. Cette distribution poreuse particulière contribue, pour une bonne part, à leur bon comportement vis-à-vis des essais de durabilité [9].

4) Retrait : Des essais de retrait ont été réalisés sur le béton de sable en comparaison avec un béton classique. Il a été montré que lorsqu'on isolait le matériau de l'extérieur (milieu étanche), le retrait, dit d'autodessiccation, du béton de sable était voisin de celui du béton

traditionnel. Par contre si on laisse le béton sécher dans un milieu non étanche, le retrait du béton de sable peut atteindre des valeurs doubles de celui d'un béton classique, comme le montre la Fig. I. 3. Le phénomène a été expliqué et relié, vraisemblablement, à une distribution et une taille des vides différentes entre les deux composites.

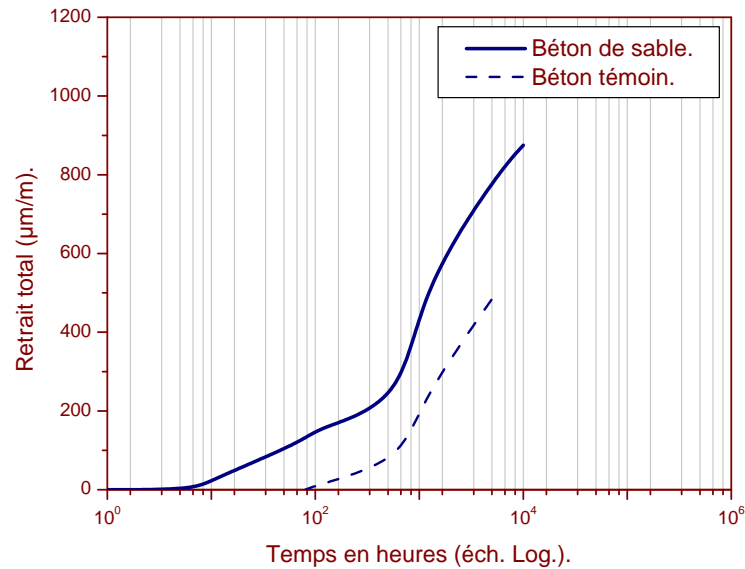


Fig. I. 3. Retrait total [9]

III. 1. 3. FORMULATION DES BETONS DE SABLES

Les bétons de sables ont le même dosage en ciment que les bétons traditionnels (250 à 400 kg/m³), la compacité optimale est obtenue grâce à un ajout complémentaire de fillers qui sont donc utilisés essentiellement pour améliorer la compacité en complétant l'ossature granulaire et ainsi réduire le dosage en ciment. Les fillers inertes peuvent, non seulement combler les vides, mais aussi provoquer des épitaxies avec les phases hydratées du ciment. Par exemple, les fillers calcaires influencent de façon positive, par ce phénomène, la résistance des mortiers [17,18].

Quelques compositions de bétons de sable sont reportées dans le tableau I. 1. L'avantage est au profit du mélange alluvionnaire-dunaire car la bonne répartition des grains de sables présente les meilleures performances mécaniques que les bétons dunaire et alluvionnaire [19].

Tableau I. 1. Quelques compositions des bétons de sable [19]

Nature du sable	Dunaire	Alluvionnaire	Alluvionnaire-dunaire
Ciment (kg/m ³)	350	350	350
Filler (kg/m ³)	200	150	135
Sable (kg/m ³)	1305	1460	1316
Eau (l/m ³)	245	210	210
Superplastifiant (en %)*	2	2	2

* Pourcentage massique du poids de ciment

D'une façon générale, la formulation est basée essentiellement sur deux critères principaux : essayer de chercher une compacité maximale du mélange sec et assurer une bonne maniabilité [20].

1) Compacité maximale

Elle est obtenue avec un certain dosage optimal en fines, ce qui nécessite un rapport E/C élevé qui réduit la résistance. Pour cela, la solution préconisée pour résoudre ce problème est de réduire le dosage en eau par l'utilisation d'un adjuvant « superplastifiant haut réducteur d'eau ».

2) Maniabilité

Elle a été, jusqu'à maintenant, décrite comme une des propriétés du mortier ou du béton frais. Cependant, c'est aussi une propriété qui affecte la qualité du produit fini car le béton doit avoir une maniabilité suffisante pour pouvoir être serré et atteindre une masse volumique maximale [21].

III. 1. 4. MICROSTRUCTURE DES BETONS DE SABLES

La pâte de ciment durcie est formée à partir d'une réaction chimique entre le ciment et l'eau appelée réaction d'hydratation. Cette réaction se traduit par le remplissage progressif des espaces entre les grains de ciment anhydre initiaux, par des amas d'hydrates et l'apparition de ponts de matière entre ces hydrates. L'étude au microscopique électronique à balayage a montré les points suivants [20,22] :

1) Aspect du béton de sable

L'image montrée par la Fig. I. 4. met en évidence (à l'échelle examinée) un matériau de texture homogène. L'aspect général du béton ne fait pas paraître de fissures notables. Les cavités observées correspondent très probablement à des bulles d'air.

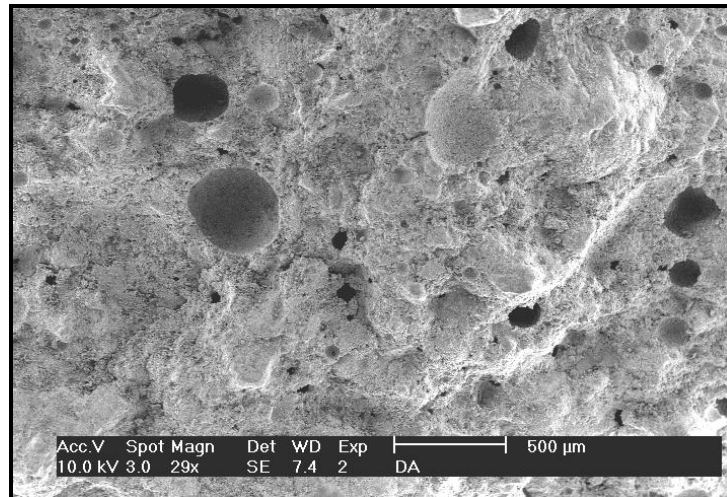


Fig. I. 4. Aspect général du béton de sable (G=29)

2) Liaison pâte-granulats

Cette liaison encore appelée "auréole de transition" est une zone de moindre résistance. La granulométrie et la nature minéralogique (dureté, porosité, réactivité) interviennent dans les caractéristiques et la qualité de la liaison pâte-granulats. L'image de la Fig. I. 5. montre que les grains de sable sont bien enveloppés et bien enchevêtrés dans la pâte. On remarque aussi qu'il n'existe pas de fissures interfaciales notables.

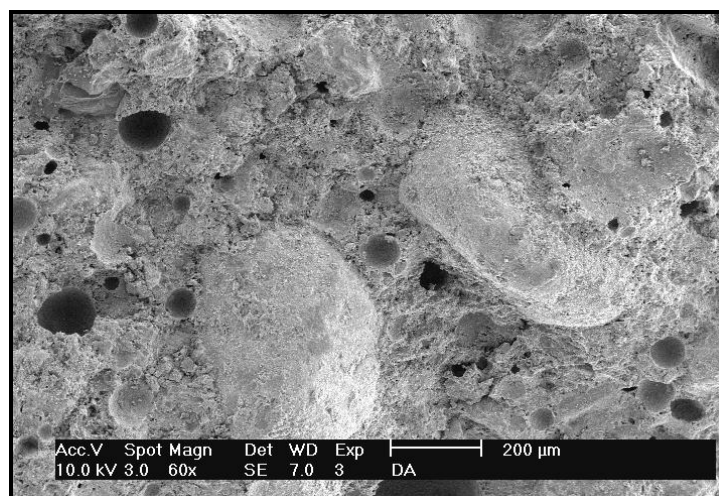


Fig. I. 5. Aspect des grains de sable dans la pâte (G=60)

3) Morphologie des hydrates

A l'échelle microscopique du béton de sable alluvionnaire-dunaire, il a été visualisé au MEB l'image de la Fig. I. 6. qui montre de nombreux hydrates avec des morphologies diverses : aiguilles, cristaux et des plaquettes.



Fig. I. 6. Aspect des hydrates (G=5000)

III. 1. 5. INTERET ET DOMAINE D'EMPLOI

L'intérêt économique se situe, à la fois dans la valorisation d'une ressource locale abondante parfois liée à un déficit en gros granulats, et dans l'abaissement du prix de revient du matériau ayant des caractéristiques spécifiques. Citons par exemple :

1) La préfabrication dans le domaine du bâtiment ou travaux publics grâce à sa facilité de moulage et démoulage rapide ainsi qu'à l'aspect esthétique.

2) La projection du béton de sable à l'aide d'une bétonnière à pompe pour des grandes hauteurs et des longues distances ainsi que les techniques de reprise par injection.

3) Des effets architectoniques variés, obtenus facilement avec les bétons de sable : aspect très lisse, aspect type pierre, arrêtes parfaitement définies, reproduction fidèle de moules extrêmement fins avec absence de défauts.

Ces domaines d'utilisation privilégiés des bétons de sable sont ceux où la technique s'est révélée particulièrement prometteuse. Toutefois, les autres applications du béton de sable, que ce soit en génie civil ou en bâtiment, sont également réalisables, presque toutes, en béton de sable : le choix entre les deux types de matériaux résulte alors de la prise en compte globale des données technico-économiques locales.

III. 2. GENERALITES SUR LES BETONS LEGRS

Les bétons de granulats légers couvrent un champ très large. Les granulats légers, naturels ou artificiels, qui sont disponibles dans beaucoup de régions dans le monde, peuvent être utilisés dans la production de bétons. Une grande gamme de densités et de résistances convenables pour les différents champs d'application, tels que les murs intérieurs et extérieurs, peut être obtenue [23]. De nombreux auteurs avancent que le principe de la détermination des proportions du mélange pour confectionner des bétons de granulats légers est pratiquement le même que celui des bétons traditionnels. Elles sont essentiellement liées aux applications envisagées et donc fonction des masses volumiques et des performances mécaniques recherchées [24].

III. 2. 1. CLASSIFICATION DES BETONS LEGRS

On distingue différentes classifications de bétons légers. Nous citons, à titre d'exemple la classification portée dans le tableau I. 2.

Tableau I. 2. Classification des bétons légers [24]

Béton à base de granulats légers	Béton cellulaire
Schiste, argile, verre, PSE, bois.	- Béton mousse classique. - Béton cellulaire autoclave.

Le béton à base de granulats légers fait référence à tout béton produit avec une densité inférieure à 2000 kg/m^3 . Pour des applications structurales, la densité du béton léger se situe souvent entre 1600 et 2000 kg/m^3 avec une classe de résistance de 15 MPa . Par contre, pour l'isolation thermique, la densité est souvent inférieure à 1450 kg/m^3 avec une classe de résistance aussi faible que $0,5 \text{ MPa}$ [25].

Une autre classification est basée sur la masse volumique, répartie en trois catégories [21]:

- 1)** Le béton de granulats légers de structure qui a une masse volumique comprise entre 1350 et 1900 kg/m^3 et présente une résistance à la compression minimale de 17 MPa .
- 2)** Le béton léger de faible masse volumique (entre 300 et 800 kg/m^3), non utilisé pour des applications structurales, mais surtout pour isolants thermiques.

3) Le béton de résistance moyenne se situant entre les deux : la résistance à la compression est comprise entre 7 et 17 MPa et les caractéristiques d'isolation thermique se situent entre celles du béton léger et celles du béton structural léger.

III. 2. 2. PROPRIETES DES BETONS LEGERS

Parmi les propriétés des bétons légers, on peut citer à titre d'exemple :

1) Conductivité thermique : Il convient de noter qu'un béton parfaitement sec est plus isolant qu'un béton humide, ce qui rend nécessaire la définition d'un coefficient k utile (k_u) correspondant à un taux d'humidité interne moyen [26]. Les murs en blocs de composite ciment-bois participent à l'isolation thermique de l'enveloppe grâce à la conductivité thermique améliorée dû à la présence du bois [24]. La Fig. I. 7. montre la conductivité thermique pour quelques bétons de granulats légers.

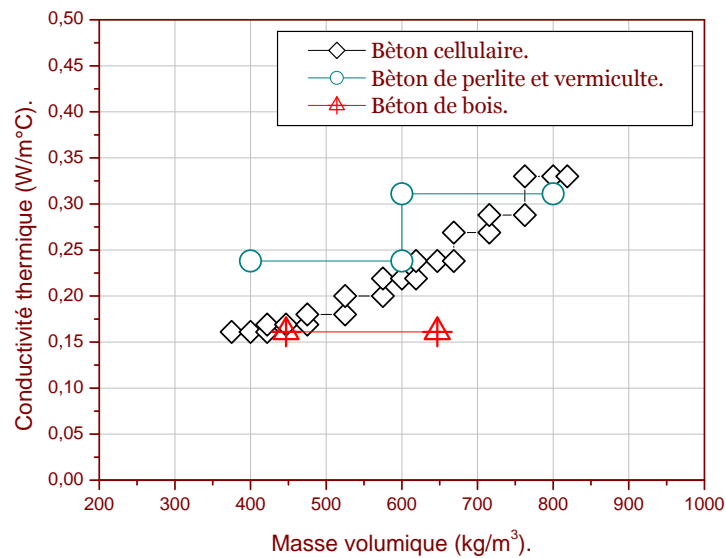


Fig. I. 7. Conductivité thermique pour quelques bétons de granulats légers [24]

2) Porosité : La porosité est la propriété qu'a un matériau de présenter des vides. La porosité des matériaux est indispensable, car elle permet :

- a. d'éviter la surcharge sur la structure des bâtiments.
- b. d'assurer l'isolation thermique et acoustique.

3) Résistance à la compression : Généralement, la résistance augmente avec l'augmentation de la masse volumique [21].

4) Propriétés acoustiques : Fondamentalement, on distingue deux propriétés acoustiques des matériaux de construction, l'absorption et la transmission du son [21].

III. 2. 3. RETRAIT DE MATRICE CIMENTAIRE

La plupart, des bétons légers à matrice cimentaire, présentent un retrait plus important que les bétons traditionnels et également plus tardif car l'eau absorbée par les granulats légers se trouve progressivement restituée et retarde ainsi la déshydratation, cause principale du retrait [26].

D'après Mitani Husam [27], les paramètres influençant le retrait sont, en général :

a. Rapport E/C : Les mesures réalisées par les différents chercheurs montrent que la réduction du rapport E/C conduit à l'augmentation du retrait [27].

b. Nature du ciment : La nature du ciment influence l'autodessiccation autant par sa composition chimique que par sa morphologie [28]. D'après certains chercheurs, la composition minéralogique d'un ciment et la teneur en aluminates spécialement C_3A et à un degré moindre de celle en aluminoferrite C_4AF influencent l'autodessiccation.

c. Effets des ajouts minéraux : D'après les résultats de certains auteurs [29], les pâtes contenant des fillers et des cendres volantes possèdent un volume solide plus important que celui d'une pâte de ciment seule : le contact entre les particules est plus important, ce qui réduit le retrait.

d. Effets des adjuvants : Quelques mesures ont été effectuées avec différents types d'adjuvants avec un taux de 2% en poudre par rapport au poids de ciment. Le retrait est diminué par l'adjuvant à base d'alcool d'oxyde d'alcalin et par l'adjuvant à base de glycol éther [30].

e. Effets des granulats : Les granulats légers ou poreux pourraient influencer la valeur du retrait surtout à faible rapport E/C. Cet effet a été étudié par G. Toma [31]. Pour deux bétons dont l'un avec des granulats secs et l'autre avec des granulats humides, l'auteur montre qu'il existe 27% de différence entre les valeurs de retrait mesurées à 24 heures, le béton avec granulats secs affichant le retrait le plus élevé.

III. 2. 4. PARTICULARITES DES GRANULATS LEGERS

Les principales particularités des granulats légers sont :

1) L'adhérence entre le granulats légers et la matrice cimentaire

Plusieurs facteurs expliquent la bonne adhérence entre les granulats et la pâte de ciment hydraté, tel que la rugosité superficielle et l'eau absorbée par les granulats au moment du malaxage, qui peut servir pour l'hydratation des grains de ciment [21].

2) L'eau totale

En pratique, généralement on procède à un pré-mouillage, afin d'éviter une perte trop rapide de maniabilité suite à l'absorption d'eau des granulats dans le béton [32]. On est donc amené à distinguer trois parties dans l'eau totale [33] :

a. L'eau interne : Elle est absorbée par les granulats durant le pré-mouillage (et le malaxage éventuellement) et ne sera restituée que très lentement au béton au cours de son durcissement et en fonction des conditions hygrométriques ambiantes.

b. L'eau superficielle : Elle est retenue à la surface des grains dans leur état « égouttés après pré mouillage ».

c. L'eau libre : Elle est ajoutée au malaxage. Son rôle est, d'une part, de constituer l'eau inter granulaire assurant la plasticité du béton et, d'autre part, d'hydrater le ciment. Le taux d'absorption des granulats légers dépend des caractéristiques de dimensions des pores, connexion et distribution, en particulier ceux près de la surface. L'eau intérieurement absorbée dans les particules n'est pas immédiatement disponible pour interaction chimique [34]. On peut donc retenir que :

$$E_T = E_M + E_{Abs} \quad (\text{I. 10})$$

où E_T : eau totale ;

E_M : eau de mélange ;

et E_{Abs} : eau d'absorption des granulats légers.

III. 2. 5. LES BETONS DE BOIS

Le béton de bois est considéré comme un béton allégé par des matériaux lignocellulosiques. On peut résumer ses principales caractéristiques comme suit :

1) Masse volumique et retrait

➤ Quel que soit le type de matrice utilisé, les principaux problèmes posés par les bétons de bois sont les effets retardateurs de prise de certains composants du bois et les variations dimensionnelles. Il faut toujours respecter un compromis entre la masse volumique et les variations dimensionnelles (retrait) [35].

➤ La valeur cible du retrait, généralement adoptée pour les bétons de bois, est de 1 mm/m [24].

➤ Dans le cas des copeaux de bois, par exemple, la masse volumique du béton diminue lorsque la teneur en bois augmente et ce quel que soit le milieu de conservation ; néanmoins le retrait augmente [35].

➤ Les résultats des traitements des copeaux de bois par enrobage avec un liant hydraulique (chaux et ciment) montrent que, plus la concentration du traitement augmente, plus la masse volumique augmente et par conséquent le retrait diminue [36]. C'est surtout parce que l'absorption d'eau par les copeaux de bois diminue.

2) Conductivité thermique

L'augmentation du contenu en copeaux réduit la conductivité thermique des bétons de sable et par conséquent l'augmentation de leur capacité isolante. Comme le montre la Fig. I. 8. [3], les deux types de bétons de sable, dunaire et alluvionnaire, ont pratiquement le même comportement d'allègement en fonction du dosage en copeaux de bois avec une légère différence dans la conductivité thermique (environ 0,1 W/mK).

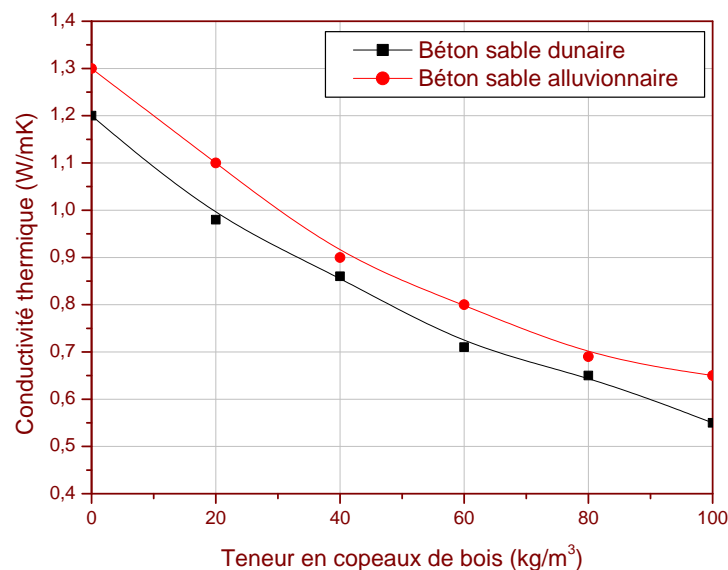


Fig. I. 8. Evolution de la conductivité thermique des bétons étudiés [3]

3) Résistance à la compression

➤ L'évolution dans le temps de la résistance en compression du matériau sec, pour différentes compositions en bois, montre que la stabilisation est rapide, quelle que soit la composition ; elle est atteinte à 28 jours [37].

➤ La résistance à la compression diminue lorsque le dosage en copeaux de bois augmente. Cependant, il faut rechercher un compromis entre les caractéristiques mécaniques et l'allègement avec un minimum de variation dimensionnelle afin d'atteindre le choix d'un bon matériau [38].

4) Microstructure poreuse

L'étude de la microstructure poreuse a montré une double échelle de porosité dans les bétons de bois : une macroporosité dans les granulats de bois et une micro et mésoporosité essentiellement localisées dans la matrice minérale [39]. Les propriétés mécaniques et thermiques des bétons de bois sont, étroitement dépendantes de la structure poreuse [39].

5) PROBLEMATIQUE DU BETON DE SABLE ALLEGE PAR DES COPEAUX DE BOIS

Le seul défaut que présente le béton de sable avec copeaux de bois est le retrait important. Cela est dû à la particularité des granulats légers utilisés qui se caractérisent par un taux d'absorption d'eau important à cause de leur structure très poreuse. Plusieurs travaux se sont intéressés à l'application de différents traitements pour les copeaux de bois afin de réduire le taux d'absorption des copeaux, qui est à l'origine du retrait et même améliorer les autres qualités du béton [40-43].

A noter que certains traitements (Fig. I. 9) ont permis de réduire le retrait mais les propriétés thermo-physiques ont été affectées, d'où une réflexion concernant d'autres moyens d'atteindre les objectifs visés. L'hypothèse proposée pour ce travail est la substitution partielle ou totale des copeaux de bois par un autre matériau lignocellulosique local, écologique et renouvelable, qui est la paille d'orge. Ce matériau est largement disponible dans la région de Laghouat.

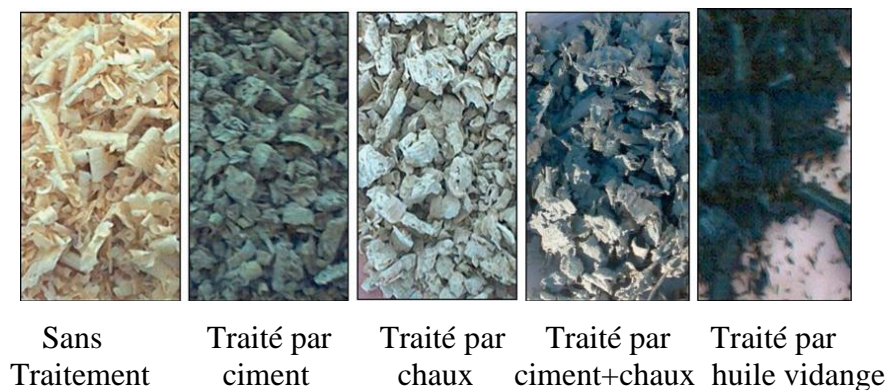


Fig. I. 9. Différents traitements des copeaux de bois [42]

III. 3. AJOUTS MINÉRAUX CIMENTAIRES

III. 3. 1. CLASSIFICATION D'AJOUTS MINÉRAUX

Les constituants du ciment sont le clinker, le gypse et les ajouts minéraux. La classification des ajouts minéraux comprend deux catégories [44] :

1. Les ajouts minéraux inertes

Les fillers de calcaire sont en général considérés comme ajout inerte et autres poussières minérales.

2. Les ajouts minéraux actifs

La pouzzolane naturelle, la fumée de silice, le laitier de haut fourneau et les cendres volantes [44], ainsi que la chaux [45].

D'une manière plus générale, l'amélioration du bilan des émissions en CO₂ du ciment peut être plus facilement réalisée par la substitution partielle d'une partie du clinker par d'autres constituants présentant des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques [4].

III. 3. 2. METHODES D'AJOUTS MINÉRAUX

L'introduction d'ajouts minéraux dans les composites à matrice cimentaire peut s'effectuer de différentes façons :

- La première méthode se rapporte à la notion d'éco-ciment et a trait à la recherche de nouveaux types de ciment [46,47]. A titre d'exemple, un nouveau type de ciment a été préparé avec de la poudre de calcaire broyé, du laitier de haut fourneau, des scories d'acier et du gypse. Ses propriétés mécaniques répondent aux besoins d'un ciment de maçonnerie et d'ingénierie architecturale [48].

- Il est également possible de substituer partiellement le clinker par d'autres constituants présentant des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques, tels que, le calcaire, le laitier à haut fourneau et la pouzzolane pour un mortier de calcaire [49,50].

Enfin, le ciment portland artificiel CPA ou le ciment portland composé CPJ peuvent être partiellement substitués par d'autres ajouts minéraux. Citons la substitution du ciment portland artificiel par le calcaire, le laitier à haut fourneau et la pouzzolane [51], les fillers de calcaires, les cendres volantes et la fumée de silice [52] et le métakaolin [11]. Citons aussi la substitution du ciment portland composé CPJ par la chaux hydraulique [45]. A noter que ces ajouts minéraux conduisent à différents types de ciments appelés ciment

binaire (ciment + un seul ajout), ciment ternaire (ciment + deux ajouts) et ciment quaternaire (ciment + trois ajouts).

Notons que les notions de ciment binaire, ternaire et quaternaire peuvent être résumées comme suit :

- 1) Le ciment binaire est l'utilisation d'un seul type d'ajout minéral par substitution du ciment tels que, les fillers de calcaire et la fumée de silice [44].
- 2) Le ciment ternaire est l'utilisation de deux types d'ajouts minéraux par substitution du ciment tels que, l'ajout de la pouzzolane naturelle et la poudre du marbre [53], l'ajout de pouzzolane et le laitier en quantité optimale (jusqu'à 35%) présente deux avantages essentiels : une bonne résistance mécanique et une amélioration du coût [54]. Les mortiers ternaires dont le couple est de la pouzzolane naturelle et des fillers de calcaire semblent les plus efficaces [44].
- 3) Le ciment quaternaire est l'utilisation de trois types d'ajouts minéraux par substitution du ciment tels que, le calcaire, le laitier à haut fourneau et la pouzzolane pour un mortier de calcaire [44,49,50].

III. 4. RESSOURCES VEGETALES

Plusieurs travaux de recherches concernant l'incorporation des ressources végétales dans différents composites ont été effectués. M.M. Khenfer et al. ont utilisé les fibres de celluloses pour renforcer les ciments [55]. Z. Li et al. ont utilisé les fibres de chanvre pour un composite cimentaire [56]. H. Yang et al. se sont intéressés à des fibres de pailles de riz de longueur de 2 ou 4 cm, la largeur dépendant de la tige, avec différents pourcentages massiques paille de riz/particules de bois [57]. P. Soroushian et al. ont utilisé la paille du blé au lieu du bois pour un composite cimentaire [58]. T. Ashour et al. ont associé des pailles de blé et d'orge [59]. V. Nozahic et al. ont étudié deux granulats d'origine végétale, la chènevotte et la tige du tournesol qui a été sélectionnée comme une alternative du sous-produit du lignocellulosique pour ses ressemblances apparentes avec les fibres du chanvre [60]. I. Merta and E.K. Tschegg ont analysé l'incidence de fibres de chanvre, de miscanthus et de paille de blé [61]. P. Monreal et al. ont utilisé les pulpes de betteraves dans un composite cimentaire [62].

Enfin, différents travaux ont utilisés des copeaux de bois non traités [22,63] ou traités [42, 64,65].

A rappeler que pour ce travail, l'hypothèse est la substitution partielle ou totale des copeaux de bois par un autre matériau lignocellulosique local, disponible en grande quantité, écologique et renouvelable qui est la paille d'orge, sans affecter les propriétés du béton. Le choix de la paille d'orge par rapport à la paille de blé est motivé par ses propriétés thermiques [59].

III. 4. 1. GRANULATS DE BOIS

En ce qui concerne le bois, nous distinguerons les déchets résultant d'activités industrielles et les granulats commercialisés. Le bois recyclé a deux fonctions importantes pour le développement durable : il forme une ressource industrielle et en même temps un moyen de stockage du gaz carbonique. Donc, prolonger la durée de vie de la matière en bois en recyclant les déchets de bois est une approche intéressante pour participer à la lutte contre le réchauffement de la planète [66]. Le coût peu élevé, la proximité des sources et la protection de l'environnement encouragent la réutilisation de ces déchets. C'est pourquoi de nombreux travaux ont été menés sur le recyclage des déchets de bois, dans le but d'améliorer l'isolation thermique et acoustique des composites [40].

Les déchets de bois peuvent se présenter sous différentes formes [67] : chute de bois (sciage / découpe), copeaux /sciure de bois (rabotage / perçage), chute de panneaux (découpe). La littérature fait parfois état d'une utilisation des déchets sans traitement [22,68]. Taha Ashour et al., notamment, ont utilisé des copeaux de bois de longueur approximative 2 cm, dont la masse volumique apparente est de 111,4 kg/m³ [59].

Parmi les granulats de bois commercialisés on peut citer le silwood, la chènevotte, les copeaux d'épicéa et l'agreslith-C [24]. Il y a aussi le granuland fabriqué à partir de sciure de bois. Ces granulats ont en général subi un traitement pour atténuer les interactions avec la pâte cimentaire.

Le bois naturel est un matériau très complexe. Le bois de sapin est composé principalement par trois structures polymères naturels, qui sont la cellulose 38,8%, l'hémicelluloses 26,30% et la lignine 29,3% [69]. La Fig. I. 10. montre l'aspect des copeaux de bois à différentes échelles (forme, rugosité et porosité). Quelques propriétés thermo-physiques de certains types de bois ont été portées dans le tableau (I. 3).

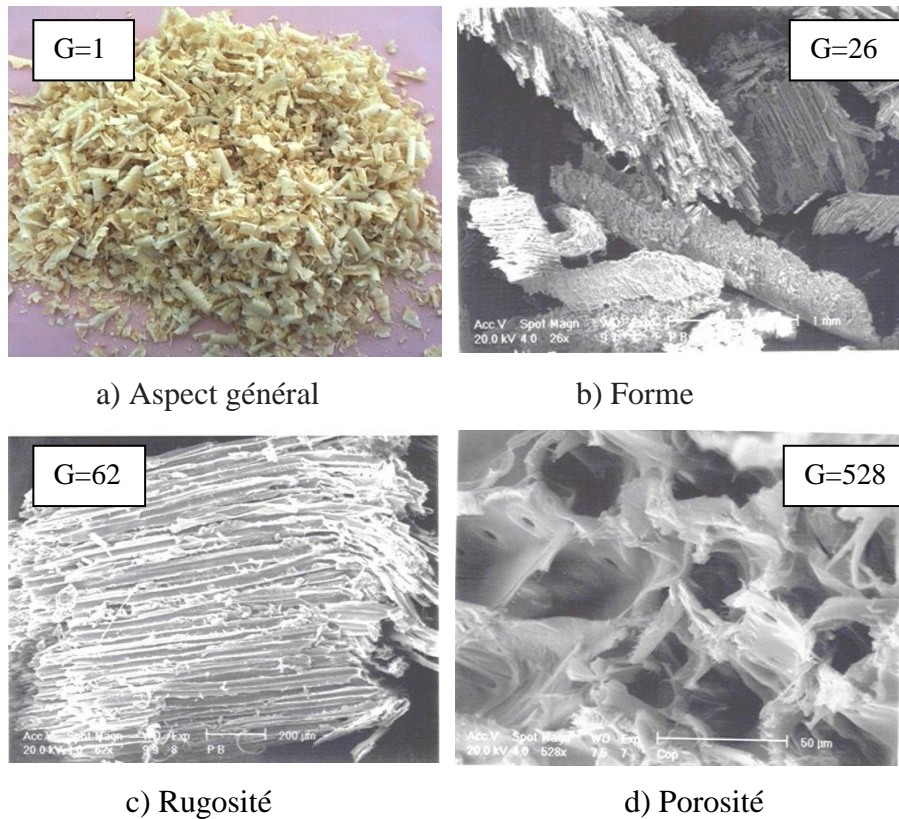


Fig. I. 10. Aspect des copeaux de bois à différentes échelles [42]

Tableau I. 3. Propriétés thermo-physiques de quelques types de bois [70]

Type de bois	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur massique (J/kg K)	Conductivité thermique (W/mK)
Sapin, Pin	520	0,60	0,14
Epicéa	480	0,60	0,14
Hêtre	730	0,60	0,17
chêne	750	0,60	0,21

III. 4. 2. PAILLE D'ORGE

La paille est un produit naturel, dont la croissance alimentée par le soleil se fait par photosynthèse pendant une période de 6 mois à un an. Actuellement, la paille est produite en surplus dans la plupart des pays. C'est le produit fini de récoltes croissantes; ainsi la réutilisation de la paille pour la construction présente un objectif durable et écologique [71].

Dans la région de la ville de Laghouat, au sud d'Algérie, on trouve trois types de pailles : la paille d'orge, de blé et d'avoine. Il a été choisi la paille d'orge en raison de ses performances thermiques [59].

La paille se présente sous forme de bottes, de dimensions environ 61 cm de longueur, 43 cm de large et 36 cm de hauteur. La moyenne de la masse volumique des bottes est de 102,6 kg/m³. La conductivité thermique de la botte de paille d'orge est 0,067 W/mK [71]. La composition chimique de la paille d'orge est environ 37,6% de cellulose, 34,9% d'hémicelluloses et 15,8% de lignine [72].

Les résultats de Taha Ashour et al. [59] ont révélé que la conductivité thermique du composite diminue avec l'augmentation du contenu en fibres et la réduction du contenu en sable. Le renforcement par les fibres a un impact plus important sur la conductivité thermique que le contenu en sable. Les résultats montrent que le composite renforcé par les fibres de la paille d'orge présente la meilleure isolation thermique.

Le béton est résistant à la compression, cependant, comme un matériau très fragile, il a une faible capacité de déformation en traction et par conséquent une faible ténacité [61]. L'énergie de rupture est définie comme la capacité du matériau à absorber de l'énergie après fissuration et elle représente l'énergie que va absorber la structure en cas de rupture [61]. L'ajout de fibres dans la matrice du béton a été reconnu depuis longtemps comme un moyen d'améliorer la capacité d'absorption d'énergie et la résistance à la fissuration du béton [61]. Cette constatation est confirmée par certains chercheurs qui ont utilisés des fibres végétaux [61,73]. La rugosité de surface élevée des fibres de paille assure une bonne liaison avec la matrice du béton [61].

Dans la bibliographie, Il y'a un manque considérable concernant l'effet de la paille sur le retrait dans une matrice cimentaire. Néanmoins, il existe des travaux sur le renforcement de certains composites par de fibres végétales. Il en ressort que l'utilisation des fibres aide donc à diminuer la fissuration causée par le retrait plastique. Pour cela, on peut prendre comme valeur cible du retrait, généralement adoptée pour les bétons de bois, elle est de 1 mm/m.

III. 5. COMPORTEMENT THERMO-PHYSIQUE DE L'ENVELOPPE DU BATIE

Le cadre bâti, en interaction avec son environnement, constitue un sujet de recherche qui présente des opportunités fortes dans le cadre du développement durable [74]. La conception durable des bâtiments exige l'amélioration du confort thermique et la réduction de la consommation d'énergie [75] d'où la nécessité de prendre en compte un certain

nombre de paramètres dont les propriétés thermo-physiques des matériaux de l'enveloppe bâtie, le site, l'orientation du bâtiment, la distance entre les bâtiments et la forme [76,77].

III. 5. 1. STRATEGIE BIOCLIMATIQUE DANS LES MILIEUX ARIDES

L'enveloppe du bâtiment peut être définie comme étant l'ensemble des éléments de construction qui séparent l'environnement intérieur du bâtiment de l'environnement extérieur [78]. Les murs sont une fraction prédominante de l'enveloppe du bâtiment et sont attendus pour offrir un confort thermique et acoustique dans un bâtiment, sans compromettre l'esthétique du bâtiment [25].

Il convient de signaler que l'enveloppe du bâtiment, qui sépare l'environnement extérieur de l'environnement intérieur, se caractérise par une problématique complexe qui dépend de plusieurs critères tels que les propriétés thermo-physiques des matériaux et la technique constructive de la paroi. Dans ce contexte, plusieurs travaux ont montré que la conception de l'habitat traditionnel dans les climats chauds et secs est adaptée aux conditions climatiques du site et est plus confortable que l'habitat moderne. Par exemple, en Turquie, la stratégie de l'architecture traditionnelle vise à avoir un long temps de retard de transfert de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur avec une enveloppe à haute inertie thermique.

Pour cela, la stratégie est basée sur une approche de l'architecture bioclimatique à travers deux principes de base qui sont l'inertie thermique et l'orientation. Parmi les objectifs visés par cette approche bioclimatique, on peut citer à titre d'exemple :

- minimiser l'effet des facteurs climatiques extérieurs ;
- améliorer le niveau de confort thermique ;
- réduire la consommation d'énergie électrique ;
- améliorer les performances thermiques du mur par un long temps de déphasage et un faible facteur d'amortissement.

L'objectif est donc de déterminer deux propriétés thermo-physiques très importantes du mur, à savoir le temps de retard (Φ) ou déphasage et le facteur d'amortissement (f) [79], autrement dit, deux paramètres de l'inertie thermique [80]. Ces deux paramètres dépendent de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique et de la masse volumique des matériaux de construction, ainsi que, l'épaisseur du mur [81,82]. Dans les climats chauds et secs, un long temps de retard et un faible facteur d'amortissement apportent du confort thermique pour les occupants lorsque la température extérieure est très élevée [83,84].

La représentation schématique du temps de retard et du facteur d'amortissement est montrée sur la Fig. I. 11. Le temps de retard (Φ) représente la différence en heures des températures extérieures et intérieures du mur et le facteur d'amortissement représente le rapport entre les amplitudes intérieures et extérieures A_i et A_e .

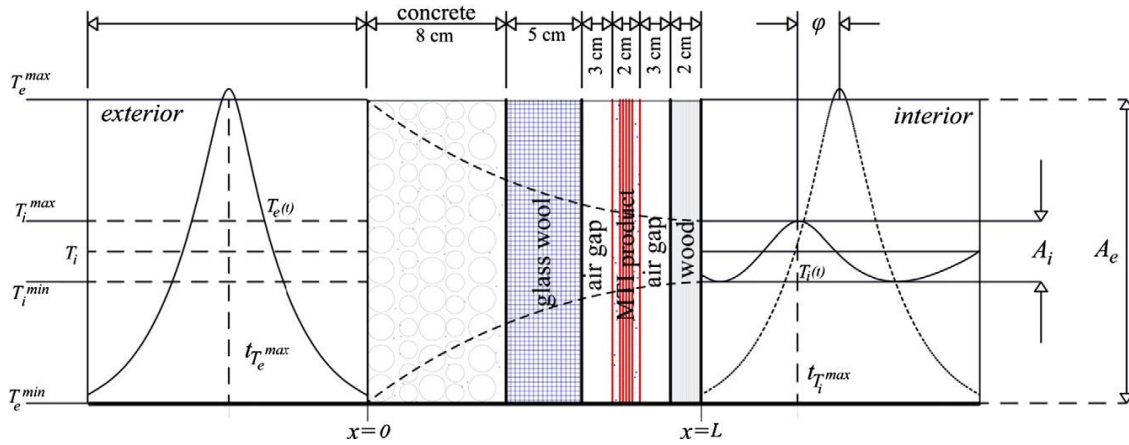
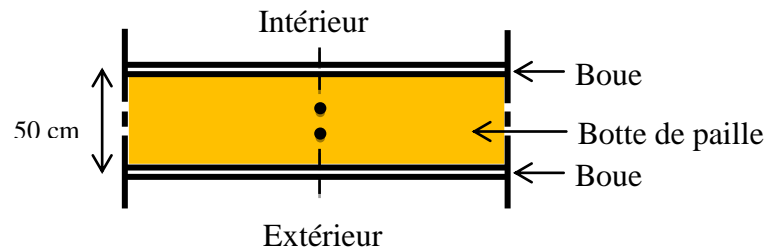


Fig. I. 11. Représentation schématique du temps de retard et du facteur d'amortissement [85]

III. 5. 2. METHODES D'EVALUATION DE LA PERFORMANCE THERMIQUE DU BATIE

Il y a plusieurs méthodes d'évaluation de la performance thermique du bâti, à savoir, les méthodes de simulations numériques, telle que le logiciel EnergyPlus qui est utilisé par plusieurs chercheurs à cause de son efficacité [86-90], le logiciel TRNSYS [91-93], la méthode numérique [94] et enfin la méthode in situ qui consiste à placer des sondes à l'intérieur du mur [71]. La Fig. I. 12. montre un exemple de l'emplacement des sondes dans le cas d'un mur en bottes de paille.



| Sonde de température.

● Sonde combiné (humidité et température).

Fig. I. 12. Position des sondes à l'intérieur de la paroi

Toutefois, les paramètres de la simulation sont nombreux, on peut citer à titre d'exemple : la détermination de l'épaisseur optimale du mur, l'effet de l'orientation, l'effet de l'ajout des isolants thermique, etc.

IV. CONCLUSION

La technologie du béton de sable étant récente, le savoir-faire et l'expérience sont nécessairement à acquérir, de manière progressive par les utilisateurs habituels du béton, car les performances mécaniques ne constituent pas l'unique critère de jugement de la qualité d'un béton. On a vu, notamment, que de nombreuses propriétés spécifiques des bétons de sable, telles que les performances mécaniques, thermiques, acoustiques et l'aspect de surface, les rendent préférentiels pour certains usages : matériau de structure et matériau d'expression architecturale capable de répondre aux multiples contraintes et exigences imposées par les bâtiments et les ouvrages de génie civil. Le béton de sable peut donc être une réponse aux problèmes économiques et environnementaux.

L'approche de la formulation avec les ajouts minéraux est une approche environnementale et durable, car elle contribue au respect des trois piliers de développement durable à savoir l'environnement, l'économie et le social. Les ajouts minéraux contribuent d'une manière simple et économique à la réduction de l'utilisation du ciment et par conséquent à la réduction de la consommation d'énergie ainsi que les émissions du CO₂, ce qui va dans le sens du développement durable.

Par ailleurs, le bois possède diverses qualités qui font que son utilisation ne cesse de se développer. Une substitution partielle ou totale du bois par la paille d'orge peut résoudre certains problèmes posés par le bois. Mais il faut veiller à ce que la substitution soit optimale, que ce soit dans le cas du bois ou de la matrice. D'où la recherche d'un compromis afin de bien contrôler la qualité du composite selon sa destination en tant que béton de sable léger isolant-porteur. De plus, pour comprendre le comportement physique et mécanique d'un matériau, il est nécessaire de penser à l'échelle de la microstructure.

Enfin, et afin de prévoir le comportement des murs extérieurs en milieu aride, une évaluation de la performance thermique des bétons étudiés s'avère nécessaire. Une simulation numérique à l'aide du logiciel EnergyPlus apparaît pertinente en raison de son efficacité.

DEUXIEME CHAPITRE

Matériaux utilisés
et techniques expérimentales

CHAPITRE II : MATERIAUX UTILISES ET TECHNIQUES EXPERIMENTALES

INTRODUCTION

La première partie de ce chapitre est consacrée à la présentation des caractéristiques physiques et chimiques des différentes matières premières utilisées dans la préparation des bétons étudiés alors que la deuxième partie est réservée à la description des techniques expérimentales utilisées.

I. LES MATIERES PREMIERES

I. 1. SABLE

Les sables utilisés sont, d'une part, des sables dunaires locaux qui recouvrent une partie très importante du sud Algérien tel que la région de Laghouat et d'autre part des sables alluvionnaires extraits d'oued M'zi traversant la région de Laghouat. Ces deux sables sont utilisés en mélange selon un rapport massique déterminé soit $SA/SD = 1,7$ [95].

où SA : est le sable alluvionnaire de diamètre maximum 5 mm.

et SD : le sable de dune de diamètre maximum 0,63 mm.

Cette valeur correspond à 36,23% de sable de dune par rapport à la quantité globale de sable utilisé, qui est inférieure à la limite recommandée par les travaux de A. S. Al-Harthy et al. [96], soit 50%.

I. 1. 1. GRANULOMETRIE

L'analyse granulométrique par voie sèche conformément à la norme européenne EN 12620 permet de déterminer la grosseur et les pourcentages pondéraux respectifs des différentes familles de grains constituant l'échantillon représentatif. En général pour les sables, on utilisera des tamis de modules (20-23-26-29-32-35-39) [97]. Les pourcentages en masse des grains de sable ayant une dimension inférieure ou égale à un diamètre donné se traduit par une courbe granulométrique.

D'après les courbes granulométriques présentées dans la Fig. II. 1, on peut dire que la granulométrie du sable de dune est serrée, tandis que les granulométries des deux autres sables sont étalées. Néanmoins, la courbe granulométrique du sable alluvionnaire-dunaire

s'inscrit mieux dans le fuseau recommandé pour les bétons, ce qui a été fait en corrigeant le sable alluvionnaire, dans sa partie fine, par l'ajout de sable dunaire.

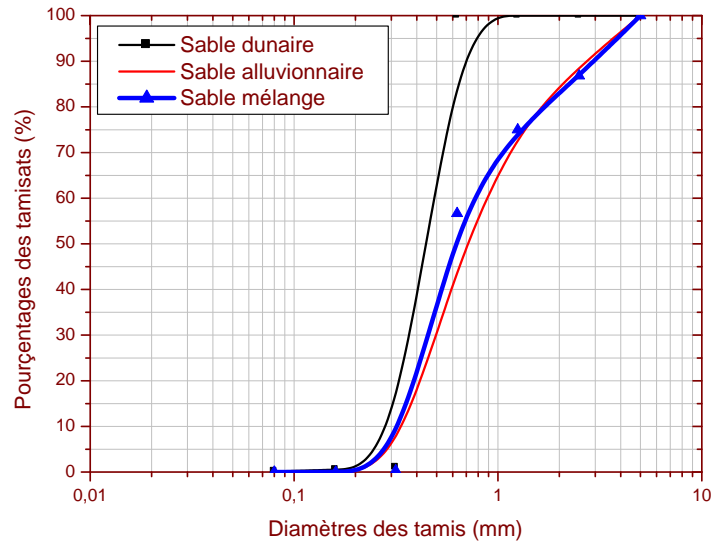


Fig. II. 1. Courbe granulométrique des sables utilisés

I. 1. 2. CARACTERISTIQUES PHYSIQUES

Le tableau (II. 1) regroupe l'ensemble des résultats relatifs aux essais physiques effectués sur les sables utilisés.

Tableau II. 1. Caractéristiques physiques des sables

Caractéristiques	γ (kg/m ³)	γ_s (kg/m ³)	MF	Cp (%)	P (%)	ESv	ESp
Sable de dune	1501	2587	1,98	0,58	0,42	90,7	81,4
Sable alluvionnaire	1552	2425	2,89	0,64	0,36	93,5	82,3
Sable mélange	1590	2485	2,81	0,66	0,34	93,2	80,3

D'après les résultats ci-dessus, on constate que tous les types de sable sont acceptables du point de vue :

➤ Utilisation comme constituant dans les bétons de sable, mais leur porosité élevée impose l'utilisation de fillers pour combler les vides. Néanmoins, le sable mélange (alluvionnaire-dunaire) nécessite un dosage en fillers plus faible, car c'est le type de sable le plus dense et le plus compact, ce qui va donner probablement un béton de sable plus résistant.

➤ Utilisation dans des bétons de haute qualité. En effet, en se référant aux valeurs de l'équivalent de sable préconisées par les normes, on constate la propreté élevée des trois types de sables et le manque presque total des fines argileuses, ce qui convient parfaitement pour la confection d'un béton de haute qualité.

Par ailleurs, les modules de finesse relativement faibles, montrent que les sables sont riches en éléments fins.

I. 1. 3. CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

L'analyse chimique des sables utilisés (SD et SA) a été faite, par diffraction des rayons X par M. Bederina [20,42]. Cette analyse, révèle la présence d'atomes Si et O₂, mais le pourcentage atomique important de Si, correspond à la présence prépondérante de l'espèce SiO₂ (silice), ce qui montre que ces deux types de sables sont essentiellement de nature siliceuse (Fig. II. 2 et Fig. II. 3).

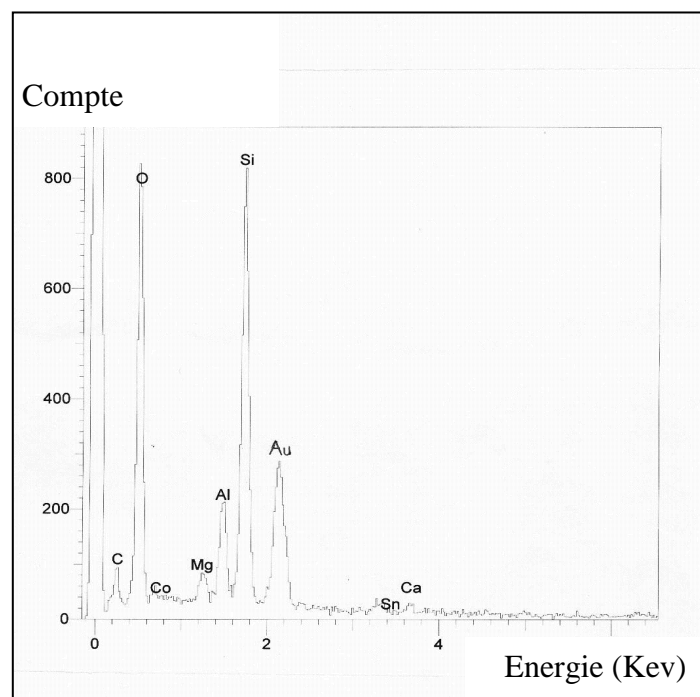


Fig. II. 2. Analyse chimique du sable de dune [20,42]

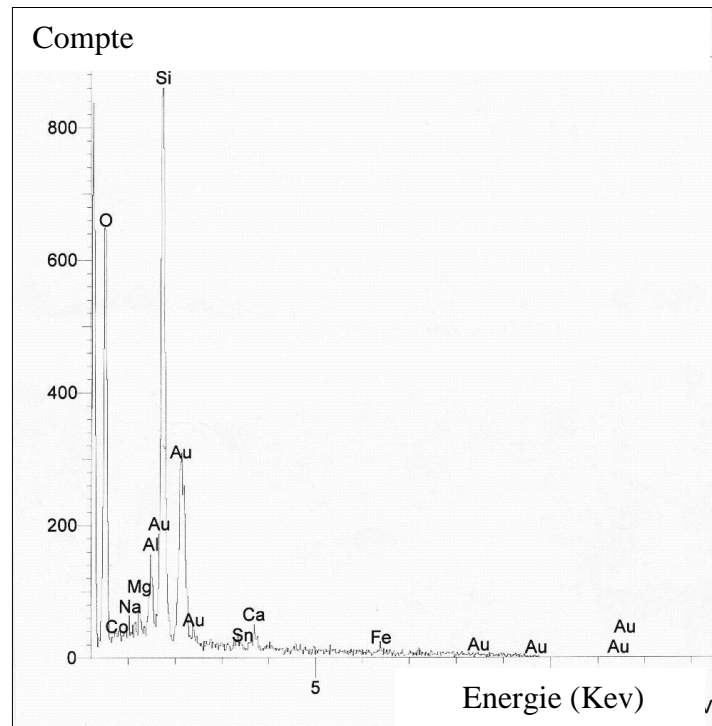


Fig. II. 3. Analyse chimique du sable alluvionnaire [20,42]

I. 2. LE CIMENT

Pour des solutions de construction durable, le ciment habituellement utilisé est le ciment Portland au calcaire (CPC) de type CPJ CEM/II A-L 42,5 R. Le CPC est une nouvelle classe de ciment économe en énergie et qui procure une performance semblable à celle du ciment Portland conventionnel avec une émission de CO₂ à la fabrication jusqu'à 10% moindre [98]. Les masses volumiques absolue et apparente sont respectivement 3030 ± 25 kg/m³ et 1030 ± 20 kg/m³. La surface spécifique Blaine est $444,9 \pm 12$ m²/kg.

Les résultats de l'analyse chimique du ciment utilisé en (%) sont présentés dans le tableau II. 2. L'analyse chimique du ciment Portland au calcaire par rayons X (Diffractométrie) a montré l'existence des compositions chimiques suivantes : l'oxyde de calcium (CaO), la silice (SiO₂), l'oxyde d'aluminium (Al₂O₃), l'oxyde de fer (Fe₂O₃), le trioxyde de soufre (SO₃), le silicate de calcium (Ca₂SiO₄), le silicate de calcium (Ca₃SiO₅), comme le montre la Fig. II. 4.

Tableau II. 2. Analyse chimique du ciment utilisé en (%)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	CaO libre	Cl	Ins.	PF
16,93	5,26	2,82	62,23	1,03	0,65	0,04	2,89	1,78	0,02	1,61	7,83

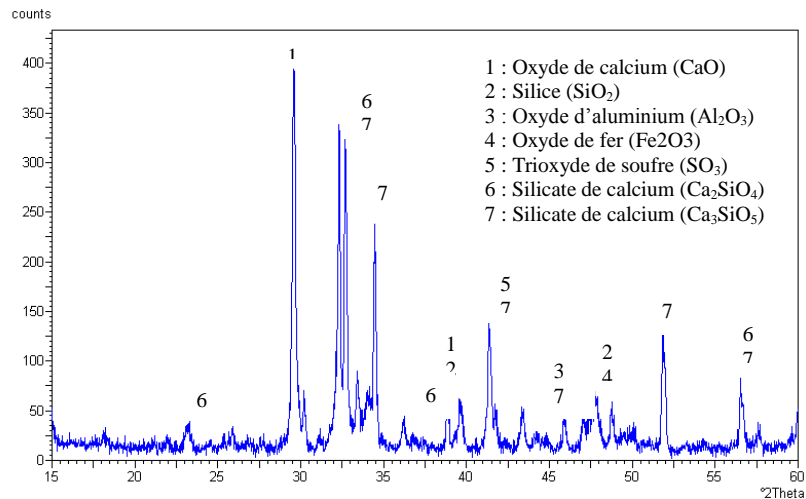


Fig. II. 4. Analyse chimique par DRX du ciment portland au calcaire

I. 3. AJOUTS MINÉRAUX

I. 3. 1. FILLERS DE CALCAIRE

Les fillers de calcaire sont en général considérés comme ajouts inertes. Ils sont obtenus par tamisage au tamis 80 µm des restes de concassage disponibles localement dans une carrière située à la sortie nord de la ville de Laghouat. Il faut rappeler que ces fillers sont destinés aussi à compléter la courbe granulométrique du sable dans sa partie fine et surtout pour combler les vides afin de donner une meilleure compacité au béton. Ce type de filler est le plus adapté à ce type de béton et donnent les meilleures performances mécaniques [9,18].

Les masses volumiques absolue et apparente sont respectivement $2700 \pm 22 \text{ kg/m}^3$ et $1530 \pm 18 \text{ kg/m}^3$, la surface spécifique (Blaine) est de l'ordre de $280 \pm 13 \text{ m}^2/\text{kg}$. L'analyse chimique par rayons X (Diffractométrie) a montré l'existence des composés suivants : Carbonate de calcium (CaCO₃), Silice (SiO₂) et Oxyde de calcium (CaO) comme le montre la Fig. II. 5.

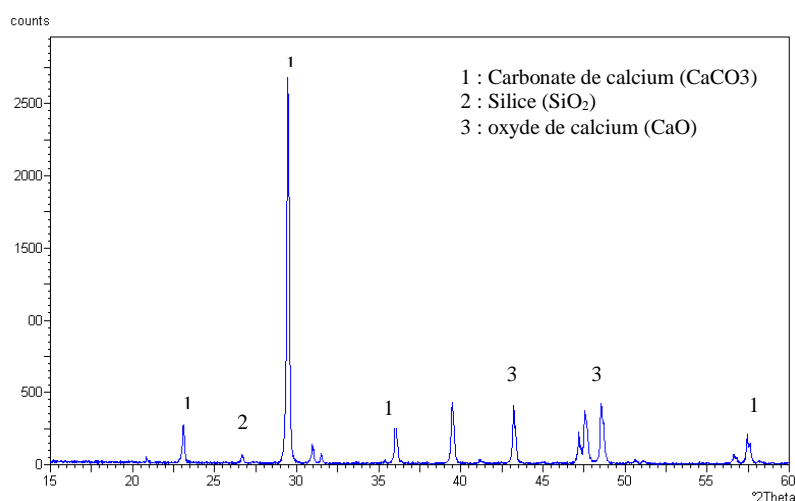


Fig. II. 5. Analyse chimique par DRX des fillers de calcaire

I. 3. 2. POUZZOLANE NATURELLE

La pouzzolane naturelle est d'origine volcanique et est extraite du gisement de Bouhamidi situé au sud de la ville de Béni-saf en Algérie. Il s'agit d'une roche volcanique effusive à composition surtout feldspathique donc siliceuse. Cette pouzzolane est fournie sous forme de roches concassées de type pierre ponce et scories de diamètre variant de 5 à 10 mm. Nous avons tout d'abord procédé à son étuvage à 105°C afin d'éliminer toute éventuelle humidité et faciliter son broyage dans un broyeur de type los Angeles, puis un tamisage au tamis 80 µm. La conservation se fait dans un récipient étanche.

Les masses volumiques absolue et apparente sont respectivement $2850 \pm 25 \text{ kg/m}^3$ et $1005 \pm 14 \text{ kg/m}^3$, la surface spécifique (Blaine) est $388 \pm 15 \text{ m}^2/\text{kg}$. L'analyse chimique par rayons X (Diffractométrie) de la pouzzolane naturelle a montré l'existence des molécules suivantes : l'oxyde d'aluminium (Al_2O_3), l'oxyde de calcium (CaO), le magnésium (MgO) et le dioxyde de soufre (SO_2), comme le montre la Fig. II. 6.

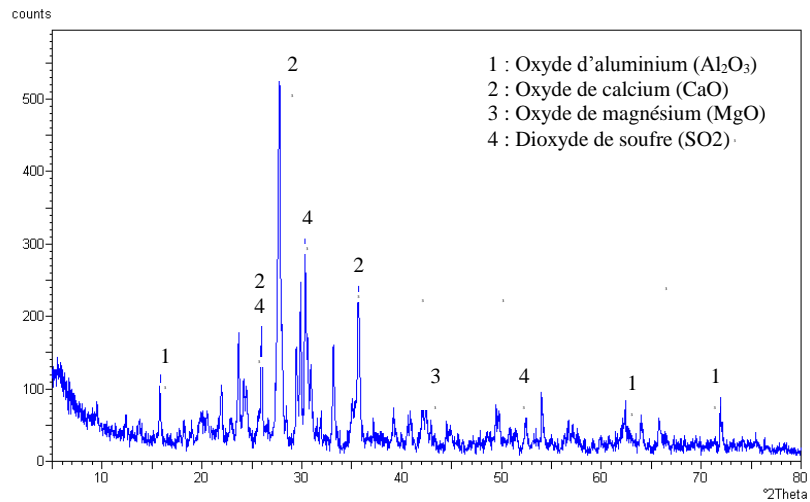


Fig. II. 6. Analyse chimique par DRX de la pouzzolane naturelle

I. 3. 3. CHAUX HYDRAULIQUE

La chaux utilisée est une chaux hydraulique provenant de l'usine de Saida (société SNMC). Il a été procédé à un tamisage au tamis 80 μm afin d'avoir la même granulométrie que pour le calcaire et la pouzzolane. L'analyse chimique par rayons X (Diffraction) de la chaux hydraulique a montré l'existence des composés suivants : Carbonate de calcium (CaCO_3) et Hydroxyde de calcium (Ca(OH)_2), comme le montre la Fig. II. 7.

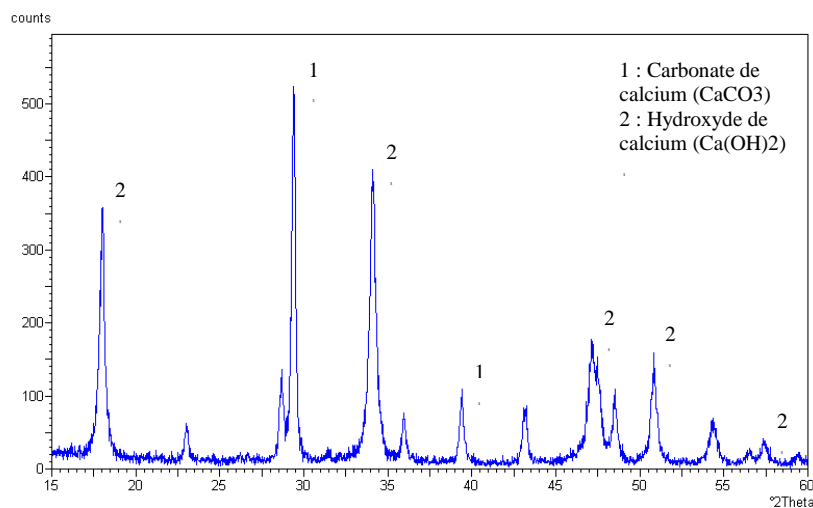


Fig. II. 7. Analyse chimique par DRX de la chaux hydraulique

Les masses volumiques absolue et apparente sont respectivement $2750 \pm 23 \text{ kg/m}^3$ et $666 \pm 8 \text{ kg/m}^3$, la surface spécifique (Blaine) est de l'ordre de $650 \pm 16 \text{ m}^2/\text{kg}$.

I. 3. 4. COMPOSITION CHIMIQUE DES AJOUTS MINÉRAUX

La synthèse des résultats de l'analyse chimique en (%) mentionnée dans le tableau II. 3, montrent que le calcaire et la chaux présentent une forte concentration en éléments basiques comme CaO, et une faible concentration en éléments oxydes comme les silicates SiO₂, et aluminates Al₂O₃. Néanmoins, la pouzzolane présente une forte concentration en SiO₂.

Tableau II. 3. Analyse chimique des ajouts minéraux

Ajouts	Calcaire [99]	Pouzzolane [53]	Chaux
SiO ₂	0,76	57,10	< 2,2
Al ₂ O ₃	0,41	15,82	< 1,0
Fe ₂ O ₃	0,23	6,16	< 2,0
CaO	54,9	5,95	67,4 - 73,25
MgO	0,61	2,09	< 0,4
K ₂ O	0,24	2,00	-
Na ₂ O	0,04	1,10	-
SO ₃	0,61	0,28	< 1,0
Cl	0,005	1,40	-
PF	36,3	-	-
LOI	-	1,20	-
K ₂ O+ NaO	-	-	< 0,4
CO ₂	-	-	< 5,0
CaCO ₃	-	-	< 10,0
Insoluble			< 0,35

I. 4. EAU DE GÂCHAGE

La qualité de l'eau joue un rôle primordial sur la qualité finale : les impuretés contenues dans l'eau peuvent influencer la prise du ciment ou la résistance du béton. Pour ces raisons, la qualité de l'eau de gâchage doit être contrôlée. La seule spécification, quant à la qualité de l'eau, est qu'elle doit être potable. Généralement, la qualité de l'eau potable est convenable pour la fabrication du béton [21,97], de plus, elle ne nécessite aucun essai (NF EN 1008-2003).

L'eau de gâchage utilisée dans cette étude est une eau potable, provenant du château d'eau de la zone de M'hafir, qui alimente l'université de Laghouat et par conséquent le laboratoire du département de génie civil. Une analyse physico-chimique a été faite au laboratoire de l'EPDEMIA pour la confirmation de la qualité de cette eau et les résultats

obtenus sont présentés dans (**I'annexe (I)**). La norme Algérienne, comme la montre les figures de (**I'annexe (I)**), confirme la potabilité de l'eau. De plus, l'eau est dépourvue d'excès de sels, de sulfures et d'acides. Donc l'eau utilisée n'a aucun effet négatif sur le béton.

I. 5. ADJUVANT

Afin d'améliorer les performances du béton de sable, l'utilisation des adjuvants est indispensable [9,18]. L'adjuvant utilisé est de type MEDAPLAST- SP 40, conforme à la norme européenne EN 934-2. C'est un superplastifiant haut réducteur d'eau permettant d'obtenir des bétons et mortiers de très haute qualité. Le dosage préconisé est de 2% par rapport au poids du ciment. Il se présente sous forme de solution liquide qui se dilue facilement dans l'eau de gâchage.

I. 6. MATERIAUX LIGNOCELLULOSIQUES

Le choix des deux matériaux lignocellulosiques a été effectué sur la base de considérations environnementale et durable.

1- La paille d'orge est disponible en grande quantité dans la région de Laghouat, car il rentre dans le cadre de la mise en valeur des terrains agricoles pour lutter contre la désertification.

2- En ce qui concerne les copeaux de bois, se sont des déchets de menuiserie qui se trouvent en grande quantité et peuvent constituer une gêne environnementale dans la mesure où ils sont brûlés (CO₂).

I. 6. 1. COPEAUX DE BOIS

L'essence des copeaux de bois utilisés dans cette étude est le sapin. Ce choix se justifié par l'importance de son utilisation dans le domaine de la construction. De plus les copeaux de sapin présentent plusieurs avantages : leur faible masse volumique et leur faible conductivité thermique.

Le bois naturel est un matériau très complexe. La Fig. II. 8. (b,c,d) montre la structure fibreuse des copeaux de bois ainsi que leur structure irrégulière et rugueuse à l'échelle de l'agrandissement, ce qui facilite l'adhérence entre les copeaux de bois et la matrice cimentaire.

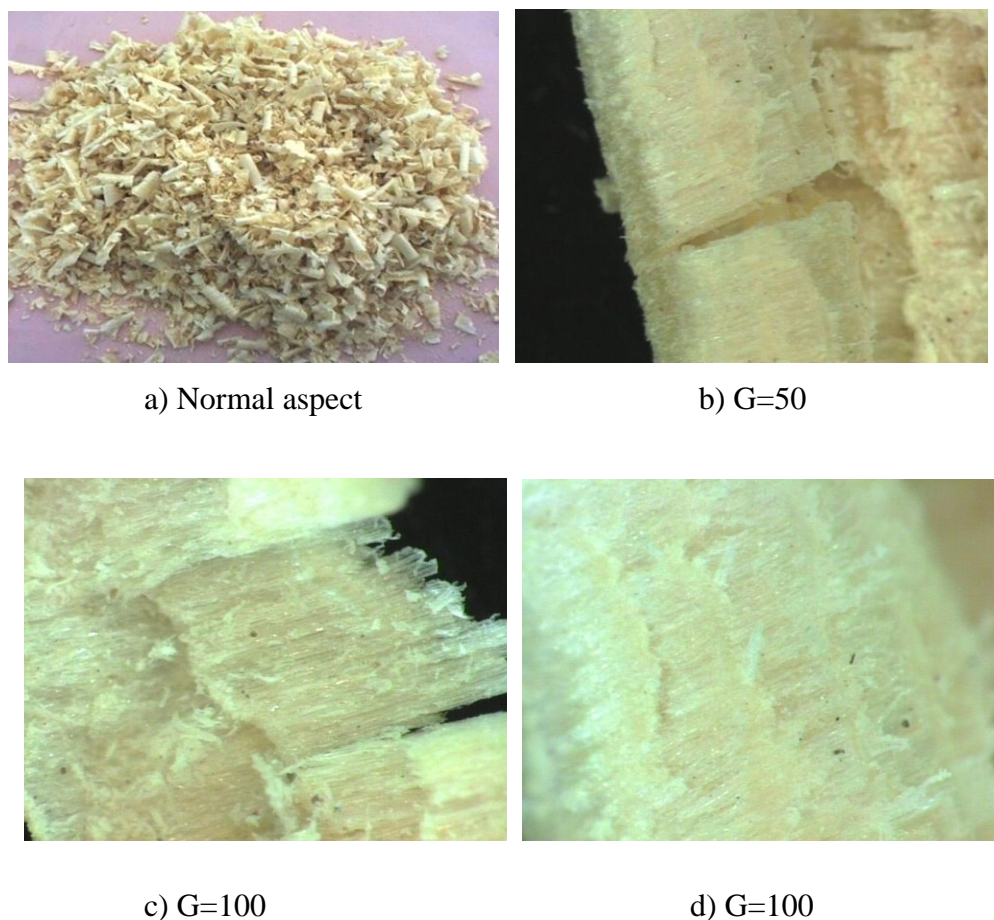


Fig. II. 8. Aspect général des copeaux de bois

Cependant, dans notre cas, les copeaux utilisés doivent respecter certains impératifs qui nous permettront de mieux cerner le comportement du composite. Il s'agit tout particulièrement de :

➤ La provenance des copeaux de la même menuiserie, pour maîtriser la qualité du produit fini, qui exigent soit l'utilisation d'une essence unique bien identifiée, soit l'utilisation de mélange d'essence en proportion constante [24].

➤ La régularité dimensionnelle. En effet, la granulométrie influe sur le comportement du composite à base de copeaux de bois, plus particulièrement sur les variations dimensionnelles [35]. On a enregistré une diminution dans le retrait en augmentant les dimensions des copeaux [24].

1) GRANULOMETRIE

L'analyse granulométrique des copeaux de bois est effectuée selon la norme européenne EN 12620. D'après la courbe de la Fig. II. 9, on remarque que les copeaux de bois utilisés

ont une granulométrie continue de 1 à 8 mm. Cette granulométrie va probablement contribuer à améliorer les performances du composite étudié. Il convient de signaler que ces résultats ne sont donnés qu'à titre indicatifs, vu la forme allongée des grains de bois et leur manque de rigidité.

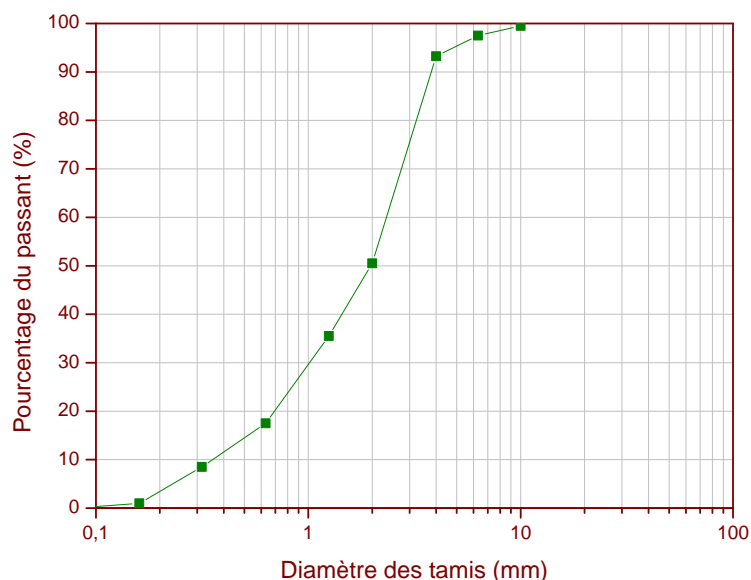


Fig. II. 9. Analyse granulométrique des copeaux de bois

2) MASSES VOLUMIQUES

a) Comme le cas pour tous les granulats légers, la mesure de la masse volumique apparente des copeaux de bois est très délicate, car elle dépend de la teneur en eau, de la granulométrie et de l'état d'empilement des copeaux (état lâche, état compacté) [35]. La valeur à l'état sec des copeaux de bois utilisés est 56 kg/m^3 .

b) La densité absolue des copeaux de bois peut être assimilée à la densité apparente du bois massif que certains auteurs nomment « densité réelle ». D'après les travaux de A. Ledhem [35], 1 m^3 de bois massif peut produire $8,8 \text{ m}^3$ de copeaux de bois ce qui est considérable. Pour cela nous avons calculé la masse apparente d'un morceau de bois de sapin de dimensions connues avec une teneur en eau de 12 à 15%. Donc la valeur de la masse volumique apparente du bois massif pour notre étude est de $506,28 \text{ kg/m}^3$.

3) CAPACITE D'ABSORPTION D'EAU

Les résultats sur plusieurs essais varient de 322% à 340%, avec une teneur en eau initiale constante 10%. On voit donc le potentiel hydrophile important du bois. Il a été retenu la valeur de 330%.

I. 6. 2. PAILLE D'ORGE

La paille de l'orge utilisée est issue de la moisson 2012. Le coefficient d'absorption d'eau de la paille est sensiblement le même que celui des copeaux de bois mais la cinétique est plus lente, comme le montre la Fig. II. 10. Notons que dans le cas de la paille humide, la réversibilité des déformations en flexion est totale, c'est-à-dire qu'après pliage de la paille, elle revient à son état initial.

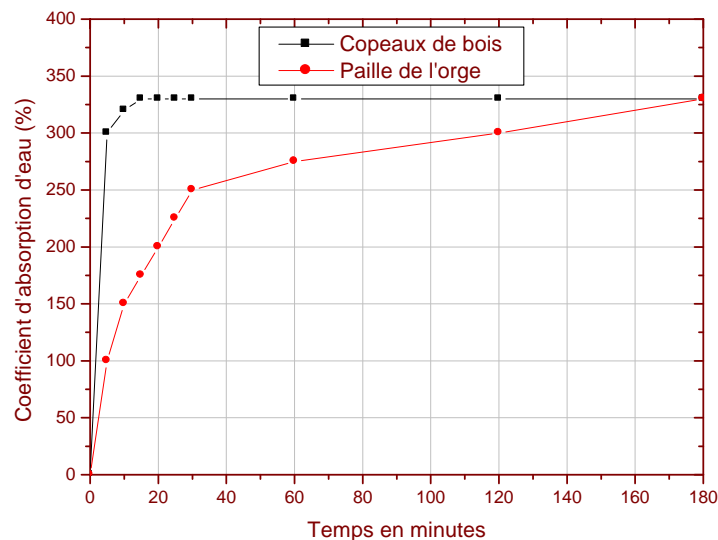


Fig. II. 10. Absorption d'eau des matériaux lignocellulosiques

Les longueurs de pailles utilisées sont de 3,5 cm pour les moules de (7x7x28 cm) et de 2 cm pour les moules de (4x4x16 cm). La paille (chaumes) utilisée comprend environ 70% de pailles sous forme tubulaire et 30% de pailles sous forme de fibres et de couvertures de pailles Fig. II. 11 (a,b). Ce mélange est représentatif de la composition du mélange naturel de la paille. La Fig. II. 11 (c) montre l'orientation longitudinale des fibres de la paille de forme tubulaire. La face intérieure de la paille d'orge montre des fibres longitudinales, ce qui facilite l'adhérence entre la paille et la matrice cimentaire (Fig. II. 11, d), ainsi qu'il existe des rétrécissements réguliers distants de 8 à 10 cm (Fig. II. 11 e).

La masse volumique apparente de la paille d'orge compactée est de $59,8 \text{ kg/m}^3$, cette valeur se rapproche à la valeur de la masse volumique apparente des copeaux de bois (56 kg/m^3).

Dans cette étude, la densité réelle (absolue) de la paille d'orge a été assimilée à la densité réelle des copeaux de bois dont la valeur est de $506,28 \text{ kg/m}^3$.



a) Pailles tubulaires (2 cm)

b) Pailles fibres (2 cm)



c) Extérieure G=100

d) Intérieur G=100

e) rétrécissement G=100

Fig. II. 11. Aspect général de la paille d'orge

Dans le but d'avoir une idée sur la rigidité de la paille d'orge, des essais de traction ont été réalisés par la presse de type Schimadzu pour des pailles de forme tubulaire dont le diamètre est environ 2,5 à 3 mm. Avant l'essai de traction, les pailles sont collées sur des cadres de papier de 2x2 cm de telle sorte que la longueur entre deux bords soit de l'ordre de $8 \text{ cm} \pm 1 \text{ mm}$. Les résultats de cet essai sont mentionnés dans le tableau II. 4. La Fig. II. 12. montre un exemple de déplacement par rapport à la force de traction.

Tableau II. 4. Résultats d'essai de traction d'une paille d'orge

Force maximale (N)	$68,86 \pm 3,70$
Contrainte maximale (MPa)	$115,38 \pm 6,21$
Déplacement (mm)	$0,863 \pm 0,093$
Module d'élasticité (MPa)	$9917,19 \pm 931$

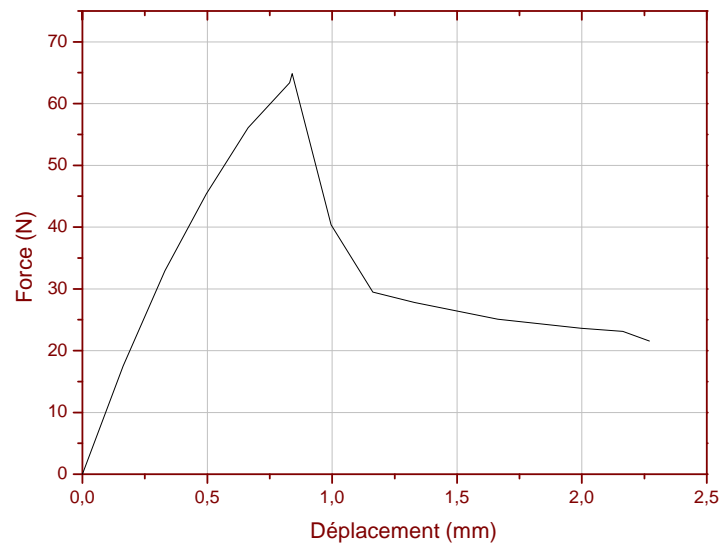


Fig. II. 12. Déplacement en fonction de la force de traction

II. TECHNIQUES DE MESURE EXPERIMENTALES

II. 1. MANIABILITE

Il n'existe pas d'essais qui permettent de mesurer directement la maniabilité. Des tentatives ont été faites pour relier la maniabilité du béton à des essais physiques facilement réalisables, mais aucun des essais développés jusqu'à maintenant ne permet de caractériser avec précision la maniabilité [21]. Pour notre étude, elle est faite à l'aide de l'essai le plus couramment utilisé qui est celui de l'affaissement au cône d'Abrams.

L'appareillage est complètement décrit dans la norme européenne EN 12350-2. Après démoulage, le béton n'étant plus maintenu, s'affaisse plus ou moins suivant sa consistance. La mesure doit être effectuée sur le point le plus haut du béton, dans la minute qui suit le démoulage et arrondi au centimètre le plus proche.

Afin de définir la classe d'affaissement, la norme européenne EN 206-1 définit les classes d'affaissement indiquées dans le tableau II. 5.

Tableau II. 5. Classes de consistance du béton

Affaissement (cm)	Classe d'affaissement
$1 \text{ cm} \leq A \leq 4 \text{ cm}$	Ferme
$5 \text{ cm} \leq A \leq 9 \text{ cm}$	Plastique
$10 \text{ cm} \leq A \leq 15 \text{ cm}$	Très Plastique
$\geq 16 \text{ cm}$	Fluide

II. 2. DETERMINATION DES PROPRIETES MECANIQUES

II. 2. 1. CARACTERISATION DES BETONS

II. 2. 1. 1. RUPTURE PAR FLEXION

L'essai s'effectue à l'aide d'une machine automatique de type Controls conformément à la norme européenne EN 12390 et EN 196-1. L'essai d'écrasement en traction par flexion sollicitant l'éprouvette en flexion à 3 points (Fig. II. 11). L'essai consiste à centrer la charge, à l'appliquer progressivement jusqu'à rupture à une vitesse de 5 kg/s, et à enregistrer la charge maximale supportée par l'éprouvette. Cet essai est réalisé sur des éprouvettes prismatiques de (7x7x28 cm) à raison de trois à quatre éprouvettes pour chaque composition. La rupture de chaque éprouvette est effectuée conformément au dispositif décrit sur la Fig. II. 13.

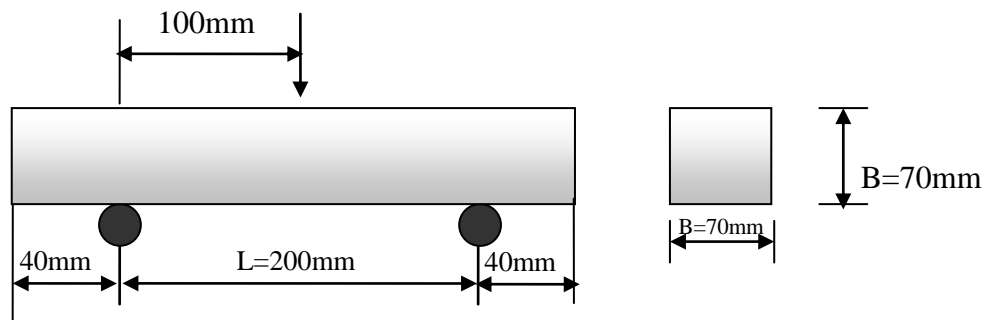


Fig. II. 13. Dispositif utilisé pour l'essai de rupture à la flexion

II. 2. 1. 2. RUPTURE PAR COMPRESSION

L'essai de compression est effectué à l'aide d'une presse universelle de type Controls, conformément à la norme européenne EN 12390 et EN 196-1. L'essai consiste à placer les demi-prismes de l'éprouvette obtenus après rupture en flexion, entre les plateaux de la presse sous des sections de $70 \times 70 \text{ mm}$ (Fig. II. 14). L'essai consiste à faire appliquer une

charge progressivement jusqu'à rupture à une vitesse de 240 kg/s, et enregistrer la charge maximale supportée par l'éprouvette.

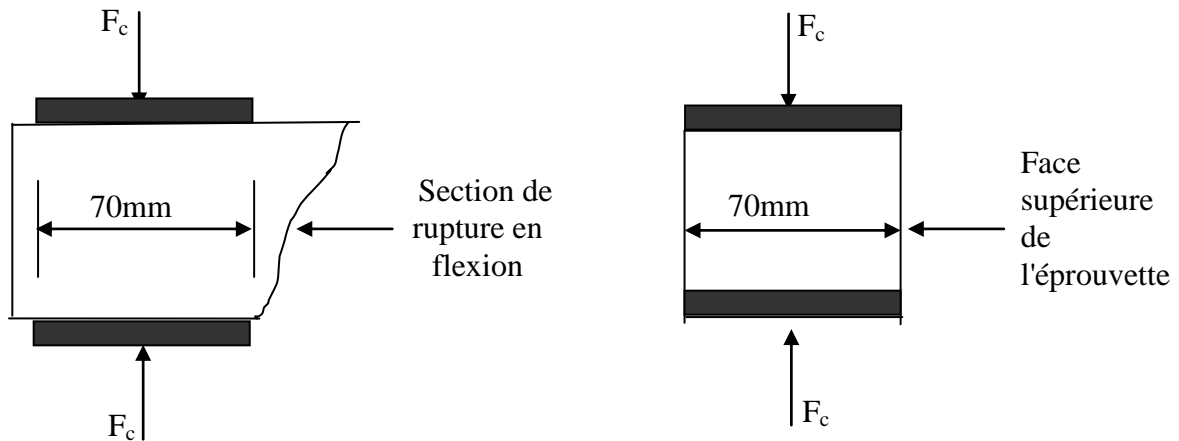


Fig. II. 14. Dispositif de rupture en compression

II. 2. 1. 3. DETERMINATION DU MODULE D'ELASTICITE

Le module d'élasticité en flexion a été déterminé par une presse de type Shimadzu à une vitesse de montée en charge égale à 50 N/s, conformément à la norme européenne EN-196-1 et la norme NBN EN 1015-11. Cet essai est réalisé sur des éprouvettes de (4x4x16 cm).

Le module d'élasticité en compression a aussi été déterminé par une presse de type Shimadzu, mais à une vitesse de montée en charge égale à 500 N/s, conformément à la norme NBN EN 1015-11. Cet essai est réalisé sur les deux prismes obtenus par flexion (Fig. II. 15).



Fig. II. 15. Presse de type Shimadzu

II. 2. 2. CARACTERISATION DE LA PAILLE

L'essai de traction de la paille d'orge a été déterminé par un appareil d'essai universel de type Shimadzu (Fig. II. 16) à une vitesse de 2 mm/min [14].

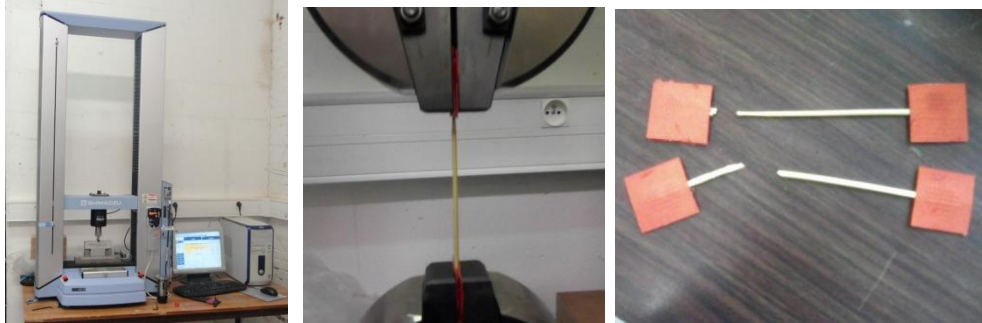


Fig. II. 16. Instrument de type Shimadzu

II. 3. MESURE DU RETRAIT

L'équipement nécessaire, tel que celui schématisé sur la Fig. II. 17, est constitué d'un comparateur permettant de réaliser des mesures avec une précision inférieure ou égale à 0,005 mm. Une tige d'Invar de 160 mm de longueur permet d'étalonner le déformètre. L'essai, décrit par la norme européenne EN 206-1, exige que la conservation des échantillons soit dans une salle où la température est maintenue à $(20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C})$ et l'humidité relative à $(50\% \pm 5\%)$. Pour le retrait, cet essai consiste à comparer à différents temps (t), la variation de longueur d'une éprouvette (4x4x16 cm), par rapport au temps (t_0) pris comme origine. En général, cette origine est prise au moment du démoulage, soit 24 heures après la confection des éprouvettes [97].

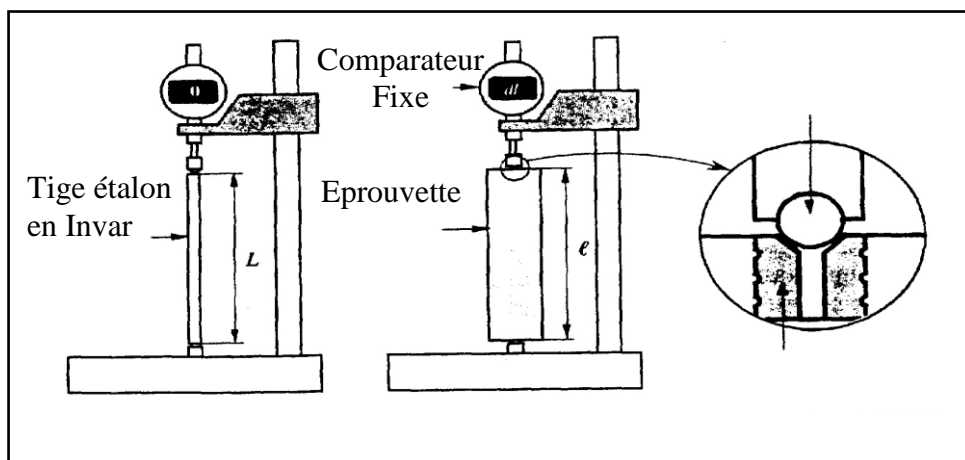


Fig. II. 17. Appareillage pour la mesure du retrait [97]

II. 4. CARACTERISATION THERMO-PHYSIQUES

Les mesures de la conductivité thermique, de la diffusivité thermique et de la chaleur spécifique des bétons étudiés ont été effectuées en utilisant le dispositif Hot Disk TPS 500, fonctionnant sur le principe de la technologie TPS avec un logiciel d'analyse. Ceci permet de déterminer toutes les caractéristiques thermiques d'un matériau en une seule opération. Le logiciel de test et d'analyse pour le système TPS 500 intègre des outils pour des mesures automatisées ainsi que le contrôle automatique de la température des périphériques externes. Le logiciel intègre également des outils pour exporter les résultats vers un logiciel tiers (MS Excel). Le test a été exécuté à l'aide d'une petite sonde de référence 5465 ayant pour rayon 3189 mm qui est placée entre deux échantillons prismatiques de 7x7x4 cm (Fig. II. 18).



Fig. II. 18. Instrument de mesure des propriétés thermo-physiques «Hot Disk TPS 500» et la sonde

II. 5. POROSITE ACCESSIBLE A L'EAU

La porosité accessible à l'eau a été déterminée conformément à la norme (NF EN 18-459). L'objectif est de mesurer le pourcentage de vides connectés à la surface du béton grâce à un dessiccateur en verre à disque perforé qui est relié par deux tuyaux, un pour la pompe à vide à manomètre à pression négative et un pour le récipient d'eau avec robinet d'arrêt, voir Fig. II. 19. La balance utilisée a une précision de l'ordre du mg.

Après séchage à 70°C jusqu'à masse constante, soit M_s , les éprouvettes (4x4x4 cm) sont placées sous vide pendant 4h (pression 25 mbars). L'aspiration de l'eau se fait grâce au vide (recouvrir les éprouvettes à 20 mm d'eau minimum) et la saturation sous vide est maintenue pendant 72h. La masse dans l'air de l'éprouvette saturée d'eau est M_h . La porosité accessible à l'eau est déterminée par la formule :

$$(M_h - M_s) \rho_{\text{eau}} / \text{volume total}$$

(II. 1)

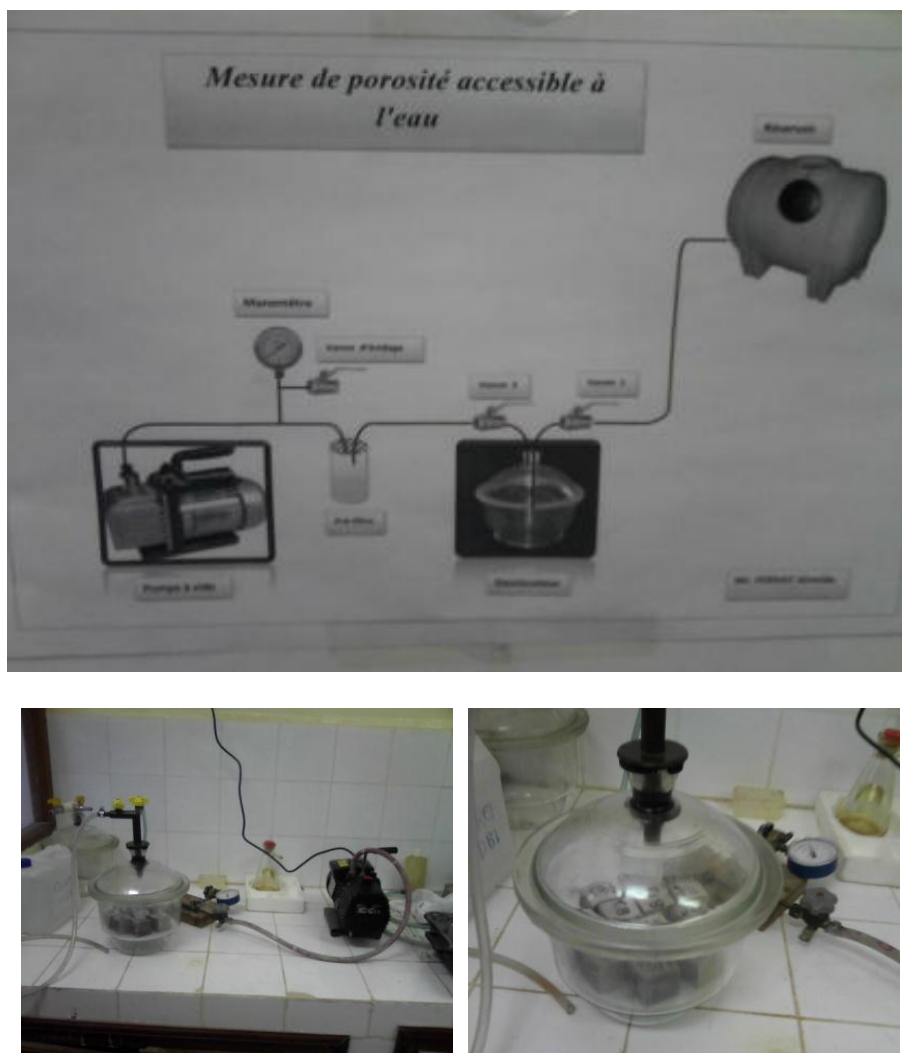


Fig. II. 19. Instrument de mesure de la porosité accessible à l'eau

II. 6. ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE

1) ANALYSE PAR SPECTROMETRIE INFRAROUGE A TRANSFORMEE DE FOURIER (IRTF)

L'analyse infrarouge a été réalisée grâce à un spectromètre Shimadzu IR Prestige-21 (Fig. II. 20). Les échantillons analysés ont été préalablement broyés, séchés à l'étuve à 50°C et mélangés à du bromure de potassium (KBr) à raison de 2 mg d'échantillon pour 190 mg de KBr. Le tout est placé dans un moule cylindrique entre deux pastilles métalliques puis soumis à une pression de 8 tonnes dans une presse à l'aide d'un piston et d'une pompe. Les pastilles obtenues sont analysés par transmission.

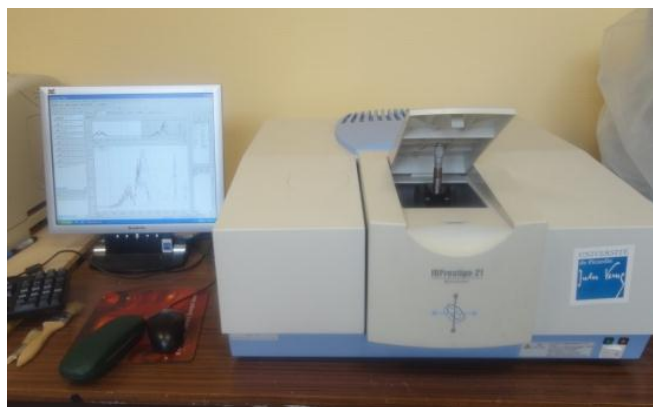


Fig. II. 20. Shimadzu IR Prestige-21

2) ANALYSE PAR DIFFRACTION DE RAYONS X

L'analyse par diffraction de rayons X (DRX) a été effectuée grâce à un diffractomètre de type X'Pert PHILIPS (Fig. II. 21) sur des échantillons broyés et tamisés à 80 μm . Les diffractogrammes sont des intensités de phases (pic) en fonction de l'angle de diffraction 2θ . Le programme de diffraction de rayons X adopté est 2θ : 10° - 70° et est en fonction de la nature de l'échantillon. Le temps total de l'essai est 33 minutes avec un pas de $0,03^\circ$. Le temps/pas est égale à 1 seconde.



Fig. II. 21. X'Pert PHILIPS

3) ANALYSE PAR MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

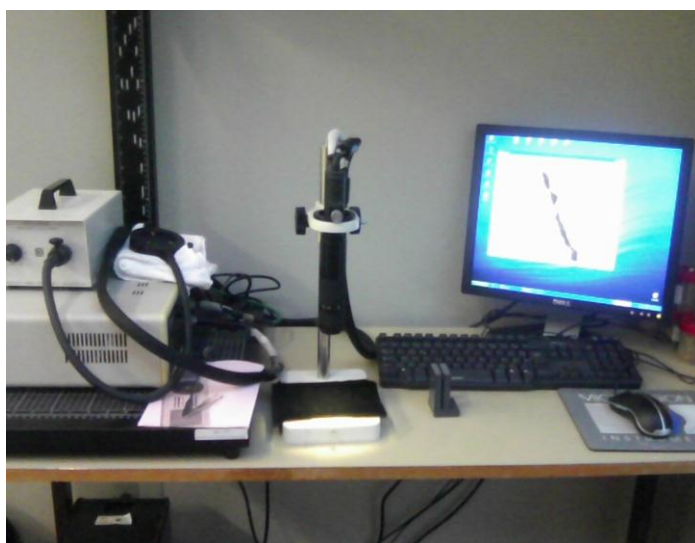
La microstructure des bétons légers élaborés a été étudiée par examen au microscope électronique à balayage FEI Quanta 200 F. Grâce à cette technique, l'aspect morphologique des matériaux composites a pu être directement visualisé. Les images sont obtenues suite à la focalisation d'un faisceau d'électrons sur l'échantillon et à l'interaction électron-matière par réémission d'électrons secondaires. Par conséquent, pour être observé, un échantillon

doit présenter une conductibilité électrique superficielle pour éviter la formation de charges électriques qui déforment l'image. Comme les échantillons sont non conducteurs, il a donc été également nécessaire, de rendre leur surface conductrice en déposant sur l'échantillon séché à l'étuve à 50°C (jusqu'à masse constante) une pellicule d'or par pulvérisation cathodique sous vide.

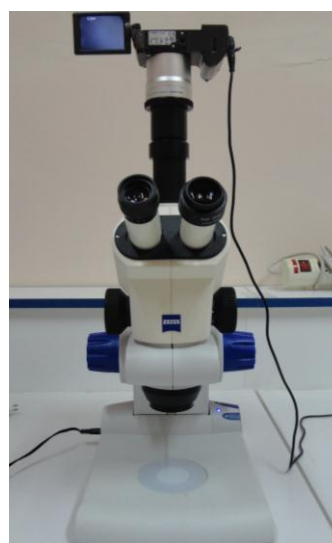
4) IMAGERIE OPTIQUE ET LOUPE BINOCULAIRE

Les copeaux de bois, la paille de l'orge et les résultats des composites cimentaires sont évalués par imagerie optique (Fig. II. 22 (a)). L'équipement utilisé est lié à un ordinateur qui consiste à observer avec un vidéo microscope (Controlab), des grossissements jusqu'à 300 avec 25x-175x et 150x-300x, il est associé avec un écran couleur contenant 507-688 pixels, un faible éclairage circulaire et un logiciel VIDEOMET (Controlab). Ce logiciel permet de mesurer les caractéristiques géométriques par une simple observation.

D'autres images des bétons étudiés ont été observés par une loupe binoculaire de type Zeiss « Primo star » avec des grossissements jusqu'à 20, voir Fig. II. 22. (b).



a) Imagerie optique



b) Loupe binoculaire

Fig. II. 22. Imagerie optique et loupe binoculaire

III. CONCLUSION

D'une façon générale, et à l'exception des copeaux de bois et de la paille d'orge, les différentes analyses physiques et chimiques menées sur les matières premières, montrent qu'il n'y a aucun risque qui peut affecter les propriétés du composite et qui exige la prise

de certaines des précautions afin de remédier à un éventuel problème ou revoir complètement un autre constituant. Toutes les caractéristiques physiques et chimiques sont bonnes ou acceptables.

Par contre, la paille d'orge a un coefficient d'absorption d'eau de 330% qui se fait avec une cinétique lente, contrairement aux copeaux de bois dont la cinétique d'absorption d'eau est rapide. De plus, la paille humide a un avantage, très intéressant, à savoir la réversibilité des déformations en flexion est totale. De ce qui précède, l'hypothèse de la substitution totale ou partielle des copeaux de bois par de la paille d'orge pourra probablement contribuer favorablement à l'amélioration des propriétés mécaniques, thermo-physiques et surtout le retrait pour les bétons étudiés.

En deuxième partie de ce chapitre, les techniques expérimentales qui ont été utilisées pour la détermination des différents paramètres étudiés ont été présentées.

TROISIEME CHAPITRE

Résultats expérimentaux et analyse

CHAPITRE III :
RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

INTRODUCTION

L'objet de ce chapitre est la présentation des résultats expérimentaux et analyse des bétons de sables légers afin de cibler la notion d'éco-béton. La première partie est axée sur l'étude de l'effet des ajouts minéraux proposés, par substitution massique au ciment Portland au calcaire, sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de sables alluvionnaire-dunaires. L'objectif est de réduire l'utilisation du ciment et par conséquent de réduire les émissions de CO₂.

La deuxième partie est consacrée à l'étude de l'effet de l'allègement de la composition optimale du béton de sable avec ajouts minéraux par des matériaux lignocellulosiques qui sont les copeaux de bois et la paille d'orge, séparé et en combinaison. L'objectif est de déterminer la composition optimale d'un béton de sable léger isolant-porteur destiné à la construction des murs extérieurs en milieux arides.

La troisième partie de ce chapitre est consacrée à l'étude microstructurale des bétons étudiés.

Enfin, la quatrième partie est une synthèse des résultats relatifs aux trois parties citées précédemment.

I. EFFET DE SUBSTITUTION DU CIMENT PAR DES AJOUTS MINERAUX

I. 1. ELABORATION DES MATERIAUX

La composition optimale du béton de sable, prise comme référence pour notre étude, est inspirée des travaux de M. Bederina et al. [95]. Les proportions du mélange de sable alluvionnaire-dunaire, sont préparées selon le rapport SA/SD = 1,7. (SD représente environ 37,00% du sable total). De ce qui précède, la composition de base du béton de sable pour notre étude est comme suit [19] :

- Sable de dune (SD) + sable alluvionnaire (SA) 1316 kg/m³.
- Filler de calcaire 135 kg/m³.
- Ciment 350 kg/m³.
- Eau 210 l/m³.

- Superplastifiant 2% (par rapport au poids du ciment).

D'après la fiche technique, le ciment au calcaire contient un seul ajout initial qui est le calcaire dont la proportion varie de 6% à 20%. Le clinker varie de 80% à 94%. Le choix des ajouts minéraux utilisés dans cette étude est inspiré de la bibliographie et s'appuie sur des considérations économiques et environnementales. Les différents types d'ajouts minéraux utilisés dans cette étude sont :

- **Ajout A** : le calcaire (ajout en général considéré comme inerte).
- **Ajout B** : la pouzzolane naturelle (ajout actif).
- **Ajout C** : la chaux hydraulique (ajout actif).
- **Ajout D** : le calcaire (ajout inerte) + la pouzzolane naturelle (ajout actif) + la chaux hydraulique (ajout actif).
- **Ajout E** : la pouzzolane naturelle (ajout actif) + la chaux hydraulique (ajout actif).

Les différents pourcentages d'ajouts utilisés sont 5%, 10%, 15% et cela pour les cinq types d'ajouts. Les ajouts minéraux sont substitués au ciment (pourcentage massique). Le rapport eau / (ciment + % ajout) est fixé à 0,6 pour toutes les compositions étudiées. Cette valeur correspond à un affaissement de 9 cm au cône d'Abrams qui assure une bonne maniabilité pour la composition de base confectionnée avec le ciment portland au calcaire.

Afin de mieux homogénéiser le mélange, ce qui contribue à une bonne qualité du béton et par conséquent au bon contrôle des différentes propriétés du produit fini, la procédure suivante est adoptée : tout d'abord on effectue un malaxage à sec du ciment et des ajouts minéraux pendant une minute à vitesse lente [2]. Ensuite, on ajoute le sable alluvionnaire-dunaire et les fillers de calcaire, au cours d'un malaxage à sec effectué pendant trois minutes à vitesse lente [3,41]. Enfin, l'eau de gâchage est ajoutée progressivement au mélange sans interrompre le malaxage afin de garantir l'homogénéisation du mélange durant trois minutes à vitesse lente [3,41].

Après malaxage, le matériau est introduit dans des moules prismatiques de 4x4x16 cm pour le retrait et 7x7x28 cm pour les propriétés mécaniques. Le démoulage se fait après 24 heures.

La conservation se fait à une température $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ et $50\% \pm 10\%$ d'humidité relative avant et après démoulage afin de se rapprocher au mieux des conditions climatiques réelles.

I. 2. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

L'interprétation des résultats est axée sur l'étude de l'effet des ajouts minéraux sur les propriétés du béton frais, les propriétés physico-mécaniques et le retrait afin de déterminer la composition optimale qui constitue le meilleur compromis entre les propriétés étudiées.

I. 2. 1. MANIABILITE

La Fig. III. 1, montre l'effet des ajouts minéraux sur la maniabilité des bétons étudiés. Lorsqu'on augmente le pourcentage de l'ajout A, la maniabilité des compositions étudiées augmente à partir d'un pourcentage d'ajout de 10%. La consistance du béton est très plastique pour des ajouts de 10% et 15%. Cette augmentation de la maniabilité peut s'expliquer par la réduction importante de la surface spécifique « Blaine » du filler calcaire (280 m²/kg) par rapport au ciment (444,9 m²/kg).

Lorsqu'on augmente le pourcentage des ajouts B et D, la maniabilité des compositions étudiées reste presque identique à celle de la composition de base, avec un affaissement de 9 cm. Pour l'ajout B, cela s'explique par la surface spécifique « Blaine » de la pouzzolane (388 m²/kg) qui est légèrement inférieure à celle du ciment (444,9 m²/kg). Cependant, pour l'ajout D, cela s'explique par la valeur moyenne de la surface « Blaine » des trois ajouts qui est de 439,33 m²/kg (pour la chaux : 650 m²/kg, le filler calcaire : 280 m²/kg et la pouzzolane : 388 m²/kg) et qui est très proche de celle du ciment (444.9 m²/kg).

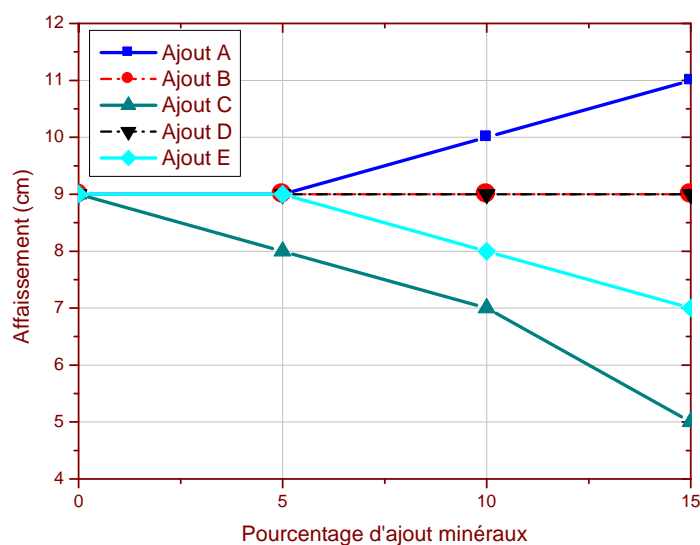


Fig. III. 1. Maniabilité des bétons étudiés

Lorsqu'on augmente le pourcentage de C et E, la maniabilité des compositions étudiées diminue à partir de 5% d'ajout pour C et 10% d'ajout pour E. La composition avec 15% d'ajout de chaux se rapproche de la limite supérieure de la classe d'affaissement du béton ferme soit $1 \text{ cm} \leq A \leq 4 \text{ cm}$. Cette réduction de la maniabilité peut s'expliquer par la surface « Blaine » de la chaux ($650 \text{ m}^2/\text{kg}$) qui est plus grande que celle du ciment, surtout pour l'ajout C et cela pour les différents pourcentages d'ajouts. Néanmoins, pour l'ajout E, la maniabilité diminue à partir de 10%, cela s'explique par la présence de la pouzzolane.

I. 2. 2. RESISTANCE A LA FLEXION ET LA COMPRESSION

Les résultats de la résistance à la flexion et la compression pour le pourcentage de 05%, 10% et 15% relatifs aux différents ajouts minéraux des bétons étudiés sont donnés dans le tableau III. 1. jusqu'à III. 3.

Tableau III. 1. Propriétés mécaniques des bétons étudiés de 05% d'ajout

Type des bétons étudiés	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)	
		28 jours	90 jours
00% d'ajout	$4,41 \pm 0,36$	$16,00 \pm 0,81$	$19,70 \pm 0,55$
05% d'ajout A	$4,95 \pm 0,29$	$15,83 \pm 0,84$	$19,23 \pm 0,48$
05% d'ajout B	$5,12 \pm 0,28$	$17,50 \pm 0,81$	$21,34 \pm 0,15$
05% d'ajout C	$4,79 \pm 0,28$	$19,16 \pm 0,62$	$21,43 \pm 0,34$
05% d'ajout D	$4,40 \pm 0,16$	$21,47 \pm 0,48$	$21,66 \pm 0,30$
05% d'ajout E	$4,41 \pm 0,22$	$19,84 \pm 0,22$	$21,47 \pm 0,48$

Tableau III. 2. Propriétés mécaniques des bétons étudiés de 10% d'ajout

Type des bétons étudiés	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)	
		28 jours	90 jours
00% d'ajout	$4,41 \pm 0,36$	$16,00 \pm 0,81$	$19,70 \pm 0,55$
10% d'ajout A	$4,40 \pm 0,14$	$14,66 \pm 0,62$	$18,03 \pm 0,35$
10% d'ajout B	$4,74 \pm 0,33$	$16,00 \pm 0,40$	$16,49 \pm 0,31$
10% d'ajout C	$4,71 \pm 0,04$	$14,00 \pm 0,70$	$18,39 \pm 0,31$
10% d'ajout D	$4,34 \pm 0,21$	$20,79 \pm 0,54$	$21,58 \pm 0,23$
10% d'ajout E	$4,33 \pm 0,16$	$18,49 \pm 0,44$	$20,11 \pm 0,50$

Tableau III. 3. Propriétés mécaniques des bétons étudiés de 15% d'ajout

Type des bétons étudiés	Résistance à la flexion (MPa)	Résistance à la compression (MPa)	
		28 jours	90 jours
00% d'ajout	4,41 ± 0,36	16,00 ± 0,81	19,70 ± 0,55
15% d'ajout A	4,13 ± 0,08	13,50 ± 0,70	17,34 ± 0,51
15% d'ajout B	4,54 ± 0,10	13,33 ± 0,47	17,61 ± 0,40
15% d'ajout C	4,70 ± 0,29	14,83 ± 0,62	18,56 ± 0,30
15% d'ajout D	4,00 ± 0,18	18,59 ± 0,63	19,76 ± 0,66
15% d'ajout E	4,33 ± 0,22	19,17 ± 0,55	20,51 ± 0,47

La résistance à la compression projette généralement une image globale de la qualité d'un béton, c'est l'élément clé lors de la conception des structures en béton [21]. D'après la Fig. III. 2, tous les bétons étudiés avec un pourcentage de 5% d'ajouts minéraux ont donné des résistances à la compression à 90 jours supérieures à celle de la composition de base sauf pour l'ajout A. L'optimum d'ajout A et C est proche à la littérature pour des mortiers qui sont de 4% et 5% respectivement [45,51], mais pour l'ajout B est de 10 à 20% [51].

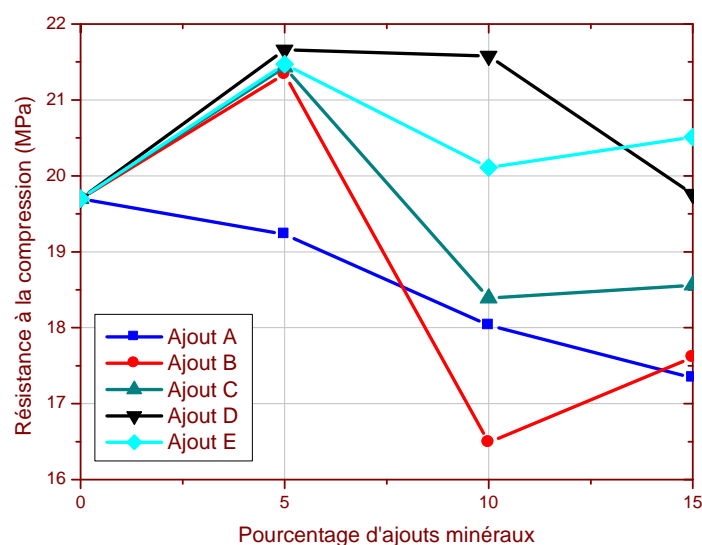


Fig. III. 2. Résistance à la compression à 90 jours des bétons à base de différents types et teneurs en addition minérale

D'après la Fig. III. 2, tous les bétons étudiés avec un pourcentage de 5% d'ajouts minéraux ont donné des résistances à la compression à 90 jours supérieures à celle des compositions avec un pourcentage de 10% et 15%. L'ajout D est le meilleur pour un pourcentage de 5% et 10% d'ajout minéraux. A 15%, l'ajout E présente une résistance légèrement supérieure à

celle de l'ajout D. On optera pour l'ajout D en raison des valeurs obtenues pour la consistance.

Pour 15% d'ajout B, la résistance à 90 jours remonte d'environ 6,79% par rapport à 10% d'ajout. Mais elle reste inférieure de 3,73 MPa environ 17,47% par rapport à 5% d'ajout. Cette légère augmentation de la résistance peut s'expliquer par le pourcentage et rôle de la pouzzolane naturelle comme ajout actif dans le développement des réactions chimiques à long terme, sachant qu'à 28 jours la résistance de 15% d'ajout était inférieure à 10%.

I. 2. 3. RETRAIT

D'après la Fig. III. 3, tous les bétons étudiés avec ajouts minéraux ont donné des retraits supérieurs à celui de la composition de base. A noter que le retrait du béton à base de l'ajout A, en général considéré comme inerte, est inférieur à celui des bétons à base des autres types d'ajouts. A l'exception du cas de l'ajout A, cette augmentation du retrait est en accord avec celle observée dans le cas des mortiers en comparaison avec des mortiers témoins (sans ajout) [51,54].

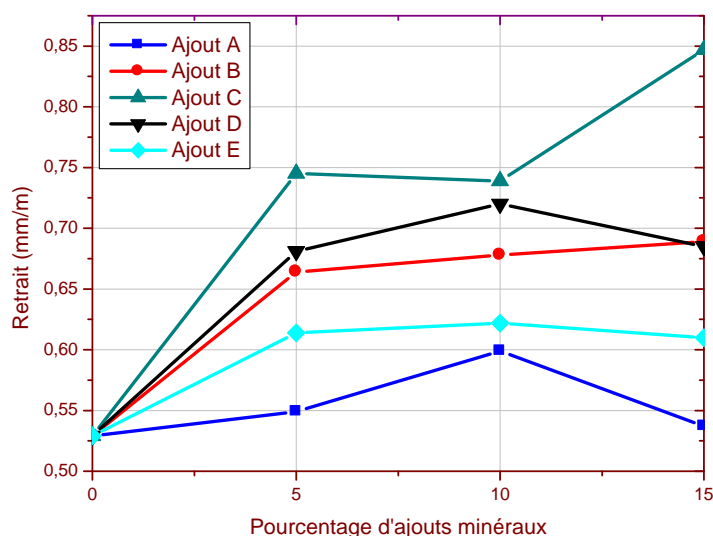


Fig. III. 3. Retrait des bétons étudiés à 90 jours

I. 2. 4. CHOIX DE LA COMPOSITION OPTIMALE

Ce sont donc les compositions contenant l'ajout D dans des proportions de 5%, 10% et 15% qui ont été retenues car elles constituent le meilleur compromis entre les propriétés étudiées : une maniabilité proche des compositions (sans ajouts minéraux et avec l'ajout

B), une résistance à la compression améliorée ou égale, une augmentation du retrait restant dans des limites raisonnables. Une synthèse des valeurs obtenues est reportée dans le tableau III. 4.

Tableau III. 4. Propriétés mécaniques et retraits des bétons étudiés

Type des bétons étudiés	Masse volumique (kg/m ³)	Résistance à la compression à 90 j (MPa)	Retrait à 90 j (mm/m)
Sans ajout	1992,57 ± 11,32	19,70 ± 0,55 soit : 00%	0,529 ± 0,022 soit : 00%
05% d'ajout D	2076,98 ± 22,91	21,66 ± 0,30 soit: + 9,94%	0,681 ± 0,020 soit: + 28,73%
10% d'ajout D	2041,53 ± 19,36	21,58 ± 0,23 soit : +9,54%	0,720 ± 0,034 soit: + 36,10%
15% d'ajout D	2026,29 ± 15,51	19,76 ± 0,66	0,685 ± 0,033

La Fig. III. 4, montre l'évolution de la résistance à la compression, de 28 jours à 90 jours. L'avantage est au profit des bétons avec 5 et 10% d'ajout avec une augmentation de 9,54 à 9,94% par rapport à la composition de base. Les performances du béton avec 15% d'ajout sont comparables à celles de la composition de base.

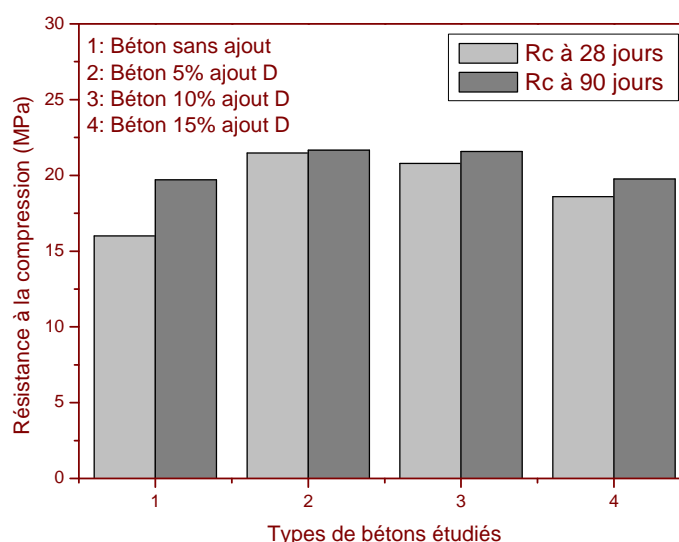


Fig. III. 4. Résistance à la compression à 28 et 90 jours des différents bétons étudiés

Ainsi, on peut constater que les performances obtenues pour 5 et 10% d'ajout D sont proches, mais avec un léger avantage pour 5%. Toutefois, pour des considérations

économiques et environnementales, on optera pour la composition du béton avec 10% d'ajout D, qui, pour la suite de l'étude deviendra le béton de référence sans ajout lignocellulosique. Les avantages de cette composition sont comme suit :

- 1- une économie de 10% de ciment, ce qui contribue favorablement à la réduction de la consommation d'énergie, et par conséquent à la réduction des émissions de CO₂, ce qui va dans le sens d'une approche environnementale et durable.
- 2- un béton plastique avec un affaissement de 9 cm au cône d'Abrams.
- 3- une augmentation de la résistance à la compression à 28 jours d'environ de 29,93% par rapport à la composition du béton de sable sans ajouts minéraux.
- 4- une augmentation de la résistance à la compression à 90 jours d'environ de 9,54% par rapport à la composition du béton de sable sans ajouts minéraux.
- 5- cette composition est plus légère que la composition à 05% d'ajout D (- 1,7%).
- 6- le seul inconvénient est le retrait avec une augmentation de 36,10% par rapport à la composition de base. Rappelons que l'ensemble des ajouts étudiés ont provoqué une augmentation du retrait par rapport à la composition de base.

Enfin, il faut noter aussi que la composition à 15% d'ajout D est en effet intéressante, car elle a donné des performances presque semblables à la composition de base et elle a conduit à des gains environnementaux et économiques plus importants.

II. EFFET D'ALLEGEMENT PAR DES MATERIAUX LIGNOCELLULOSIQUES

La première partie concerne l'étude de la maniabilité des bétons de sables allégés par la paille de l'orge et les copeaux de bois, séparé et en combinaison, afin de déterminer les compositions optimales.

La deuxième partie est consacrée à l'étude des propriétés physico-mécaniques de différents bétons de sable avec 10% d'ajout D :

- ✓ un béton de référence sans matériaux lignocellulosiques (BSML) ;
- ✓ un béton allégé par des copeaux de bois (BAC-60) à raison de 60 kg/m³ [43] ;
- ✓ deux bétons allégés respectivement par 10 et 15 kg/m³ de paille d'orge (BAP-10 et BAP-15) ;
- ✓ et, enfin, un béton allégé par un mélange de copeaux de bois et de la paille d'orge (BACP-35) avec 30 kg/m³ de copeaux de bois et 5 kg/m³ de paille d'orge.

Le choix de ces formulations est basé sur leur maniabilité : l'affaissement au cône d'Abrams varie de 5 à 6 cm, c'est la limite de la consistance du béton plastique.

II. 1. ELABORATION DES BETONS LEGRS

1) RAPPORT SABLE/MATERIAUX LIGNOCELLULOSIQUE

Dans cette étude, le calcul du rapport sable/matériaux lignocellulosiques est basé sur la détermination des volumes incorporés dans un mètre cube de béton. L'ajout de matériaux lignocellulosiques est effectué par substitution avec le sable. Sachant que les proportions de pailles envisagées varient de 0 à 20 kg/m³ avec un pas de 5 kg, les valeurs des rapports, sables/pailles de l'orge sont déterminées par la formule des volumes absolus (équation III. 1) sont indiquées sur le tableau (III. 1).

$$V_{SB} = V_{SN} + V_{ML} \quad (\text{III. 1})$$

avec V_{SB} : le volume de sable de base (Cas sans matériaux lignocellulosiques).

et V_{SN} : le nouveau volume de sable (Cas avec ajout de matériaux lignocellulosiques).

V_{ML} : le volume de matériaux lignocellulosiques.

2) DETERMINATION DE LA QUANTITE D'EAU TOTALE

Après un premier essai effectué sur la composition massique de 5 kg/m³ de paille d'orge afin d'avoir une idée sur la qualité du béton frais, après substitution du sable par la paille, l'équation III. 2. a été prise comme référence :

$$E_T = E_M + E_{Abs} \quad (\text{III. 2})$$

avec E_T : La quantité d'eau totale de la composition.

E_M : La quantité d'eau du mélange initial (210 l/m³).

E_{Abs} : La quantité d'eau d'absorption des matériaux lignocellulosiques.

Le béton obtenu présente une consistance très plastique. Il apparait donc nécessaire de réduire la quantité d'eau en excès pour les différentes compositions étudiées. Après avoir fixé au préalable les rapports massiques d'allègement par mètre cube de béton de sable, qui varient de 0 à 20 kg/m³ avec un intervalle de 5 kg/m³, il a été procédé à des essais de contrôle de la maniabilité et d'autre part connaître le taux de réduction d'eau pour chaque composition par rapport à l'eau de gâchage initiale.

Cette méthode de réduction d'eau est inspirée des travaux de Chi-Sun Poon et al. [100], où la procédure est de mélanger et ajouter de l'eau à la matière jusqu'au degré d'humidité désiré, c'est-à-dire quand un film d'eau pourrait être vu sur la surface totale de la particule [100]. D'après R. Kasemchaisiri et al. [101], il est raisonnable d'appliquer la rétention de l'eau au lieu de l'absorption d'eau pour concevoir la proportion des mélanges et contrôler les propriétés du béton frais, surtout la maniabilité.

La réduction d'eau du mélange est relative à la composition initiale du béton de sable. Cette réduction d'eau, peut être expliquée par deux phénomènes: l'eau nécessaire à l'hydratation après substitution du sable par les matériaux lignocellulosiques et la rétention de l'eau, qui est définie comme l'eau nécessaire pour remplir complètement les pores et à mouiller les surfaces des granulats sous condition gravitationnelle [101].

Après plusieurs essais expérimentaux, deux points importants sont à retenir :

➤ Le coefficient de réduction d'eau se situe aux alentours de 1,8 à 2,2 pour l'ensemble des compositions étudiées, ce qui signifie la réduction de deux litres d'eau de gâchage initiale par ajout de 1 kg de matériaux lignocellulosiques. Il convient de noter que cette réduction d'eau est similaire au comportement des copeaux de bois dans un béton de sable [43,64].

➤ Lorsqu'on augmente la proportion massique de matériaux lignocellulosiques, la maniabilité du béton diminue.

On prendra donc comme choix la valeur de réduction qui est (2 litres d'eau par ajout de 1 kg de matériaux lignocellulosiques), vu son effet favorable sur la maniabilité. On se basant sur l'équation III. 2 ($E_T = E_M + E_{Abs}$), on peut alors calculer la quantité d'eau totale (E_T) : avec E_M : La quantité d'eau initial (210 l/m^3) – ((2l d'eau) x teneur lignocellulosiques).

E_{Abs} : La quantité d'eau d'absorption (330%) x (teneur matériaux lignocellulosiques).

En résumé les différentes valeurs des matériaux utilisés pour la confection des bétons étudiés sont regroupées dans le tableau III. 5.

Tableau III. 5. Compositions des différents bétons étudiées

Type des bétons étudiés	Sable kg/m^3	Ciment kg/m^3	Ajouts minéraux kg/m^3	Filler calcaire kg/m^3	Eau totale l/m^3	ML kg/m^3		SP * (%)
						Bois	Paille	
BSML	1316	315	35	135	210	0	0	2
BAP-5	1292	315	35	135	216	0	5	2
BAP-10	1269	315	35	135	223	0	10	2
BAP-15	1245	315	35	135	229	0	15	2
BAP-20	1221	315	35	135	236	0	20	2
BACP-35	1150	315	35	135	255	30	5	2
BAC-60	1030	315	35	135	288	60	0	2

* Pourcentage par rapport au poids du ciment et ajouts minéraux

ML = matière lignocellulosique

2) MALAXAGE ET CONSERVATION

Afin de mieux homogénéiser le mélange, ce qui contribue à une bonne qualité du béton et par conséquent au bon contrôle des différentes propriétés du produit fini, la procédure suivante est adoptée, tout d'abord on effectue un malaxage à sec du ciment et les ajouts minéraux pendant une minute à vitesse lente [2]. Ensuite, on ajoute le sable alluvionnaire-dunaire et les fillers de calcaire, au cours d'un malaxage à sec effectué pendant trois minutes à vitesse lente [3,41]. Puis, on ajoute les matériaux lignocellulosiques saturés d'eau au cours du malaxage pendant trois minutes à vitesse lente [3,41]. Enfin, l'eau de gâchage est ajoutée progressivement au mélange sans interrompre le malaxage afin de garantir l'homogénéisation du mélange durant trois minutes à vitesse lente [3,41]. La conservation des éprouvettes est identique que les bétons avec ajouts minéraux.

II. 2. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE

II. 2. 1. MANIABILITE

La maniabilité a été étudiée pour toutes les compositions données par les formulations étudiées précédemment. La figure III. 5 montre l'existence d'une corrélation linéaire positive forte dont le coefficient de corrélation $R = 0,999$ entre le rapport E_T/C et la teneur en ajouts lignocellulosiques. Les affaissements au cône d'Abrams et la consistance ainsi obtenus sont donnés dans le tableau III. 6. pour les différentes compositions étudiées.

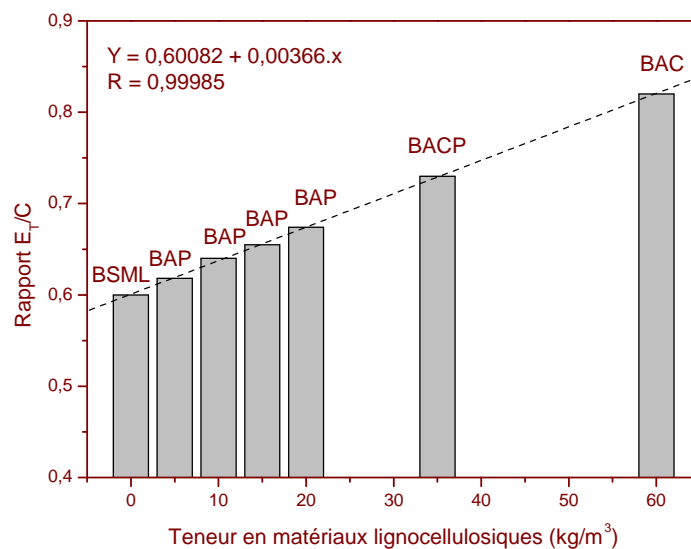


Fig. III. 5. Relation entre la teneur en matériaux lignocellulosiques et le rapport E_T/C

Tableau III. 6. Rapport E_T/C et consistance des différents bétons étudiés

Type des bétons étudiés	Affaissement (cm)	Consistance du béton	Rapport E_T/C
BSML	9	Plastique	0,60
BAP-5	7	Plastique	0,62
BAP-10	6	Plastique	0,64
BAP-15	5	Plastique	0,65
BAP-20	3	Ferme	0,67
BACP-35	6	Plastique	0,73
BAC-60	6	Plastique	0,82

Il semble, qu'en partant de la composition de base montrée auparavant, l'allègement pour la paille de l'orge est limité à une teneur de 15 kg. Lorsqu'on augmente la teneur en matériaux lignocellulosiques, le rapport E_T/C augmente et par conséquent l'affaissement diminue. Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus dans des travaux antérieurs sur des bétons de sables allégés par des copeaux de bois [43,64].

II. 2. 2. RETRAIT

D'après le tableau III. 7, la composition du béton allégée par les copeaux de bois (BAC-60) a donné un retrait de $1,233 \pm 0,038$ mm/m qui est supérieur à la valeur cible de 1mm/m. Néanmoins, l'ajout simultané des copeaux de bois et de la paille d'orge (BACP-35) a contribué favorablement à la réduction du retrait en enregistrant une valeur de $0,751 \pm 0,028$ mm/m, soit une augmentation de 4,30% par rapport à la composition de base (BSML) et des réductions de 11,54% et de 39,09% respectivement par rapport à la composition du béton allégée par la paille d'orge (BAP-10) et à la composition du béton allégée par les copeaux de bois (BAC-60). Ceci peut s'expliquer par le changement de la microporosité de la matrice qui est dû probablement à la réduction de la teneur en copeaux de bois au profit de la paille d'orge qui possède une porosité de nature très différente.

Tableau III. 7. Retraits des différents bétons étudiés

Type des bétons étudiés	Retrait (mm/m)
BSML	$0,720 \pm 0,034$
BAP-10	$0,849 \pm 0,010$
BAP-15	$0,830 \pm 0,032$
BACP-35	$0,751 \pm 0,028$
BAC-60	$1,233 \pm 0,038$

II. 2. 3. PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES

II. 2. 3. 1. TENEUR EN MATERIAUX LIGNOCELLULOSIQUES ET MASSE VOLUMIQUE

Lorsqu'on augmente la teneur en matériaux lignocellulosiques, la masse volumique diminue selon une corrélation qui suit une loi typiquement parabolique comme le montre la Fig. III. 6. Ces résultats sont similaires à ceux obtenus dans des travaux antérieurs menés sur les bétons de sables allégés par les copeaux de bois [3,64].

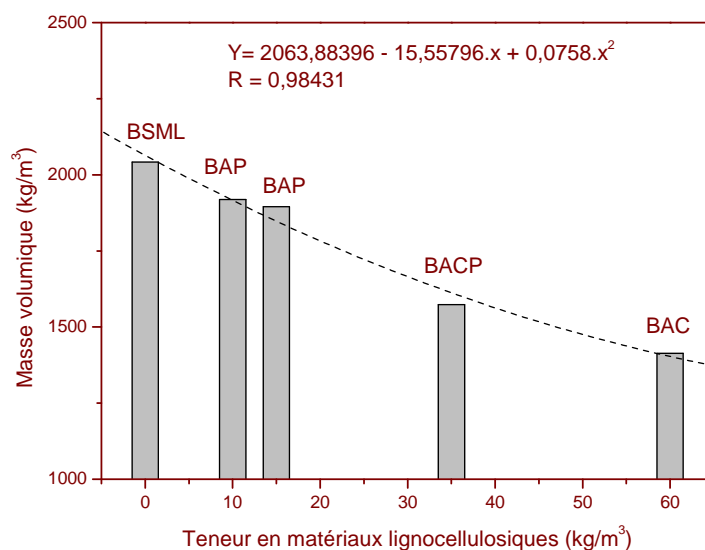


Fig. III. 6. Relation entre la masse volumique et la teneur en matériaux lignocellulosiques

II. 2. 3. 2. MASSE VOLUMIQUE SECHE ET POROSITE ACCESSIBLE A L'EAU

L'étude de la relation entre la masse volumique sèche et la porosité accessible à l'eau a montré l'existence d'une relation suivant une tendance linéaire négative avec un coefficient de corrélation $R = 0,997$, comme le montre la Fig. III. 7. D'après cette relation, on peut dire que l'influence des deux matériaux lignocellulosiques séparés et combinés est la même. Car ils ont les mêmes coefficients d'absorption d'eau, bien que qu'ils présentent des cinétiques différentes : lente dans le cas de la paille d'orge et rapide dans le cas des copeaux de bois.

Cette variation de la porosité accessible à l'eau s'explique par la structure poreuse des deux matériaux lignocellulosiques ainsi que leur nature fortement hygroscopique.

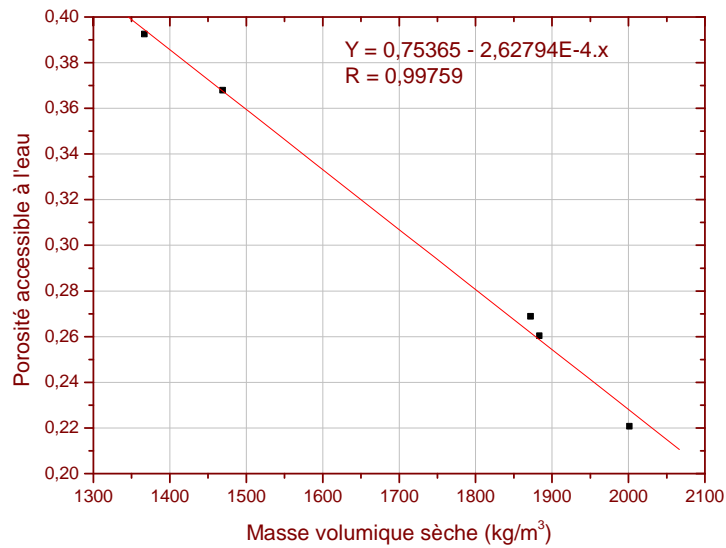


Fig. III. 7. Relation entre la masse volumique sèche et la porosité accessible à l'eau

II. 2. 3. 3. PROPRIETES THERMIQUES

Les valeurs de la conductivité thermique, de la chaleur spécifique massique et de la diffusivité thermique des bétons étudiés sont mentionnées dans le tableau III. 8.

Tableau III. 8. Propriétés thermo-physiques des bétons étudiés

Type des bétons étudiés	Masse volumique sèche (kg/m³)	Conductivité thermique (W/mK)	Chaleur spécifique (J/kgK)	Diffusivité thermique 10^{-6} (m²/s)
BSML	2003,12	1,40	1209,07	0,578
BAP-10	1885,15	1,35	1209,63	0,592
BAP-15	1873,56	1,32	1560,25	0,451
BACP-35	1470,57	1,00	1821,19	0,373
BAC-60	1368,38	0,80	1876,76	0,311

La relation entre la conductivité thermique (k) et la chaleur spécifique (cp) s'exprime par une des propriétés thermiques, à savoir la diffusivité thermique (a), qui est déterminée par l'équation (III. 3), où (ρ) est la masse volumique du béton.

$$a = k / \rho \times cp \text{ (m}^2\text{/s)} \quad \text{(III. 3)}$$

Puisque les bétons étudiés sont destinés à la construction de l'enveloppe bâtie en milieux arides, l'interprétation principale des résultats thermiques sera axée sur les valeurs de la

diffusivité thermique. Cette propriété thermique caractérise la notion d'inertie thermique, dont les valeurs sont intéressantes pour le béton (BAC-60), le (BACP-35) et le (BAP-15) avec des réductions de 46,19%, 35,46% et 21,97% respectivement par rapport au béton de base (BSML).

D'après Al Rim et al. [68], la conductivité thermique en fonction de la densité ($k = f(d)$), est une équation linéaire, pour un composite argile-ciment-bois, dans la gamme des densités comprises entre 370 et 1010 kg/m^3 . Néanmoins, la relation entre la conductivité thermique et la masse volumique, est une fonction exponentielle pour des bétons légers, dans la gamme des masses volumiques comprises entre 700 et 1800 kg/m^3 [102].

Pour notre étude et d'après la Fig. III. 8, c'est une fonction polynomiale avec un coefficient de corrélation très proche de 1. D'après cette relation, on peut dire que l'influence des deux matériaux lignocellulosiques séparé et combiné est la même. Car ils ont presque les mêmes masses volumiques apparentes et par conséquent l'hypothèse d'assimiler la masse volumique absolue des copeaux de bois et la paille d'orge à la masse volumique apparente du bois massif dont la valeur est de 506,28 kg/m^3 est faisable.

La tendance de la Fig. III.8 est similaire aux travaux de Bederina et al. [3] pour des bétons de sables allégés par des copeaux de bois.

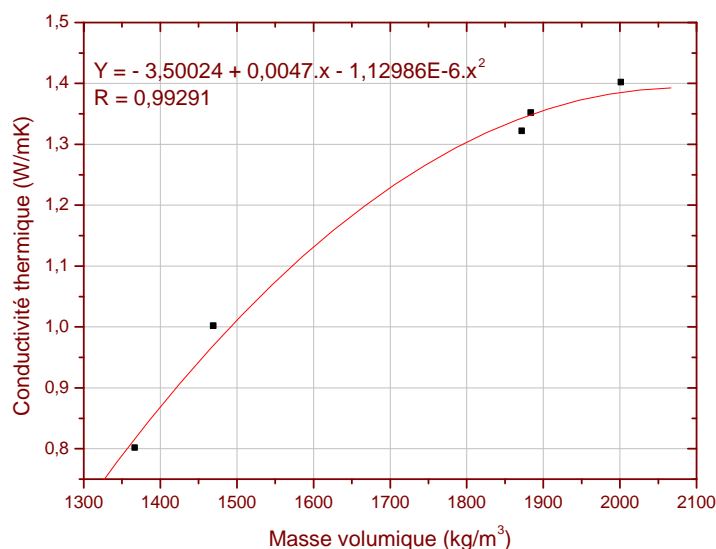


Fig. III. 8. Relation entre la masse volumique et la conductivité thermique

II. 2. 4. PROPRIETES MECANQUES

II. 2. 4. 1. RESISTANCE A LA FLEXION ET LA COMPRESSION

Les valeurs de la résistance en flexion et en compression des bétons étudiés sont regroupées dans le tableau III. 9. Comme il était prévisible, lorsque la masse volumique diminue, la résistance à la compression diminue. La Fig. III. 9. montre une forte corrélation avec un coefficient de corrélation proche de 1 suivant une équation polynomiale. Il n'existe pas de relation claire entre la masse volumique et la résistance en flexion pour l'ensemble des ajouts lignocellulosiques en raison probablement de leur différence morphologique. Le béton (BAP-15) présente la meilleure valeur en flexion.

Tableau III. 9. Propriétés mécaniques des bétons étudiés

Type des bétons étudiés	Résistance à la flexion (MPa) 28 jours	Résistance à la compression (MPa)	
		28 jours	90 jours
BSML	4,34 ± 0,21	20,79 ± 0,54	21,58 ± 0,23
BAP-10	3,42 ± 0,18	14,34 ± 0,33	14,53 ± 0,35
BAP-15	4,10 ± 0,10	13,07 ± 0,45	13,38 ± 0,15
BACP-35	2,67 ± 0,22	8,36 ± 0,26	8,88 ± 0,38
BAC-60	2,41 ± 0,09	6,38 ± 0,29	6,45 ± 0,12

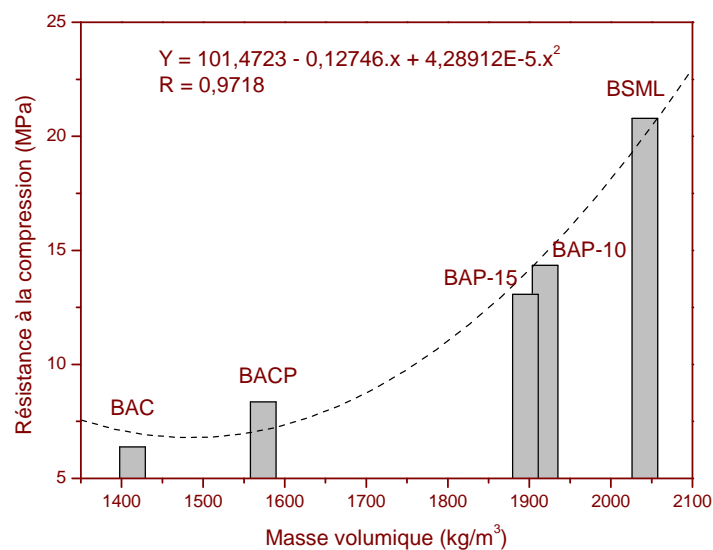


Fig. III. 9. Relation entre la résistance à la compression et la masse volumique

La résistance d'un béton bien compacté apparaît comme étant inversement proportionnelle au rapport Eau/Ciment. Elle a approximativement la forme d'une hyperbole. Cette relation est valable pour n'importe quel béton quels que soient le type de granulats et l'âge du béton [21]. Pour cette étude, il existe une relation similaire comme le montre la Fig. III. 10. suivant une équation polynomiale dont le coefficient de corrélation $R = 0,985$.

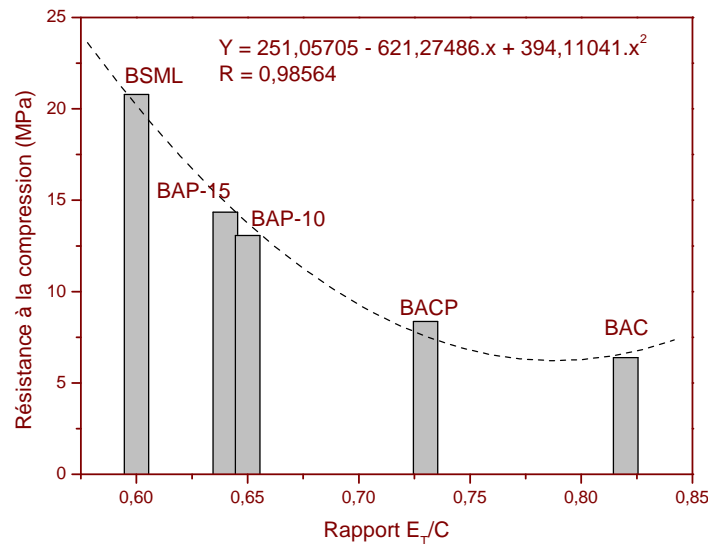


Fig. III. 10. Relation entre le rapport E_T/C et la résistance à la compression

II. 2. 4. 2. EFFET DE LA PAILLE SUR LA DUCTILITE ET LA TENACITE

La paille de l'orge a un effet positif sur l'amélioration de la ductilité et la ténacité du béton de sable, que se soit pour le béton (BAP-10), le (BAP-15) ou le (BACP-35). La contrainte maximale en flexion est atteinte, ce qui implique l'apparition visible des fissures mais l'éprouvette garde sa forme initiale comme le montre à titre d'exemple la Fig. III. 11. (a1,a2, b1,b2). Les deux prismes restent attachés par les fibres de la paille. Ceci s'explique par l'effet de la résistance à la traction de la paille de l'orge qui est importante. Après avoir exercé une force supplémentaire sur l'éprouvette, les fibres de la paille continuent à résister jusqu'à une valeur de $0,30 \pm 0,011$ kN, où l'ouverture de la fissure devient grande et facilite la séparation des deux prismes. Après arrachement, les fibres de la paille restent verticales par rapport au plan de la fissure comme le montre la Fig. III. 11. (a3,b3). Ce qu'il faut signaler est que le comportement de la paille est meilleur que celui des copeaux de bois. A noter aussi l'effet avantageux des fibres de la paille d'orge pour la résistance à la compression. Alors que la résistance maximale à la compression est atteinte l'éprouvette

garde sa forme initiale avec l'apparition de quelques fissures, comme le montre la Fig. III. 11 (a4,b4).

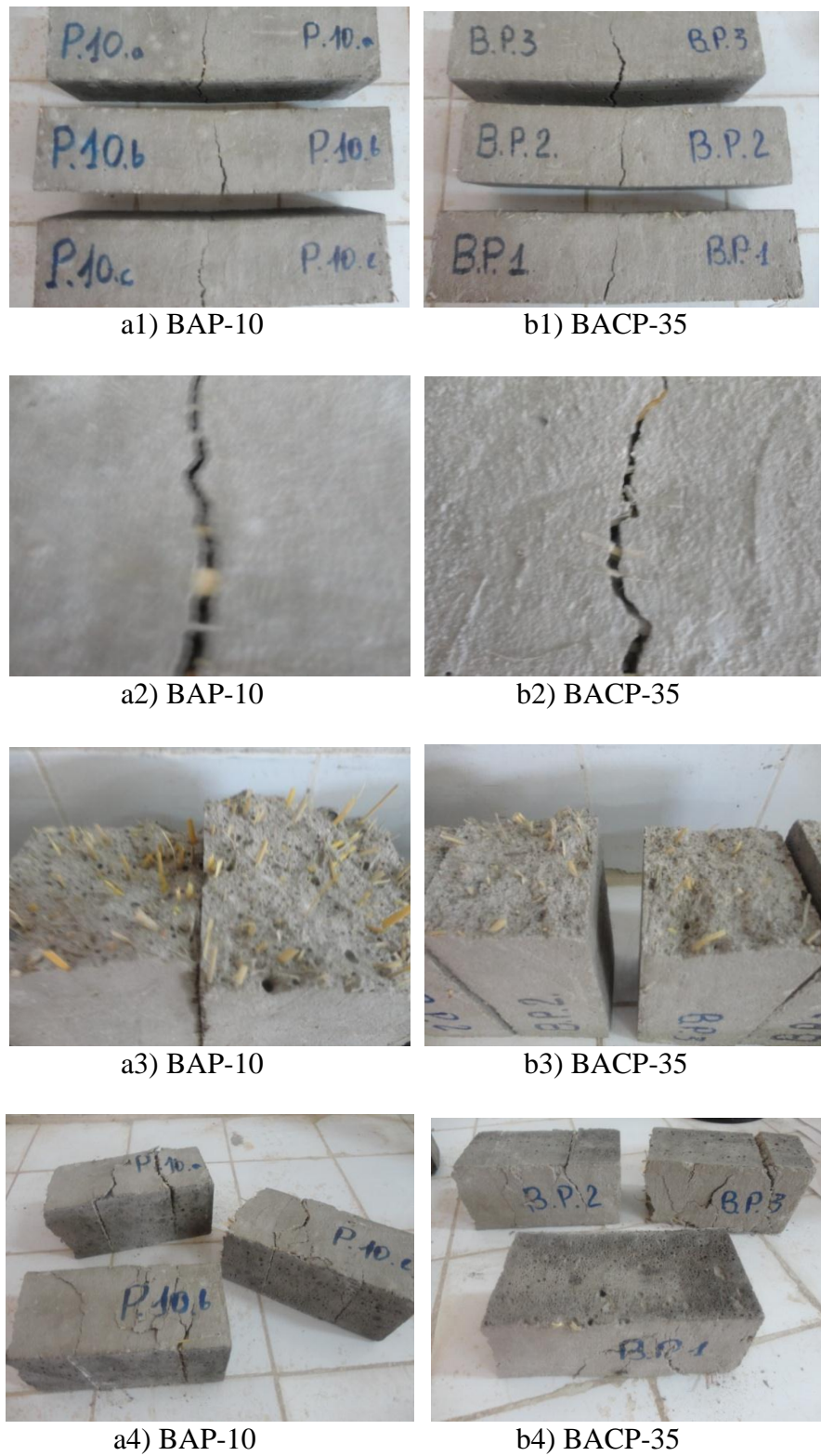


Fig. III. 11. Fissuration de l'éprouvette après l'essai de flexion et compression

Cette amélioration de la ductilité et la ténacité du béton de sable par la paille d'orge pour le béton (BAP-10), le (BAP-15) et le (BACP-35), s'explique par l'effet avantageux du comportement de la paille de l'orge qui est plus performante que les copeaux de bois, du point de vue la résistance à la traction. L'adhérence entre paille et matrice cimentaire est bonne, celle du bois aussi comme le montre la Fig. III. 12.

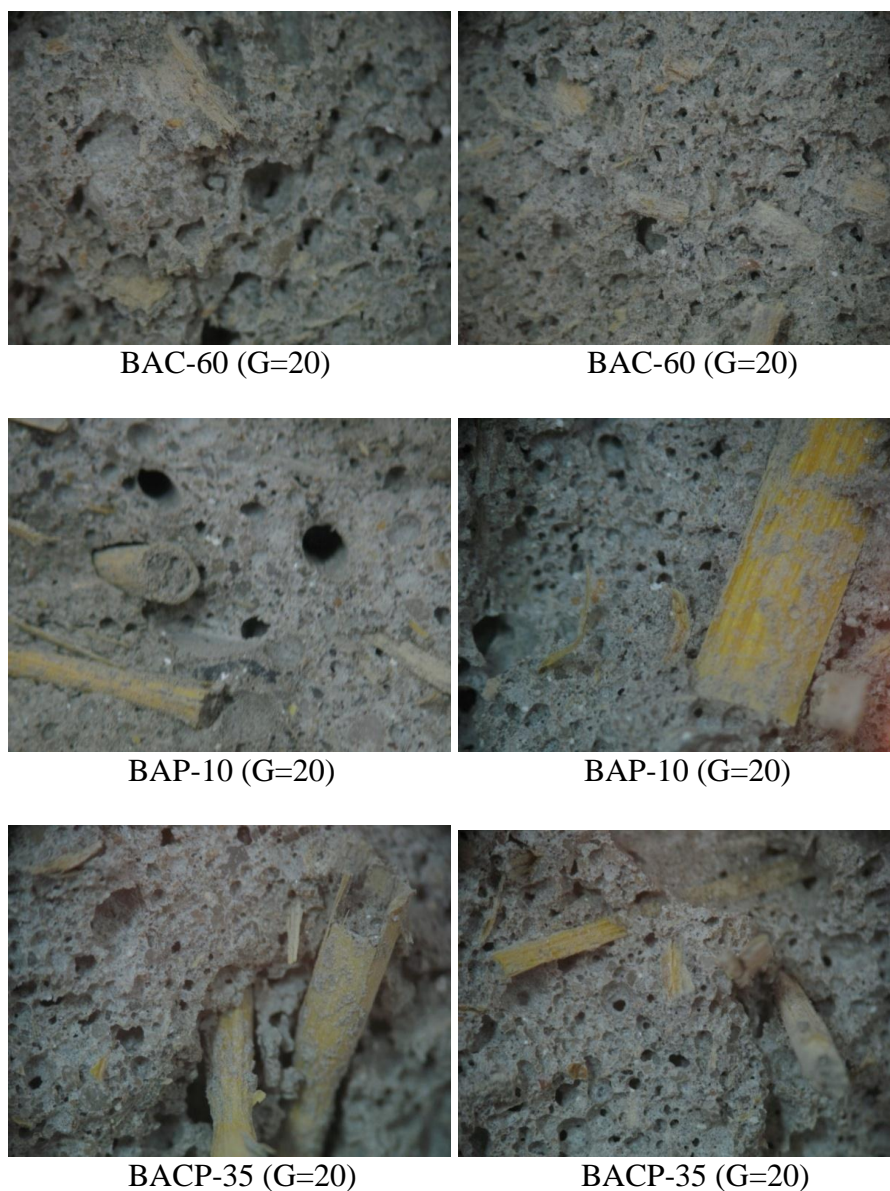


Fig. III. 12. Adhérence matériaux lignocellulosiques et matrice cimentaire

II. 2. 4. 3. MODULE D'ELASTICITE EN FLEXION ET EN COMPRESSION

Les résultats du module d'élasticité en flexion mesurés sur des éprouvettes de (4x4x16 cm) et du module d'élasticité en compression sur les deux prismes obtenus par flexion sur une section de (4x4 cm) sont mentionnés dans le tableau III. 10.

Tableau III. 10. Module d'élasticité en flexion et en compression des bétons étudiés

Type des bétons étudiés	Module d'élasticité en flexion (MPa)	Module d'élasticité en compression (MPa)
BSML	1228,04 ± 34,44	419,73 ± 4,93
BAP-10	981,87 ± 80,52	407,20 ± 2,98
BAP-15	846,27 ± 42,73	407,86 ± 6,18
BACP-35	870,51 ± 86,32	405,12 ± 4,71
BAC-60	823,92 ± 15,74	402,26 ± 6,45

D'après les résultats obtenus pour le module d'élasticité en flexion, il a été constaté que le (BACP-35) et le (BAP-15) sont proches. La réduction par rapport à la composition de base (BSML) est d'environ 29,11%. En ce qui concerne le module d'élasticité en compression des bétons étudiés, on constate que les valeurs sont aussi proches.

La Fig. III. 13. montre l'existence d'une corrélation très forte entre la résistance maximale en flexion et le module d'élasticité en flexion des bétons étudiés dont le coefficient de corrélation $R = 0,980$. La Fig. III. 14 (a,b,c et d) montre le déplacement en fonction de la contrainte maximale dans la partie élastique des bétons étudiés. Lorsque la contrainte maximale en flexion diminue, le déplacement diminue.

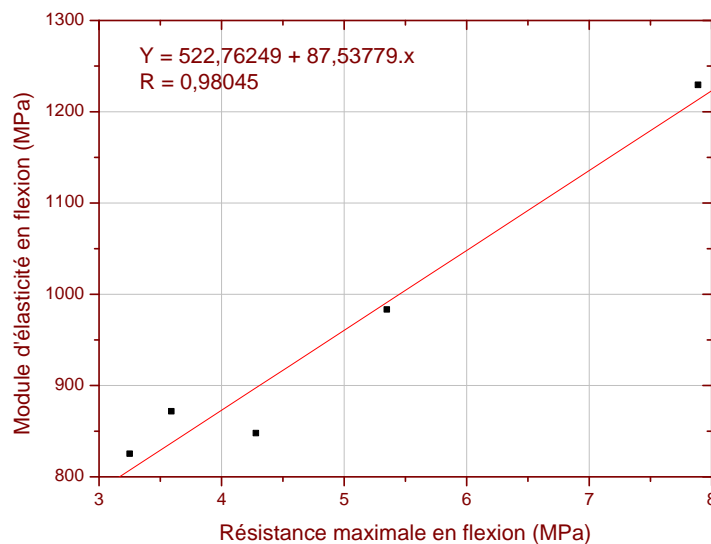


Fig. II. 13. Relation entre le module d'élasticité en flexion et la contrainte maximale en flexion

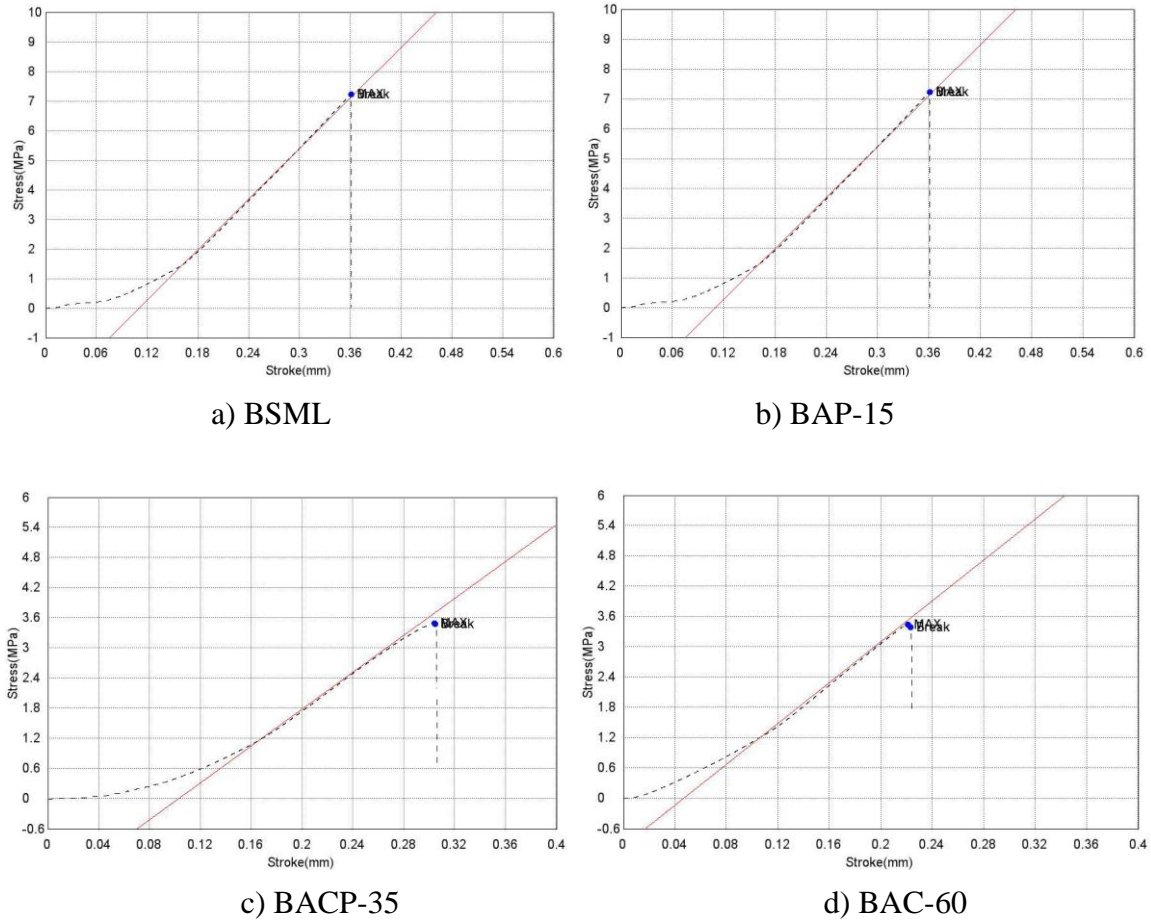


Fig. III. 14. Déplacement en fonction de la contrainte maximale des bétons étudiés

II. 2. 4. 4. EFFET DE LA PAILLE SUR L'OUVERTURE DE LA FISSURE

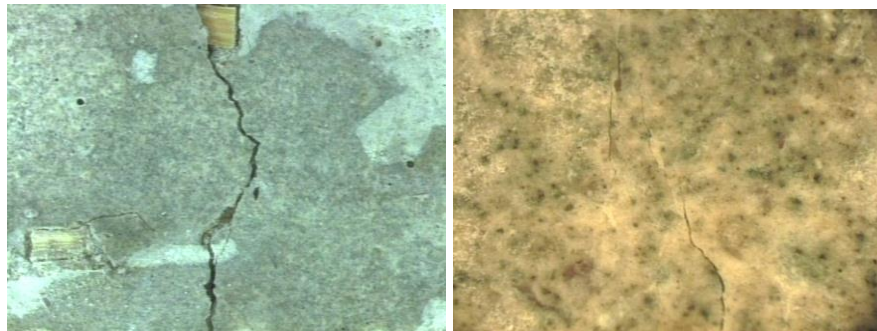
Puisque la paille d'orge a contribué favorablement à l'amélioration de la ductilité des bétons de sables (BAP-10, BAP-15 et BACP-35), une analyse de la fissuration a été faite par imagerie optique sur les éprouvettes (4x4x16 cm) qui ont été soumises aux essais de la mesure du module d'élasticité en flexion.

Les résultats montrent que la ductilité de la composition du (BACP-35) est légèrement meilleure que celle de la composition du (BAP-10), cela s'explique par :

- Dans la partie basse de l'éprouvette (BACP-35), la fissure est moins large et varie de 14 μm à 90 μm . Tandis que dans la partie basse de l'éprouvette (BAP-10), la fissure est plus large et varie de 50 μm à 140 μm (voir les Figs.15-21).
- La paille d'orge a renforcé le rôle de fibres des copeaux de bois.

1) BETON DE SABLE ALLEGE PAR LA PAILLE D'ORGE (BAP-10)

Les Figs.15-18 montre l'effet de la paille sur la ductilité, l'adhérence et l'orientation.



a) Partie basse (G=25)

b) Partie haute (G=100)

Fig. III. 15. Béton allégé par la paille d'orge

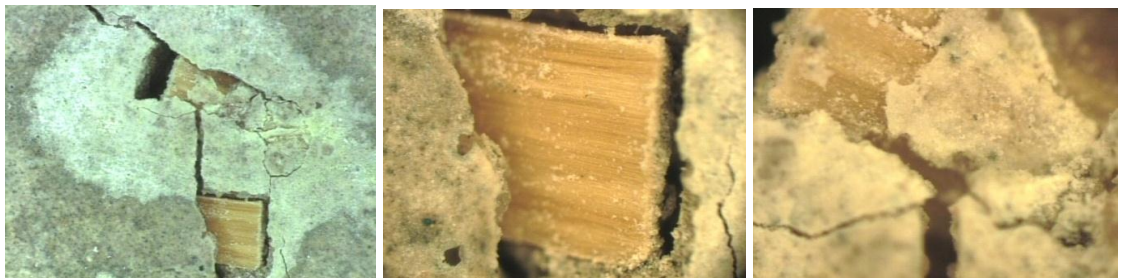


a) G=25

b) G=50

c) G=100

Fig. III. 16. Effet de la paille d'orge sur la ductilité (Partie basse)



a) G=50

b) G=150

c) G=250

Fig. III. 17. Adhérence de la paille d'orge / la matrice (Partie basse)



a) G=150

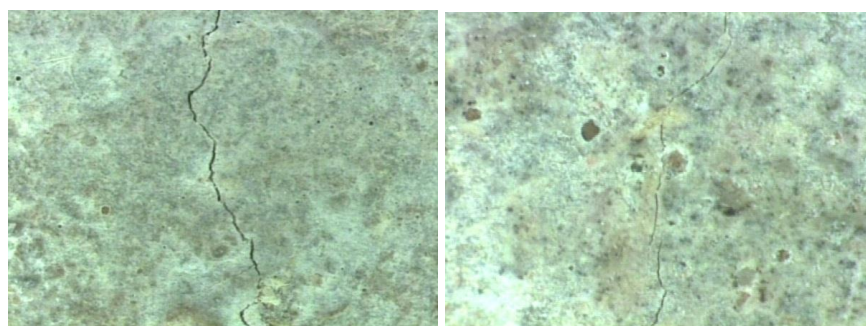
b) G=150

c) G=150

Fig. III. 18. Effet de l'orientation de paille d'orge / la force (Partie basse)

2) BETON DE SABLE ALLEGE PAR LES COPEAUX DE BOIS ET LA PAILLE D'ORGE

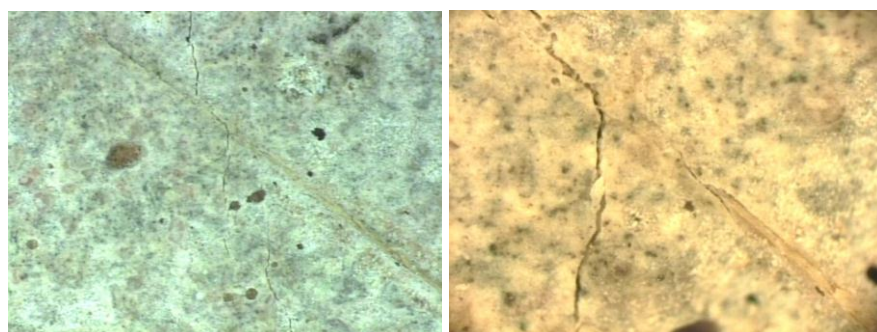
Les Figs.19-21 montre l'effet des copeaux de bois et de la paille d'orge sur la ductilité et la déviation de la fissure.



a) Partie basse (G=25)

b) Partie haute (G=100)

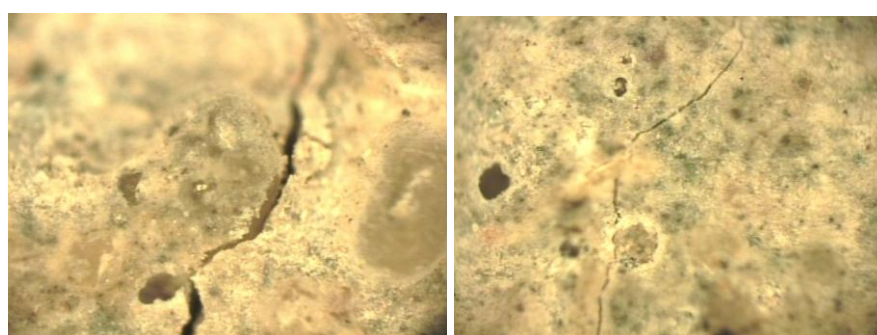
Fig. III. 19. Béton allégé par les copeaux de bois et la paille d'orge



a) G=50

b) G=150

Fig. III. 20. Effet des fibres des copeaux de bois et de la paille d'orge sur la ductilité



a) G=150

b) G=150

Fig. III. 21. Effet du grain de sable et de la fibre sur la déviation de la fissure

Il faut noter aussi que, la composition du béton dont la teneur est 15 kg/m^3 en paille d'orge (BAP-15) a montré un comportement différent de celui du (BAP-10) et (BACP-35). En effet, il a été constaté par imagerie optique l'existence de trois parties :

1) Partie basse : Elle représente presque le 1/4 de la hauteur de l'éprouvette. L'ouverture de la fissure varie de 60 à 120 μm (Fig. III. 22 (a,b)).

2) Partie médiane : Elle représente presque la moitié de la hauteur de l'éprouvette. L'ouverture de la fissure varie de 30 à 70 μm . La fissure se propage à travers deux directions, l'une à gauche et l'autre à droite. Cela est dû probablement à l'effet de la teneur en pailles d'orge ainsi que leur orientation (Fig. III. 22 (c,d,e)).

3) Partie haute : Elle représente presque le 1/4 de la hauteur de l'éprouvette. La disparition de la fissure est totale (Fig. III. 22 (f)).

D'une façon générale, les résultats montrent que la ductilité de la composition du (BAP-15) est légèrement meilleure que la ductilité de la composition du (BACP-35).

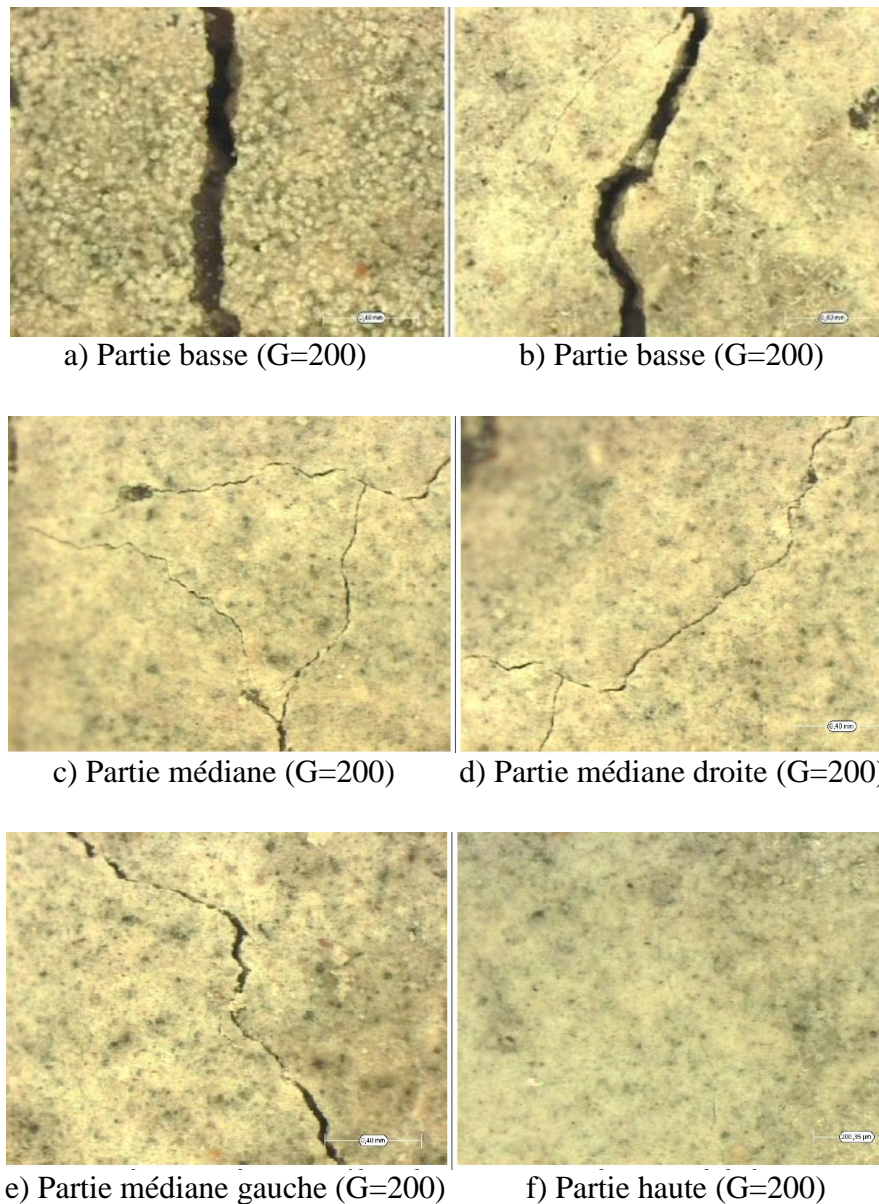


Fig. III. 22. Fissuration du béton (BAP-15)

III. ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE

Les silicates de calcium hydratés (C-S-H) sont les principales phases de liaison pour plusieurs types de bétons. Cependant, un grand manque est réel entre les connaissances sur les (C-S-H), par rapport à ce qui pourrait être atteint en utilisant des technologies de pointe [103]. Pour cela, une analyse de la microstructure a été réalisée en associant la spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF), la diffraction de rayons X (DRX) et la microscopie électronique à balayage (MEB).

III.1. ANALYSE PAR SPECTROMETRIE INFRAROUGE A TRANSFORMEE DE FOURIER

Cette technique est très intéressante et permet l'identification de groupes fonctionnels à partir de leurs propriétés vibrationnelles au sein d'un matériau solide. Le rayonnement infrarouge excite des modes de vibration (déformation, élongation) spécifiques de liaisons chimiques. Cette analyse a été réalisée par IRTF pour suivre, d'une part l'effet des ajouts minéraux et d'autre part l'effet des ajouts lignocellulosiques dans la fabrication des bétons.

1) EFFET DES AJOUTS MINERAUX

Les caractérisations des différentes espèces coexistant dans les produits hydratés après ajout des minéraux ont été réalisées par IRTF et le spectre obtenu est représenté sur la Fig. III. 23.

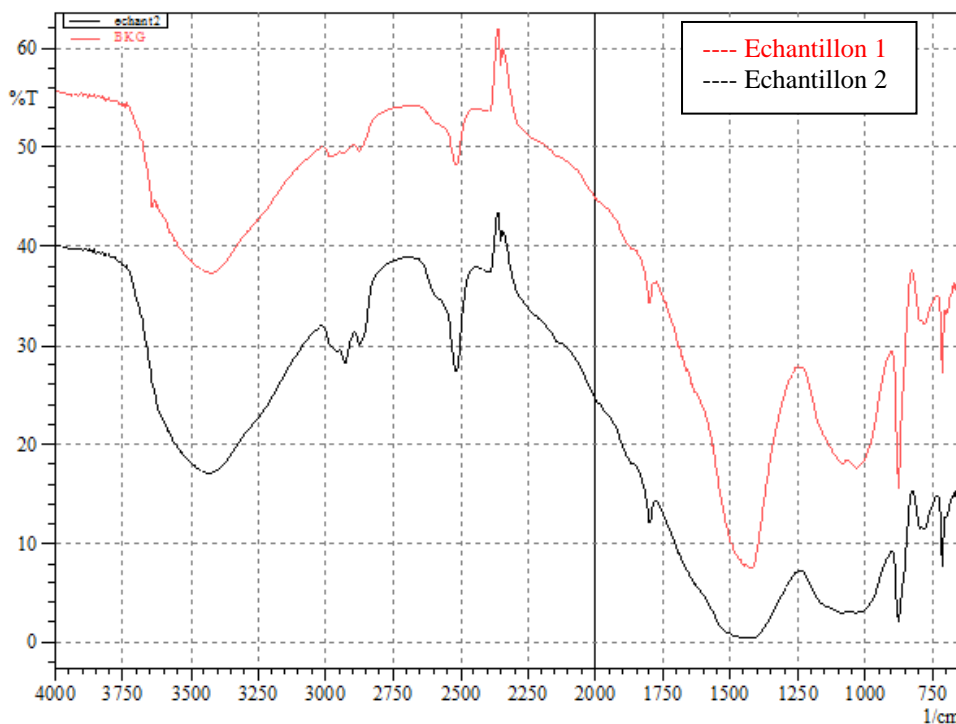


Fig. III. 23. Spectre du béton sans et avec ajouts minéraux

Nous remarquons sur le spectre de l'échantillon 2 (BSML (avec ajout minéraux)) que le pic à 3641 cm^{-1} caractéristique des vibrations d'élongation des liaisons O-H permettant l'identification de la portlandite dans l'échantillon 1 (BSML (sans ajout minéraux)) a disparu. Cette disparition montre que l'hydroxyde de calcium a réagi avec les composés siliceux et alumineux de la pouzzolane et ceux du ciment pour former des silicates et des aluminates de calcium hydratés. L'un des hydrates, le C-S-H (silicate de calcium hydraté), issu du composant prépondérant C_3S est responsable de la plus grande partie des propriétés mécaniques du matériau durci en raison de son pouvoir de liaison.

Un grand nombre de bandes des liaisons Si-O-Si ($918, 925, 935\text{ cm}^{-1}$) du C_3S anhydre sont absentes témoignant de la formation des silicates calciques hydratés. Cet hydrate est repéré, d'une part à 1005 cm^{-1} due au changement d'environnement de la liaison chimique Si-O (C_3S qui s'hydrate en C-S-H) et d'autre part par la vibration d'élongation des liaisons O-H des molécules d'eau constitutives de la phase hydratée C-S-H à 3450 cm^{-1} .

Nous avons observé également des bandes situées à $711, 873, 2513, 1797, 2875$ et 2983 cm^{-1} caractéristiques respectivement du groupe C-O de la calcite dans les deux échantillons (1 et 2). En effet dans l'échantillon 2 (BSML (avec ajout minéraux)), la diminution des intensités des bandes à 711 et 873 cm^{-1} , caractéristiques des calcites, laisse supposer que certaines calcites participent aux réactions d'hydratation en présence d'aluminates calciques pour former des carboaluminates de calcium hydratés. Aussi, entre 1006 et 1200 cm^{-1} , on a un mélange d'aluminates hydratés dont le C_4AH_13 à 1083 cm^{-1} et le C_3AH_6 à 1150 cm^{-1} . La phase C_3AH_6 est une phase beaucoup plus stable et s'obtient par l'évolution des phases intermédiaires telle que la phase C_4AH_13 suivant les conditions et le milieu d'hydratation du C_3A . La coexistence de ces phases très stables avec les autres phases silicatées, contribue à l'amélioration des propriétés mécaniques de l'échantillon 2 (BSML (avec ajout minéraux)).

2) EFFET DES AJOUTS LIGNOCELLULOSIQUES

Les ajouts de bois et de paille à la matrice précédemment étudiée, ont permis d'obtenir les spectres suivants :

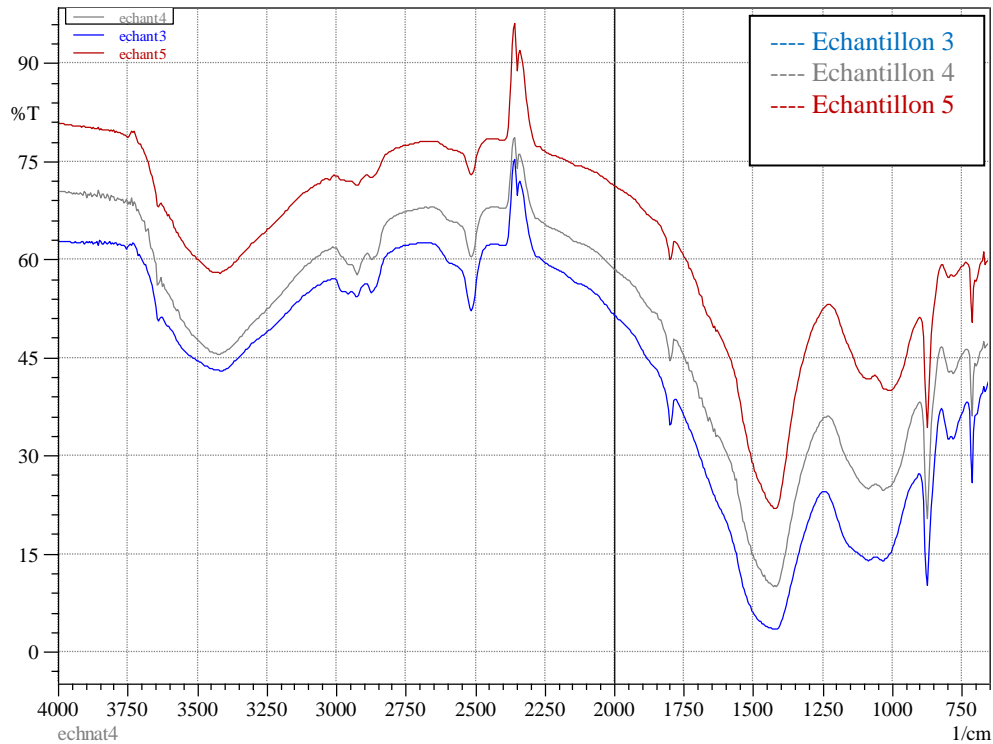


Figure III. 24. Spectre des bétons allégés par des matériaux lignocellulosiques

Ces trois spectres présentent les mêmes allures à quelques différences près. Dans les trois échantillons, nous observons le pic à 3640 cm^{-1} , caractéristique des vibrations des liaisons O-H de la portlandite. Ce petit pic caractérisant la présence de la portlandite n'évolue pas d'intensité en présence de paille ou de bois. Cela voudrait signifier qu'aucune formation de portlandite n'est observée en présence de la paille ou du bois ou de paille et du bois. Ceci indique que la formation des hydrates en l'occurrence la portlandite issue des phases silicatées est fortement affectée par la présence du bois ou de la paille. Il est donc possible que le bois ou la paille libère des molécules en concentration importante, entraînant le ralentissement de la croissance libre de cet hydrate. Il semble alors qu'il y ait réaction entre les ions hydroxydes et les composants du bois ou de la paille entraînant la diminution de la concentration en ions hydroxydes de la suspension du ciment.

Lorsqu'on se réfère au pic à 2513 cm^{-1} , on observe une différence d'intensité entre le spectre de l'échantillon 3 (BAP-10) et les deux autres. Ce pic à 2513 cm^{-1} correspond à la vibration d'élongation des liaisons C-O caractéristiques des carbonates de calcium. Cette légère augmentation d'intensité de ce pic, montre que la présence de la paille dans l'échantillon 3 (BAP-10) favorise la carbonatation au profit d'autres phénomènes. Contrairement à l'échantillon 3, les échantillons 4 (BACP-35) et 5 (BAC-60) contenant

du bois présentent une augmentation de la polymérisation des ions SiO_4^{4-} favorisant ainsi la formation de silicates calciques hydratés (C-S-H). Ces hydrates sont observés par un déplacement du nombre d'ondes de chaque pic vers des valeurs plus élevées (3433, 3423 cm^{-1} , respectivement échantillon 5 et échantillon 4). Dans l'échantillon 3, cette vibration d'élongation de la liaison O-H, s'observe à 3415 cm^{-1} . Ce décalage de bande serait probablement lié au degré de polymérisation des ions silicates SiO_4^{4-} . Il semble donc montrer que la présence de la paille dans l'échantillon 3, limite la polymérisation des SiO_4^{4-} et augmente l'indice de polydispersité (élargissement de la bande).

Les hydrates formés dans l'échantillon 4 (BACP-35) sont beaucoup plus stables et favorisent l'amélioration des propriétés mécaniques du composite. Ces résultats sont conformes aux résultats obtenus par absorbance pour les mêmes types de bétons [2].

III. 2. ANALYSE PAR DIFFRACTION DE RAYONS X

Les analyses par diffraction de rayons X (DRX) ont été effectuées sur des échantillons broyés et tamisés à 80 μm des bétons étudiés dont les résultats sont comme suit :

1) EFFET DES AJOUTS MINÉRAUX

D'après le diffractogramme (Fig. III. 25) et (Fig. III. 26) qui montrent la comparaison entre le béton de sable sans ajouts minéraux et avec ajouts minéraux, il a été constaté que les ajouts minéraux contribuent favorablement au développement des silicates de calcium hydratés (C-S-H) et par conséquent à l'amélioration des propriétés mécaniques du matériau. Ceci s'explique par :

- 1- L'augmentation de l'intensité du pic de la silice (SiO_2) d'environ 1000 à 3000, ceci pourra s'expliquer par la présence de la pouzzolane naturelle qui est riche en silice.
- 2- La diminution de l'intensité du pic de carbonate de calcium (CaCO_3) d'environ de 1480 à 800.
- 3- La diminution de l'intensité du pic de la portlandite (Ca(OH)_2), ceci pourra s'expliquer par la présence de la chaux hydraulique.

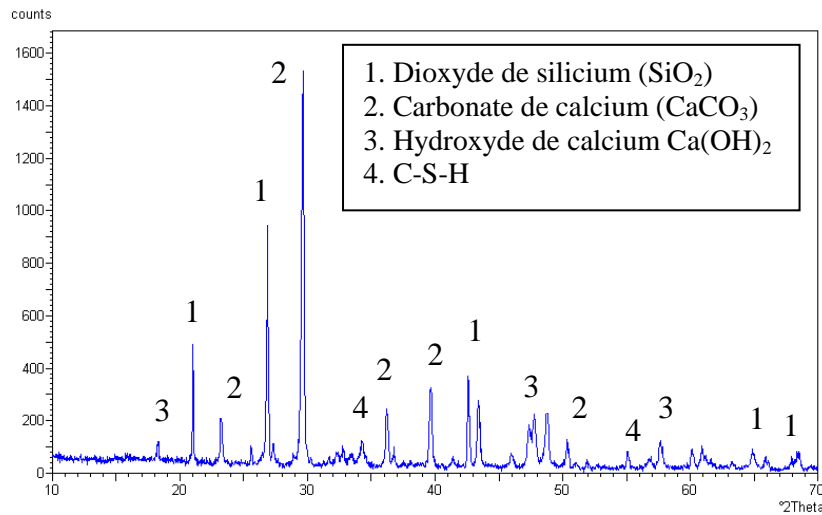


Fig. III. 25. Diffractogramme du béton de sable sans ajouts minéraux

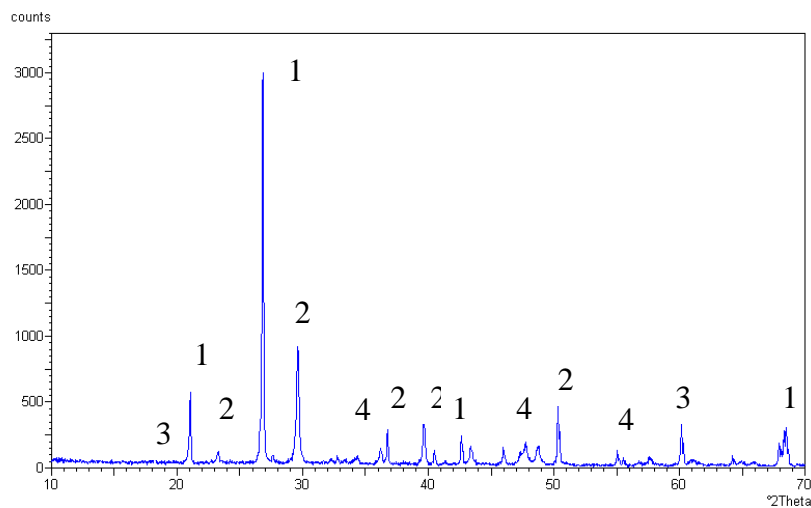


Fig. III. 26. Diffractogramme du béton de sable avec ajouts minéraux

3) EFFET DES AJOUTS LIGNOCELLULOSIQUES

Le diffractogramme (Fig. III. 27) montre l'effet de la paille d'orge et des copeaux de bois, séparés et en combinaison pour des bétons de sables légers ayant presque la même maniabilité, à savoir, le béton (BAP-10), le (BACP-35) et le (BAC-60). Il a été constaté que les bétons allégés par des matériaux lignocellulosiques ont presque le même comportement.

Le diffractogramme Fig. III. 27 (a) montre l'effet de l'ajout de la paille d'orge pour la composition (BAP-10). En le comparant par rapport à la composition de base, avec ajouts minéraux (BSML). Il a été constaté les observations suivantes :

- L'augmentation de l'intensité de la calcite (CaCO_3) pour un pic dominant de 900 à 1400 tandis que pour les autres pics, on a un équilibre entre l'augmentation et la réduction.

- La réduction de l'intensité du pic de la silice (SiO_2) de 3000 à 2400.
- La portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reste presque identique.
- L'intensité des pics des silicates de calcium hydratés (C-S-H) reste aussi presque identique.

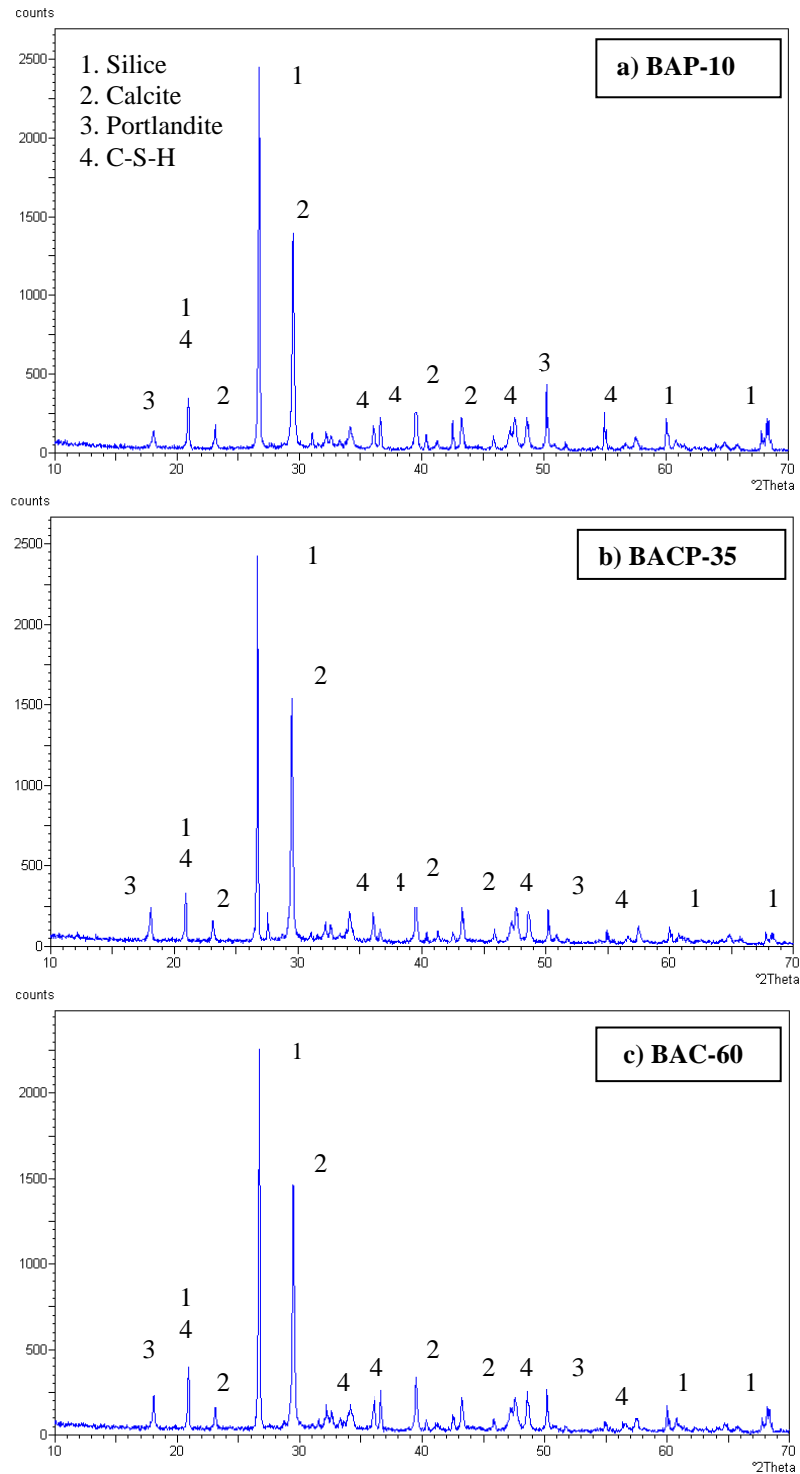


Fig. III. 27. Diffractogramme des bétons de sables allégés par des matériaux lignocellulosiques

III. 3. ANALYSE PAR MICROSCOPIE OPTIQUE ET ELECTRONIQUE A BALAYAGE

Cette analyse par microscopie électronique à balayage a été faite sur trois échantillons des bétons étudiés à savoir le (BAP-10), le (BACP-35) et le (BAC-60).

III. 3. 1. POROSITE

Chacun des échantillons présente une porosité importante : de nombreuses cavités sphériques de taille différente sont observées dans chacun d’entre eux comme le montrent les images (a, b, c) de la Fig. III. 28. Cette constatation peut être probablement liée à l’adjuvant utilisé qui est un superplastifiant–haut réducteur d’eau de type MEDAPLAST-SP 40, qui n’est pas un entraîneur d’air. Dans cette porosité, une espèce se développe surtout lorsque la paille est présente dans la composition de l’échantillon. Cette espèce se développe aussi avec le bois mais en quantité moindre.

Puisque, les conditions d’élaboration des trois matériaux sont identiques, il semblerait que le développement de cette espèce soit lié à la présence de la paille dans le composite, comme le montrent les images (d, e, f) de la Fig. III. 28.

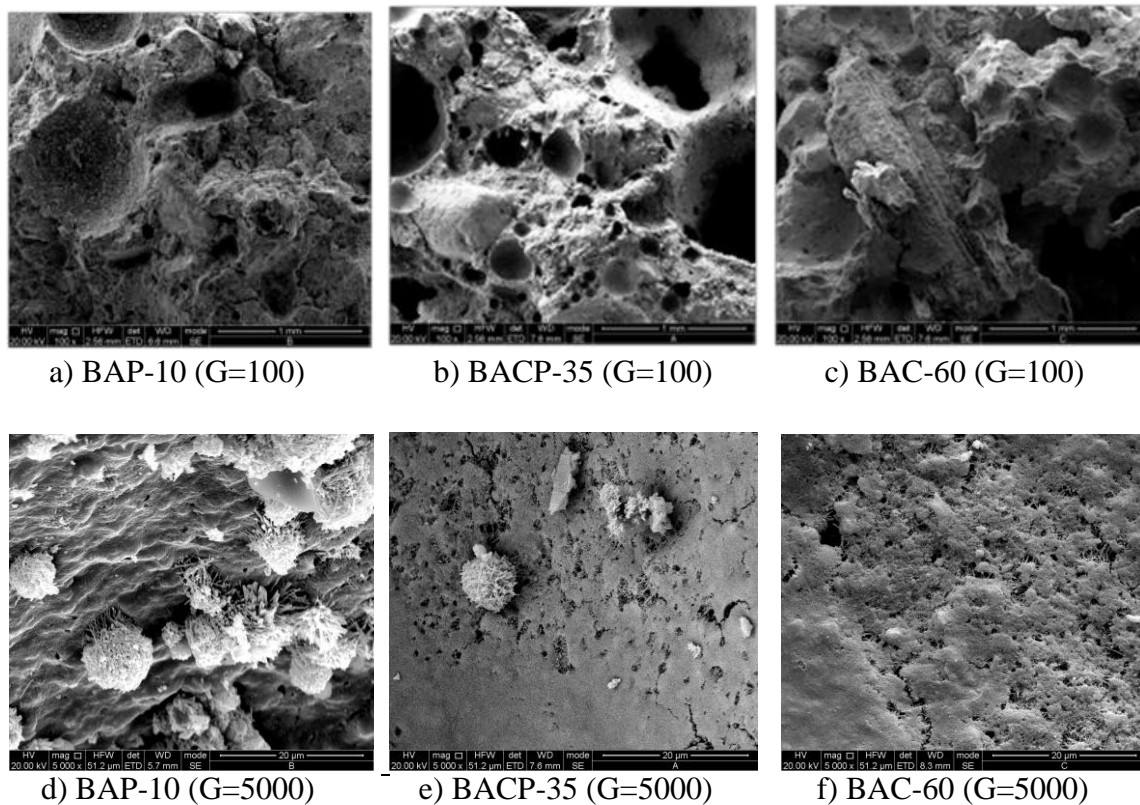


Fig. III. 28. Porosité des bétons étudiés

III. 3. 2. ADHERENCE MATRICE/MATERIAUX LIGNOCELLULOSIQUES

La présence de bois ou de paille, ou des deux à la fois, dans la composition du composite cimentaire n'altère pas la bonne adhérence matrice/granat de sable. Ce qui permet d'affirmer que si les résistances mécaniques évoluent, cette adhérence n'en est pas la cause. La croissance des espèces semble même être de nature épitaxique, car on observe surtout la formation de silicates de calcium hydratés (C-S-H) au voisinage de ces granules principalement constitués de silice. Voir les images (a,b,c) de la Fig. III. 29. L'adhérence matrice/granulats lignocellulosiques est également de bonne qualité dans le cas du bois. Voir les images (d, e) de la Fig. III. 29.

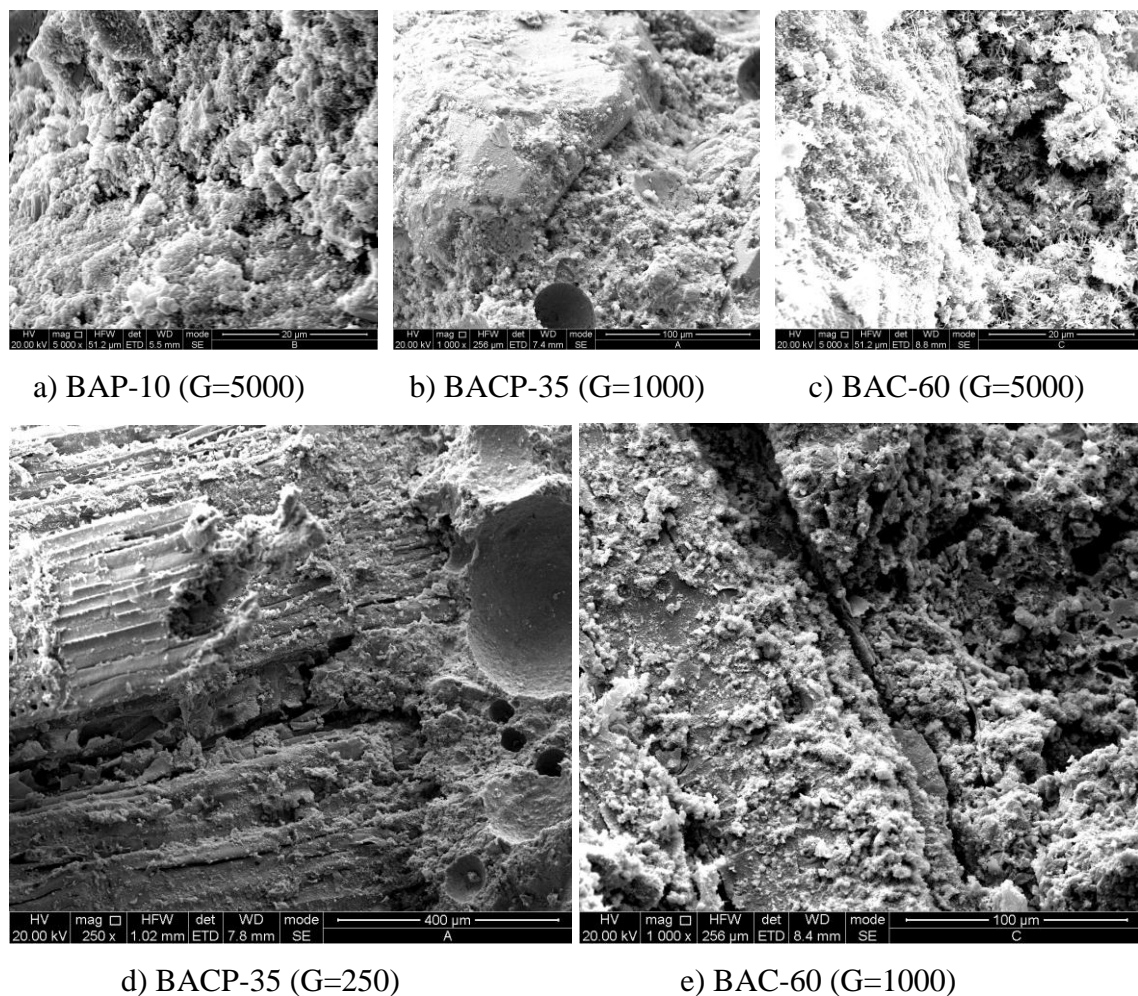


Fig. III. 29. Adhérence matrice/granulats par MEB

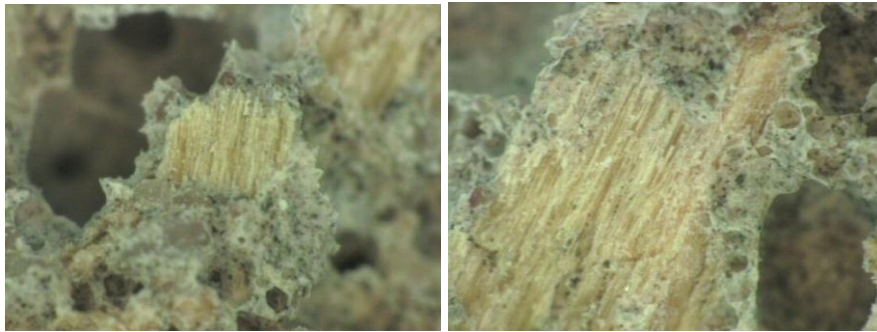
Par contre, il a été impossible d'observer l'adhérence matrice/paille car dans les échantillons fournis, on remarque que la paille a dû se décoller de la matrice lorsque l'échantillon a été préparé pour l'observation. Ceci est certainement dû à la nature

différente des espèces qui se développent au voisinage des granulats lignocellulosiques (voir paragraphe ci-dessous).

Néanmoins, à l'échelle d'agrandissement par imagerie optique et loupe binoculaire des bétons étudiés, il a été constaté ce qui suit :

1) ADHERENCE COPEAUX DE BOIS/MATRICE

Il a été constaté l'existence d'une bonne adhérence entre les copeaux de bois et la matrice cimentaire ainsi que la porosité élevée dans la matrice cimentaire, comme le montrent les images (a,b) de la (Fig. III. 30). La structure fibreuse des copeaux de bois apparaît comme une structure irrégulière et rugueuse à l'échelle de l'agrandissement, ce qui facilite l'adhérence entre les copeaux de bois et la matrice cimentaire



a) BAC-60 (G=100)

b) BAC-60 (G=100)

Fig. III. 30. Adhérence matrice/copeaux de bois

2) ADHERENCE PAILLE DE L'ORGE/MATRICE

Il a été constaté l'existence d'une bonne adhérence entre la fibre de paille et la matrice cimentaire (Fig. III. 31 (a)). Néanmoins, il a été constaté une adhérence acceptable entre la paille tubulaire et la matrice cimentaire, car la zone de transition nous semble quand même large (Fig. III. 31 (b,c)). Cela s'explique probablement par le rétrécissement de la paille tubulaire au niveau de la surface de rupture pendant la résistance à la force de la flexion. De plus, il faut noter aussi que la paille d'orge reste bien attachée au prisme.

La cavité interne de la paille reste vide, probablement pour les diamètres inférieurs comme le montre l'image (b) de la (Fig. III. 31), ce qui ne peut qu'améliorer les performances thermiques. D'autre part, les images (c,d) de la figure III. 31 montre que la cavité interne de la paille est pleine, probablement pour les diamètres supérieurs, mais à une profondeur superficielle.

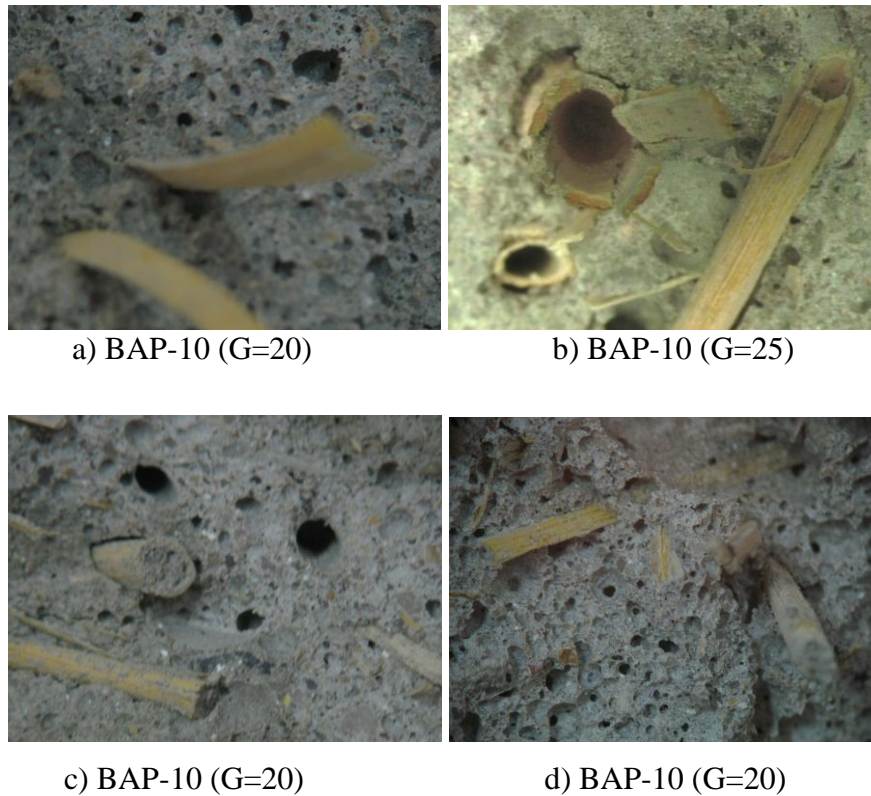


Fig. III. 31. Adhérence matrice/paille d'orge

III. 3. 3. DEVELOPPEMENT DES ESPECES

Il est difficile d'observer les espèces développées au sein de la matrice car les nombreux pores et les nombreux granulats présents dans le matériau laissent très peu de place à la matrice. Toutefois, on remarque que la présence de granulats de nature lignocellulosiques ne modifie pas le développement des espèces au sein de la matrice. On observe toujours dans cette dernière de nombreux C-S-H qui se sont développés, ainsi que la présence de plaquettes de $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Ce point est également important pour l'analyse des propriétés physicochimiques des composites élaborés. Voir Fig. III. 32. (a,b).

Par contre, les espèces qui se développent au voisinage des granulats lignocellulosiques dépendent de la nature du granulat. Dans le cas des granulats de bois des C-S-H se développent au voisinage du végétal. Par contre dans le cas de la paille l'espèce présente au voisinage du végétal est essentiellement de nature calcique, il n'y a pas de silicium dans sa composition. Ceci peut être dû à la dissolution des composés hydrosolubles du végétal facilitée par la basicité du milieu cimentaire qui conduit à la formation de sels calciques. Cette réaction entre en compétition avec la réaction d'hydratation de la matrice cimentaire

c'est pour cela que la formation des C-S-H n'est pas observée Fig. III. 32. (c,d). Ce phénomène a été observé dans de précédents travaux [104-106].

REMARQUES :

- 1- La formation de cette espèce au voisinage du végétal peut avoir plusieurs répercussions pour le matériau : temps de prise: décalé ; développement des résistances mécaniques: retardé et matériau fragilisé.
- 2- Comme la formation de sels calciques n'est observée que dans le cas de la paille. On peut imaginer que la dissolution des composés hydrosolubles ne se produit pas dans le cas des granulats de bois. Cette hypothèse est différente de ce qui est généralement admis dans le cas d'un végétal présent dans un milieu basique, cf travaux antérieurs cités.
- 3- Pour déterminer la nature exacte des sels calciques qui se forment au voisinage de la paille, il serait intéressant de prélever ces sels (par simple grattage de la surface de la paille) et d'effectuer une analyse par diffraction X de ces sels. Leur forme de prisme laisse penser que cette espèce est du carbonate de calcium comme cela a été observé par O. Yazoghli dans son étude concernant la valorisation de PET issu d'emballages de post consommation [107].

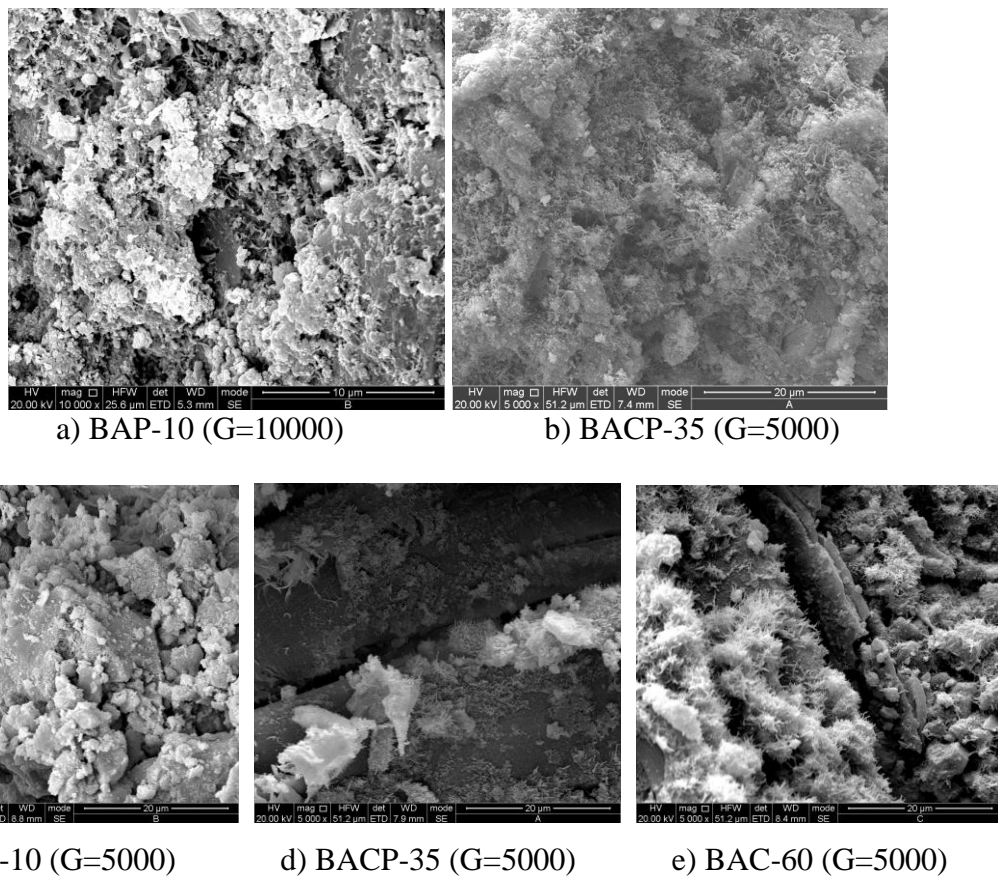


Fig. III. 32. Développement des espèces

Certains travaux ont également montré la possibilité que cette espèce de nature calcique migre dans les espaces vides du minéral [106,108-110].

L'observation des trois composites montre que ce n'est pas le cas des images (a,b,c) de la Fig. III. 33. Par contre, cette espèce est présente dans le vide qui existe au sein de la paille voir Fig. III. 34. (a,b).

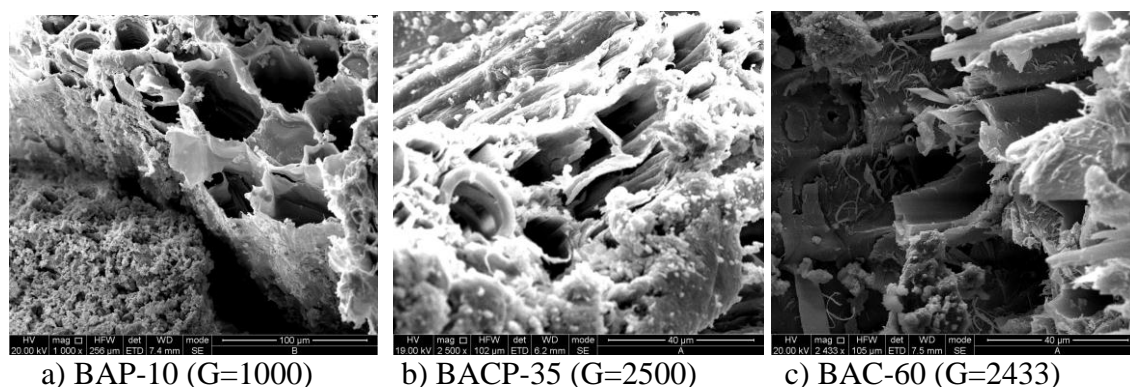


Fig. III. 33. Espèces de nature calcique

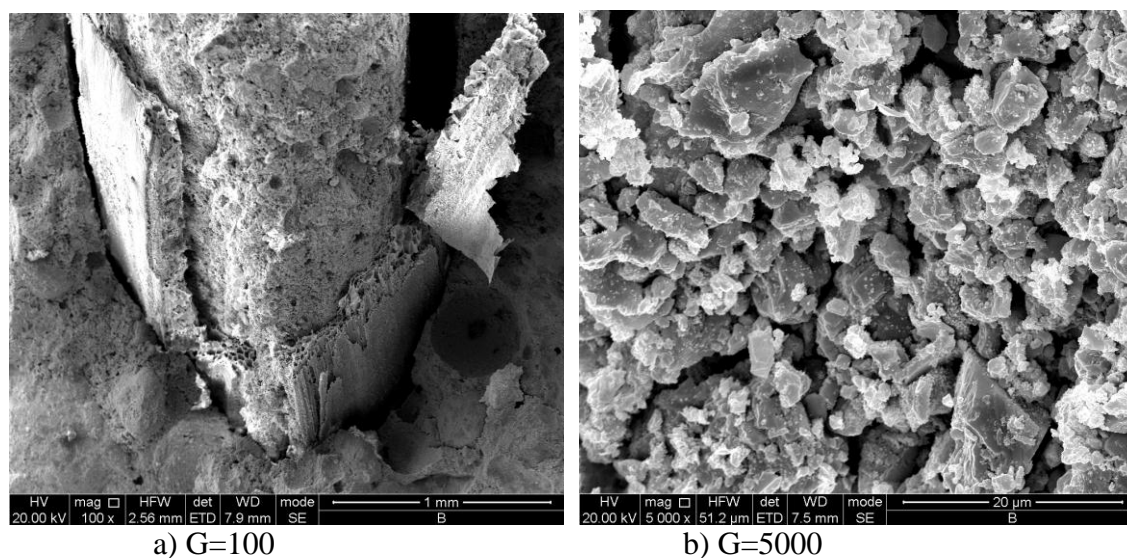


Fig. III. 34. Espèces dans le vide de la paille

L'hypothèse est qu'étant donnée la morphologie de la paille (cf photos ci-après de paille en transversal), le matériau cimentaire s'introduit au sein de ce vide Fig. III. 34. (a) qui existe dans la paille, mais que les C-S-H ne se développent pas étant donnée la dissolution des composés hydrosolubles qui favorise plutôt la formation d'espèces essentiellement de nature calcique.

REMARQUE : lors de l'observation de la paille en transversal nous avons remarqué qu'au niveau de la partie la plus dure de la paille, une structure alvéolée est présente Fig. III. 35. (b et c). On peut supposer que ce soit cette structure qui confère une meilleure rigidité à cette partie de la paille.

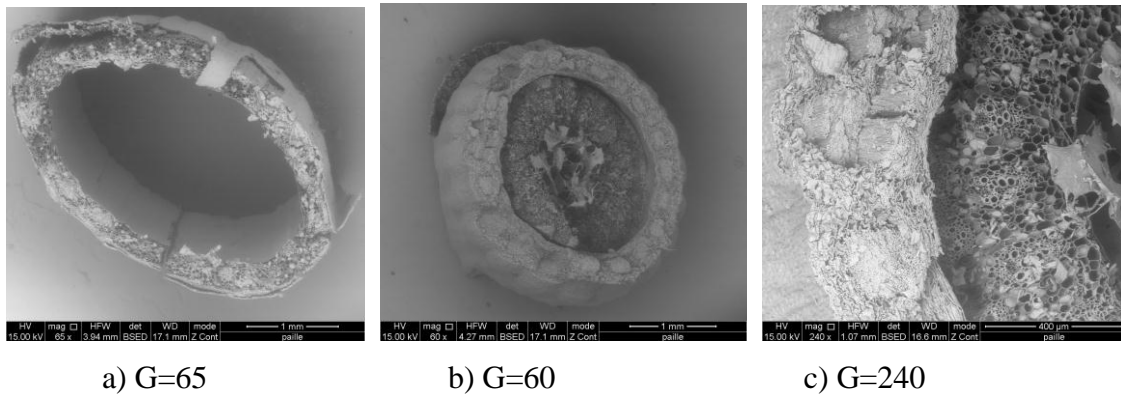


Fig. III. 35. Structure alvéolée de la paille d'orge

IV. SYNTHÈSE DES RESULTATS

IV. 1. APPORT DES AJOUTS MINÉRAUX

Dans cette étude, les ajouts minéraux ont contribué favorablement à la formulation des éco-bétons de sables. L'avantage est au profit des compositions à ciments quaternaires, surtout les compositions avec 10 et 15% d'ajout D (1/3 calcaire, 1/3 pouzzolane naturelle et 1/3 chaux hydraulique). Par ailleurs, ces économies de ciment contribuent avantageusement à la réduction des émissions de CO₂ et par conséquent à lutter contre le réchauffement de la terre et les changements climatiques.

L'utilisation des ajouts minéraux a un effet avantageux sur le développement des réactions chimiques du béton de sable alluvionnaire-dunaire comme le confirme l'interprétation croisée des résultats relatifs à l'analyse par spectrométrie infrarouge à transformée de fourrier (IRTF) et l'analyse par diffraction de rayons X (DRX). Ces deux techniques ont montré la formation des C-S-H, de plus la coexistence de ces phases très stables avec les autres phases silicatées, contribue à l'amélioration des propriétés mécaniques du béton de sable avec ajout minéraux contrairement à au béton de sable sans ajouts minéraux.

D'après la bibliographie, il existe toujours une relation entre les résistances à la compression et à la flexion [21]. Pour cette étude, il a été constaté l'existence d'une relation entre la masse volumique et le rapport (R_f/R_c) à 28 jours, suivant une équation polynomiale comme le montre la Fig. III. 36.

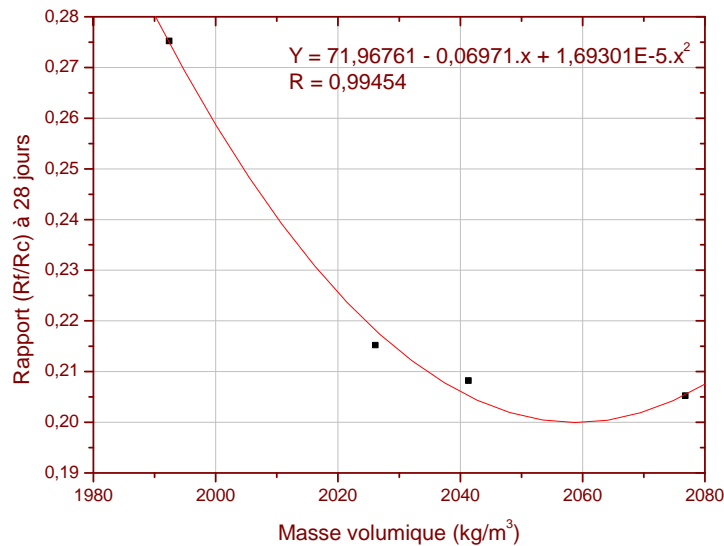


Fig. III. 36. Relation entre la masse volumique et le rapport (R_f/R_c) à 28 jours

IV. 2. CONTRIBUTION FAVORABLE DE LA PAILLE D'ORGE

L'hypothèse de la substitution partielle des copeaux de bois par la paille de l'orge a contribué favorablement à la réduction du retrait pour une valeur inférieure à la valeur cible de 1 mm/m sans trop affecter les propriétés thermo-physiques. L'objectif visé est donc atteint. Les meilleures compositions des bétons sont (BAP-15) et (BACP-35). Néanmoins, l'avantage est au profit de la composition (BACP-35) qui constitue les meilleurs compromis entre les propriétés étudiées à savoir : la masse volumique, la conductivité thermique, la chaleur spécifique, la diffusivité thermique, les propriétés mécaniques et le retrait.

Pour la résistance à la flexion et la résistance à la compression, la paille d'orge a amélioré la capacité de déformation du béton de sable, à savoir la ductilité et la ténacité. Lors de la vibration du béton, la paille d'orge s'allonge le long de l'éprouvette, cet avantage explique que l'utilisation de la paille ne pose pas un problème d'orientation.

Les bétons avec des ajouts lignocellulosiques, séparés et en combinaison, à maniabilité égale ont presque le même comportement d'après les résultats de l'analyse par diffraction de rayons X (DRX), mais l'avantage est au profit du béton (BACP-35) où les hydrates formés (C-S-H) sont beaucoup plus stables avec les autres phases silicatées et favorisent l'amélioration des propriétés mécaniques du composite, comme le confirme les résultats de l'analyse par spectrométrie infrarouge à transformée de fourrier (IRTF).

L'interprétation des résultats obtenus a montré l'existence de fortes relations entre les propriétés thermo-physiques et mécaniques des bétons étudiés et cela comme le montrent les différentes régressions dont le coefficient de corrélation se rapproche de 1.

Puisque les matériaux lignocellulosiques utilisés n'ont subi aucun traitement, les résultats de la microstructure sont très intéressants, surtout du point de vue de l'adhérence entre la matrice cimentaire et les matériaux lignocellulosiques, ainsi que la porosité qui existe dans la matrice cimentaire, ce qui contribue favorablement à l'amélioration des propriétés mécaniques et thermo-physiques des bétons étudiés.

IV. 3. POTENTIEL D'UTILISATION DES BETONS DE SABLES LEGERS

Les résultats obtenus donnent plusieurs possibilités d'utilisation de ces éco-bétons de sable légers dans le domaine de la construction. On peut citer à titre d'exemple :

- 1- L'éco-béton de sable allégé par 15 kg/m³ de pailles d'orge (BAP-15) est un béton léger de structure. Ce béton constitue les meilleurs compromis entre les propriétés étudiées.
- 2- L'éco-béton de sable allégé par 30 kg/m³ de copeaux de bois et 5 kg/m³ de pailles d'orge (BACP-35) est un béton isolant-porteur utilisable en maçonnerie des murs extérieurs ou en chape de toitures en milieux arides.
- 3- L'éco-béton de sable allégé par 60 kg/m³ de copeaux de bois (BAC-60) est un béton d'isolation destiné à l'isolation des murs ou des toitures mais le seul inconvénient est le retrait important qui nécessite le respect d'une période de cure avant utilisation. Ce qui rend leur utilisation n'est possible qu'après 28 jours. Ce qui nécessite peut être une étude complémentaire relative à la variation du matériau durci avec les variations climatiques.

V. CONCLUSION

Le composite étudié est un béton de sable alluvionnaire-dunaire qui a donné un bon micro-béton dans lequel le sable alluvionnaire représente le gravier et le sable de dune représente le sable. L'utilisation des ajouts minéraux augmente ce caractère d'éco-conception. De plus, ce type de béton peut être considéré comme un matériau de structure et d'expression architecturale.

L'approche d'allègement des éco-bétons de sables par des matériaux lignocellulosiques est une approche environnementale et durable, car elle contribue au respect des trois piliers du développement durable à savoir l'environnement, l'économie et le social. De plus, cette étude a montré l'effet avantageux des matériaux lignocellulosiques pour l'allègement des éco-bétons de sables sur les propriétés physico-mécaniques et le retrait.

Il convient de noter enfin, que cette approche sera finalisée par une simulation numérique des bétons étudiés qui s'avère nécessaire afin d'apprécier le comportement thermo-physiques des bétons étudiés pour la construction des murs extérieurs en milieux arides.

QUATRIEME CHAPITRE

Simulation numérique du comportement
thermo-physique des bétons étudiés

CHAPITRE IV :
SIMULATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT
THERMO-PHYSIQUE DES BETONS ETUDIES

INTRODUCTION

Dans le but d'améliorer le niveau du confort thermique des habitations en milieux arides, une étude de simulation numérique à l'aide du logiciel EnergyPlus a été menée afin d'apprécier le comportement thermo-physique des bétons étudiés pour la construction d'un mur extérieur en milieux arides. Les paramètres pris en compte sont l'épaisseur du mur, sans et avec un vide d'air et les revêtements des murs, ainsi que les propriétés thermo-physiques des bétons étudiés.

La simulation numérique a été faite pour quatre types de bétons, à savoir, le béton de sable sans matériaux lignocellulosiques (BSML), un béton allégé par les copeaux de bois (BAC-60) dont la teneur est de 60 kg/m³, un béton de sable allégé par la paille d'orge (BAP-15) dont la teneur est de 15 kg/m³, et enfin un béton de sable allégé par des copeaux de bois et de la paille d'orge (BACP-35) avec une teneur de 30 kg/m³ en copeaux de bois et de 5 kg/m³ en paille d'orge.

I. SIMULATION NUMERIQUE

Le confort thermique dans les constructions est lié directement au transfert de chaleur à travers l'enveloppe bâtie, entre l'environnement extérieur et l'environnement intérieur. Pour un meilleur confort thermique il faut que le flux transmis par le mur soit minimisé par les propriétés thermo-physiques des matériaux de construction. Il est donc souhaitable d'avoir une conductivité thermique (k) la plus faible possible, une capacité thermique (cp) la plus élevée possible et une diffusivité thermique (a), fonction de (k) et (cp), la plus faible possible.

I. 1. STRATEGIE BIOCLIMATIQUE (CAS DE LA VILLE DE LAGHOUAT)

La ville de Laghouat est considérée comme la porte d'accès au sud de l'Algérie, ce dernier occupe presque les trois quarts de la superficie du pays et se caractérise par un climat aride, c'est à dire très chaud et sec en été et très froid en hiver. La Fig. IV. 1. montre à titre

d'exemple les moyennes des variations de températures mensuelles, maximales moyennes et minimales de l'année 2012.

Les exemples de l'architecture traditionnelle montrent qu'il faut essayer de bénéficier du temps de retard de l'enveloppe du bâtiment grâce à des matériaux ayant une grande inertie thermique [76,111]. Le calcul du temps de retard et le facteur d'amortissement fournissent un indice indirect des conditions de confort thermique à l'intérieur, tout en offrant la possibilité de concevoir des stratégies sur la réduction de la charge d'énergie demandée et par conséquent de réduire la consommation énergétique des bâtiments [85].

Dans cette région l'amplitude thermique journalière, écart de température entre le jour et la nuit, est importante. Il est nécessaire de recourir à une des stratégies des climats chauds et secs comme d'utiliser le principe de l'inertie thermique et l'orientation des murs qui sont parmi les principes de base de l'architecture bioclimatique ou l'éco-architecture.

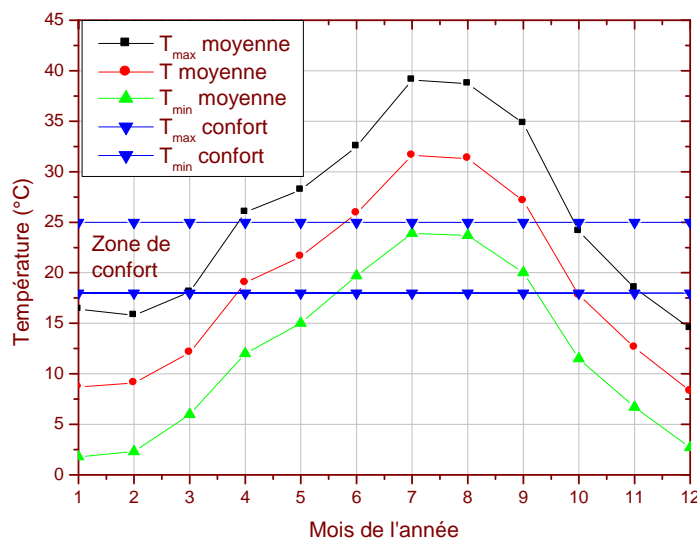


Fig. IV. 1. Température moyennes mensuelles de l'année 2012

D'après la carte des zones climatiques en Algérie (Fig. IV. 2), la ville de Laghouat se situe en zone climatique (D), latitude 33,80°N, longitude 2,87°E, pour laquelle il est recommandé que les murs extérieurs aient une forte inertie thermique avec un temps de retard (Φ) \geq 8:00 heures [112].

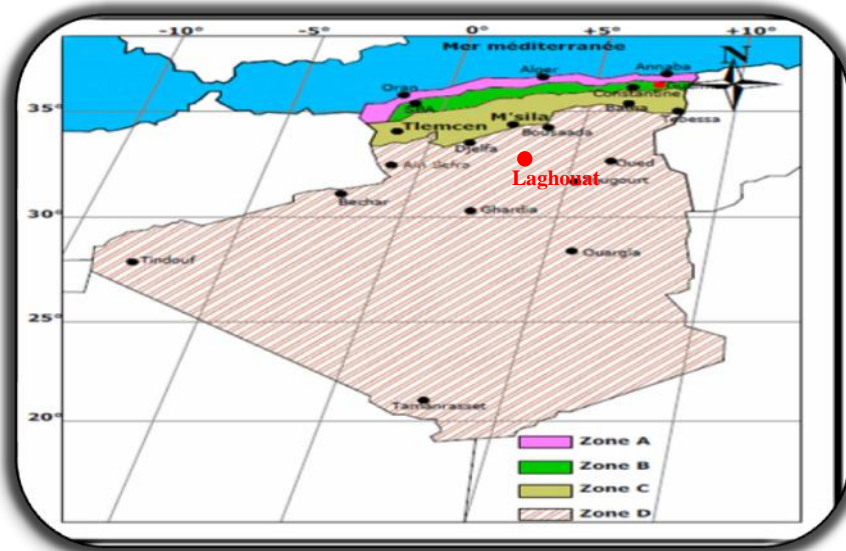


Fig. IV. 2. Carte nationale des zones climatiques [112]

I. 2. EQUATION DE LA CHALEUR

Dans cette étude, le flux de chaleur qui traverse le mur est considéré dans une seule direction de (x) et dépend du temps (t). La géométrie du problème est montrée dans la Fig. (IV. 3). Pour ce problème, l'équation du transfert de chaleur par conduction s'écrit comme suit en fonction de (T, t, x) :

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (\text{IV.1})$$

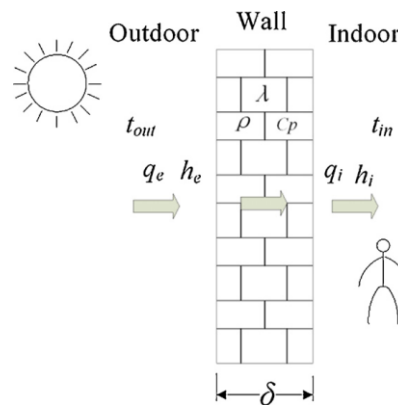


Fig. IV. 3. Schéma du transfert de chaleur dans un mur extérieur [113]

avec (k) la conductivité thermique, (ρ) la masse volumique et (c_p) la chaleur spécifique du matériau qui constitue le mur. Pour résoudre ce problème, deux conditions aux limites et une condition initiale sont exigées. Elles peuvent être écrites comme suit [81,82]:

$$k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=0} = h_i [T_{x=0}(t) - T_i], \quad k \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_{x=L} = h_o [T_{sa}(t) - T_{x=L}(t)]. \quad (IV. 2)$$

où, h_i est le coefficient de transfert de chaleur par convection de la surface intérieure du mur, h_o est le coefficient de transfert de chaleur par convection de la surface extérieure du mur, $T_{x=0}$ est la température de la surface intérieure du mur, $T_{x=L}$ est la température de la surface extérieure du mur, T_i est la température de la chambre et $T_{sa}(t)$ est la température sol-air (température extérieure combinée périodiquement avec les radiations solaires).

I. 3. TEMPS DE RETARD, FACTEUR D'AMORTISSEMENT ET TEMPERATURE SOL-AIR

Le temps de retard (Φ) et le facteur d'amortissement (f) sont deux facteurs très importants du mur, qui déterminent la capacité de stockage thermique pour les matériaux. Ils sont schématisés sur la Fig. IV. 4. Le temps que prend le flux de chaleur pour se propager, de la surface extérieure à la surface intérieure, est nommé « temps de retard » ou « déphasage ». Il est calculé par l'équation suivante [81,82] :

$$\Phi \begin{cases} t_{T_o \max} > t_{T_e \max} \rightarrow t_{T_o \max} - t_{T_e \max} \\ t_{T_o \max} < t_{T_e \max} \rightarrow t_{T_o \max} - t_{T_e \max} + P \\ t_{T_o \max} = t_{T_e \max} \rightarrow P \end{cases} \quad (IV. 3)$$

avec (Φ) : Temps de retard en heures.

et $t_{T_e \max}$: Temps auquel la température de surface extérieure du mur est maximale.

$t_{T_o \max}$: Temps auquel la température de surface intérieure du mur est maximale.

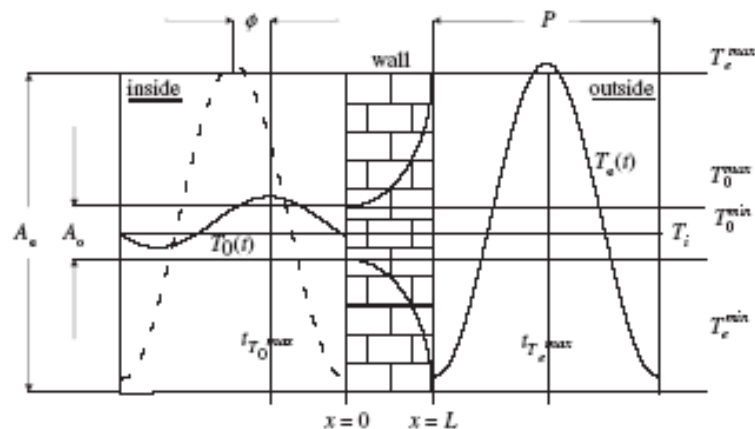


Fig. IV. 4. Représentation schématique du temps de retard (Φ) et du facteur d'amortissement (f) [82]

Lors de la propagation du flux de chaleur de la surface extérieure du mur vers la surface intérieure du mur pendant une période P (24 heures), son amplitude diminuera selon les propriétés thermo-physiques des matériaux. C'est à dire que, quand le flux atteindra la surface intérieure du mur, il aura une amplitude considérablement plus faible que l'amplitude de la surface extérieure du mur [80,82]. Le facteur d'amortissement (f) est déterminé par l'équation suivante :

$$f = \frac{A_o}{A_e} = \frac{T_o^{\max} - T_o^{\min}}{T_e^{\max} - T_e^{\min}}, \quad (\text{IV. 4})$$

Où A_o et A_e sont les amplitudes du flux de chaleur dans les surfaces intérieure et extérieure du mur. Il faut noter que le flux de chaleur sur la surface extérieure du mur englobe la température de l'air extérieur combiné périodiquement avec les radiations solaires et la convection entre l'air de la surface extérieure du mur et l'air extérieur.

Dans certain travaux de recherches, la température de surface extérieure est prise en compte pour montrer les variations sinusoïdales pendant une période de P (24 heures) parce que le temps de retard et le facteur d'amortissement dépendent seulement de l'épaisseur du mur et des matériaux ainsi que de la température extérieure non combinée périodiquement avec les radiations solaires et la convection. Une équation très générale pour la température sol-air est prise comme suit [81,82]:

$$T_{sa}(t) = \frac{|T_{\max} - T_{\min}|}{2} \sin\left(\frac{2\pi t}{P} - \frac{\pi}{2}\right) + \frac{|T_{\max} - T_{\min}|}{2} + T_{\min}. \quad (\text{IV. 5})$$

I. 4. TEMPERATURES DE SURFACES DU MUR

On constate que les deux propriétés thermo-physiques du mur ou autrement dit les propriétés de l'inertie thermique, le temps de retard (Φ) et le facteur d'amortissement (f) sont fonction des températures de surface extérieure et intérieure du mur comme le montre la Fig. IV. 5.

1) La température de la surface intérieure :

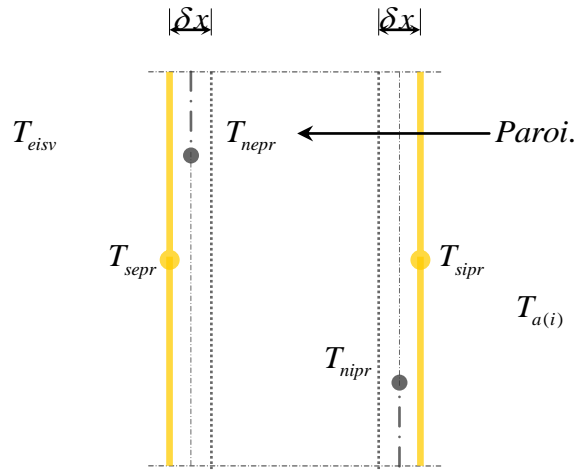


Figure IV. 5 : Les différents nœuds étudiés dans les couches de la paroi [114]

δx : Épaisseur d'une couche de la paroi (m) ;

T_{eisv} : Température équivalente de l'environnement extérieur immédiat à la paroi ($^{\circ}\text{C}$) ;

T_{nepv} : Température du nœud de la première couche externe de la paroi ($^{\circ}\text{C}$) ;

T_{sepr} : Température de la surface extérieure de la paroi ($^{\circ}\text{C}$) ;

T_{sipr} : Température de la surface intérieure de la paroi ($^{\circ}\text{C}$) ;

$T_{a(i)}$: Température de l'air intérieur ($^{\circ}\text{C}$) ;

T_{nipr} : Température du nœud de la première couche interne de la paroi ($^{\circ}\text{C}$).

La paroi est divisée en couches d'épaisseur δx , chaque axe est appelé nœud, l'équation de la chaleur pour le nœud de la première couche interne de la paroi s'écrit sous la forme suivante :

$$\frac{T_{sepr}^{t+1} - T_{nipr}^{t+1}}{R_{sepr \rightarrow nipr}} + \frac{T_{sipr}^{t+1} - T_{nipr}^{t+1}}{R_{sipr \rightarrow nipr}} = \frac{(\rho \cdot c \cdot V)_{nipr}}{\delta T} \cdot (T_{nipr}^{t+1} - T_{nipr}^t) \quad (\text{IV. 6})$$

2) La température de la surface extérieure

Une surface externe d'une paroi à T_{sepr} échange de l'énergie du fait de la différence de température entre cette surface et son environnement :

Par convection avec l'air extérieur à une température $T_{a(e)}$.

Par rayonnement avec l'environnement extérieur immédiat à la paroi à une température T_{eisv} .

Par conduction avec le nœud de la première couche externe de la paroi à une température T_{nepr} .

I. 5. METHODE DE SIMULATION

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes utilisées par les chercheurs, pour déterminer les températures de surfaces extérieures et intérieures d'un mur. Pour notre étude, il a été procédé à la simulation numérique par le logiciel **EnergyPlus**. Ce logiciel est disponible sur le site Internet « EnergyPlus-Support@GARD.com », c'est le logiciel officiel du département d'énergie des Etats Unis d'Amérique pour le programme de simulation d'un bâtiment. Ce programme combine les meilleures caractéristiques de BLAST et DOE-2 avec de nouvelles capacités. EnergyPlus est un logiciel de simulation de modèles de chauffage, de refroidissement, d'éclairage, de ventilation, ainsi que l'énergie de l'eau dans les bâtiments [115].

En effet, pour donner une idée de la rigueur et de l'efficacité d'EnergyPlus, plusieurs situations de simulation peuvent être envisagées telles que :

- L'interaction entre les zones thermiques et l'environnement ;
- Inclure les conditions environnementales horaires ;
- Solution de l'équation de la chaleur : la technique est basée sur les charges thermiques qui tiennent compte du calcul simultané ;
- Conduction de la chaleur transitoire à travers les éléments de construction tels que murs, toits, sols, etc., en utilisant les fonctions de transfert de la conduction ;
- Chaleur combinée et modèle de transfert de masse ;
- Les modèles du confort thermique.

Dans cette étude, la simulation a été faite pour un jour de l'été 2013 au cours duquel les températures extérieure maximale et minimale sont respectivement 42,5°C et 25,2°C, pour un mur supposé situé dans la ville de Laghouat, au sud de l'Algérie (Latitude 33,80°N, longitude 2,87°E, Altitude 765 m). Cette étude est faite pour cinq types de murs en bétons étudiés. Les épaisseurs envisagées pour les murs étudiés sont : 10 cm, 15 cm, 20 cm et 25 cm pour un mur à une seule paroi et 25 cm d'épaisseur pour un mur à double paroi (10 cm + 5 cm vide d'air + 10 cm).

En utilisant le logiciel EnergyPlus (version 1.2.2.030), nous pouvons obtenir à travers le temps, en heures du jour, la température de la surface extérieure du mur, la température de la surface intérieure du mur et la température de l'air intérieur de la cellule « Chambre test » dont les dimensions sont (2x2x2,5 m), sont inspirés de la bibliographie [116,117]. L'enveloppe de la cellule est dotée d'une porte de dimension (0,60 x 1,70 m) dans la paroi orientée vers le sud. Les données nécessaires pour la simulation, se résument comme suit :

<u>Bâtiment</u>	<u>Lame d'air</u>
Nom du bâtiment. Orientation par rapport au nord. Localisation du site. Valeur tolérée de chaleur. Valeur tolérée de température. Distribution solaire.	Nom. Résistance thermique.
	<u>Ouvertures</u>
	Nom. Épaisseur. Transmission solaire à incidence normale. Réflectance solaire. Émissivité. Conductivité thermique.
<u>Intervalle de temps</u>	
Nombre d'intervalles de temps par heure.	
<u>Localisation</u>	
Nom du lieu. Latitude. Longitude. Faisceau horaire. Altitude.	<u>Construction du volume</u>
	Composition de chaque face de l'extérieur vers l'intérieur.
<u>Données du jour</u>	
Jour et mois de l'année. Maximum absolu de la température. Amplitude thermique. Pression barométrique. Vitesse et direction du vent. Aspect du ciel.	<u>Zoning</u>
	Numéro de zone. Orientation de la zone. Coordonnées du point de repère
	<u>Composition du volume</u>
	Coordonnées de chaque face en commençant par le coin supérieur gauche.
<u>Température du sol</u>	<u>Composition des ouvertures</u>
Température mensuelle moyenne de chaque mois.	Coordonnées de chaque ouverture en commençant par le coin supérieur gauche.
<u>Matériaux utilisés.</u>	<u>Type de programme</u>
Nom. État de surface. Épaisseur. Conductivité thermique. Masse volumique. Chaleur spécifique. Absorptivité.	Température de façon continue.
	<u>Rapport</u>
	Température de l'air extérieur. Température de la surface extérieure du mur. Température de la surface intérieure du mur. Température de l'air intérieur.

Plus d'information sur l'introduction des données sont portées dans (l'annexe (II)).

II. RESULTATS DE LA SIMULATION

Sur la base des résultats de la simulation du logiciel EnergyPlus illustrés sur la Fig. V. 4, et en utilisant les équations (IV. 3 et IV. 4), on peut calculer le temps de retard (Φ) et le facteur d'amortissement (f) afin d'étudier l'effet de l'épaisseur du mur, l'effet de l'ajout d'un vide d'air, l'effet de l'orientation du mur et l'effet de l'ajout des revêtements intérieur et extérieur du mur.

II. 1. EFFET DE L'ÉPAISSEUR DU MUR (MUR ORIENTÉ SUD)

Les figures IV. 6. à IV. 9. montrent l'effet de l'épaisseur du mur sur les températures de surface intérieure (Tsi) et extérieure (Tse) du mur orienté vers le sud pour les différentes épaisseurs et formulations des murs. Lorsque l'épaisseur du mur augmente, l'amplitude de la température de surface intérieure du mur diminue.

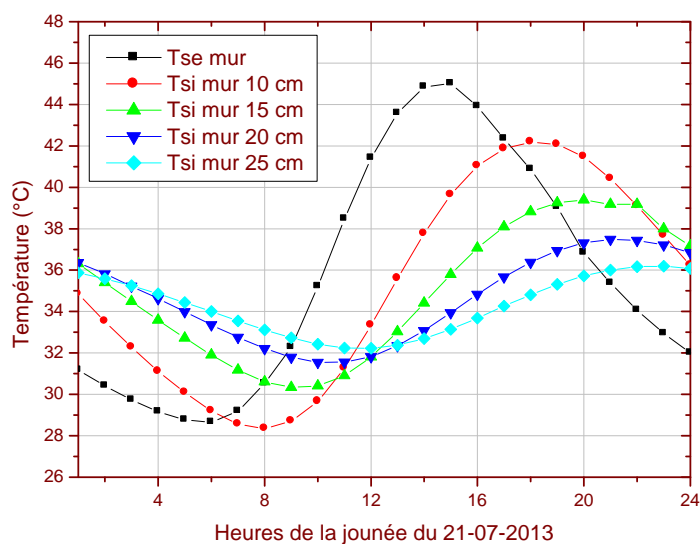


Fig. IV. 6. Effet de l'épaisseur du mur en (BSML) sur Tsi

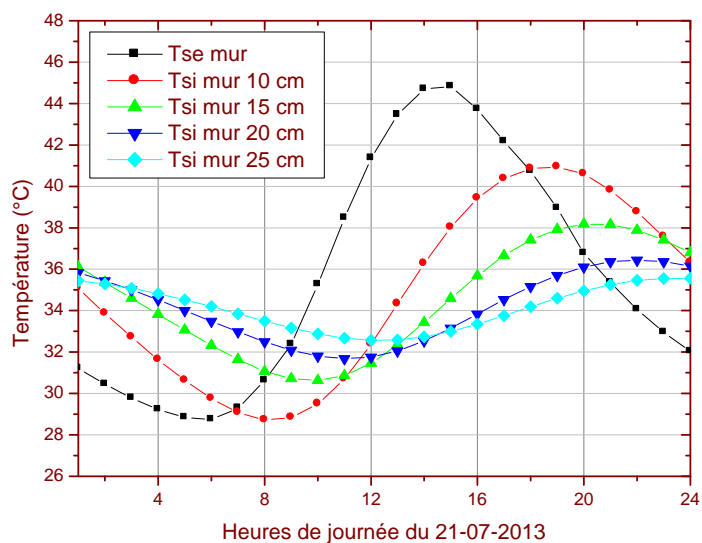


Fig. IV. 7. Effet de l'épaisseur du mur en (BAP-15) sur Tsi

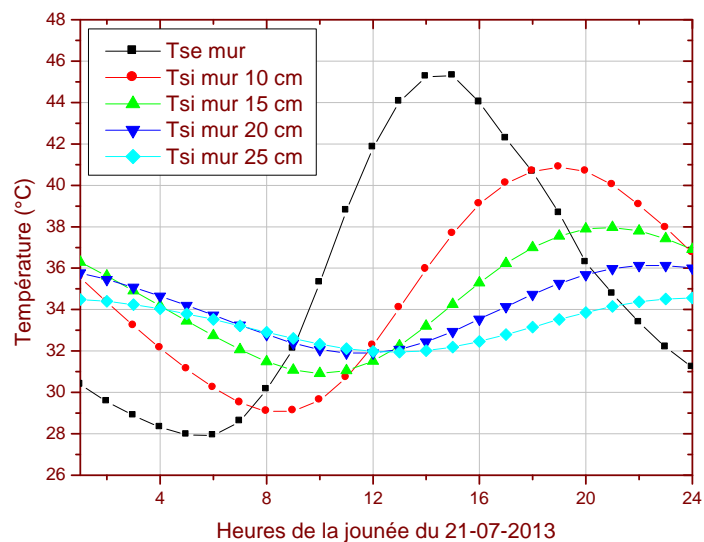


Fig. IV. 8. Effet de l'épaisseur du mur en (BACP-35) sur Tsi

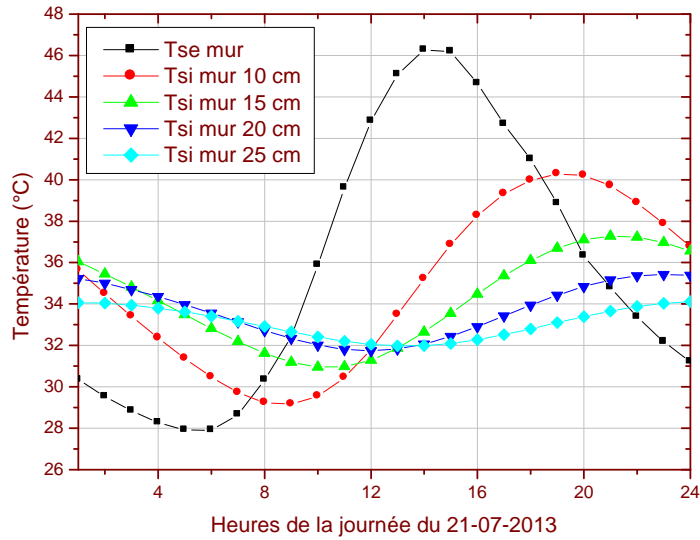


Fig. IV. 9. Effet de l'épaisseur du mur en (BAC-60) sur Tsi

Les résultats de la simulation ainsi que les équations (IV. 3 et IV. 4), permettent de calculer le temps de retard (ϕ) et le facteur d'amortissement (f). Les résultats sont mentionnés dans le tableau IV. 1, pour les différentes épaisseurs et formulations des murs. A noter que l'épaisseur optimale est de 25 cm pour le béton (BSML) et (BAP-15), elle est de 20 cm pour le béton (BACP-35) et (BAC-60).

Tableau IV. 1. Temps de retard et facteur d'amortissement pour différentes épaisseurs des murs et bétons étudiés

Type des bétons étudiés	Mur à une seule paroi							
	Mur 10 cm		Mur 15 cm		Mur 20 cm		Mur 25 cm	
	ϕ (h)	f	ϕ (h)	f	ϕ (h)	f	ϕ (h)	f
BSML	3	0,777	4	0,558	6	0,368	8	0,242
BAP-15	4	0,726	5	0,478	7	0,298	9	0,185
BACP-35	4	0,666	6	0,415	8	0,246	9	0,150
BAC-60	4	0,606	6	0,354	8	0,203	10	0,116

La Fig. IV. 10. montre l'existence d'une tendance linéaire positive entre l'épaisseur du mur et le temps de retard pour les différents bétons étudiés. Lorsque l'épaisseur du mur

augmente, le temps de retard augmente avec un coefficient de corrélation égale à 1 pour le (BAC-60) et très proche de 1 pour les autres types de bétons.

Ces tendances linéaires sont similaires aux résultats de la bibliographie [15,113]. Toutefois, l'avantage est au profit des bétons ayant des propriétés thermo-physiques améliorés, ce qui s'explique par l'effet de la diffusivité thermique [2].

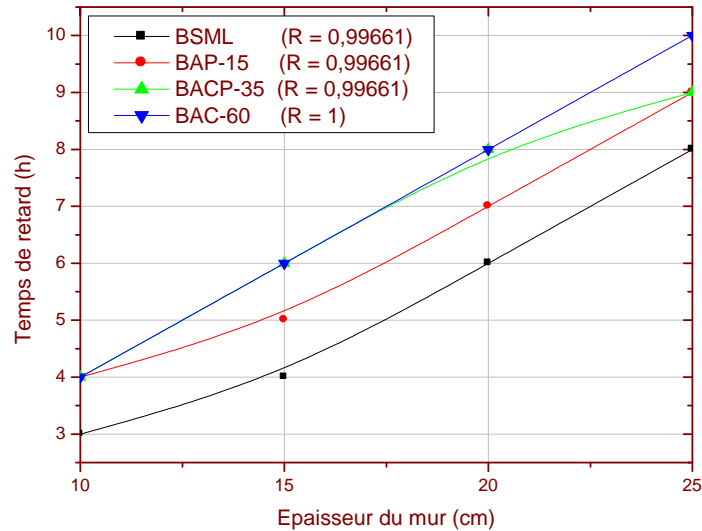


Fig. IV. 10. Relation entre l'épaisseur du mur et le temps de retard des différents bétons étudiés

La Fig. IV. 11. montre l'évolution du facteur d'amortissement avec l'épaisseur du mur pour les différents bétons étudiés. Elle présente une tendance parabolique négative. Les lois polynomiales s'appliquent avec un coefficient de corrélation égal à 1 pour le (BAP-15) et très proche de 1 pour les autres types de bétons. Lorsque l'épaisseur du mur augmente, le facteur d'amortissement diminue, ce qui est similaire aux travaux de Xing Jin et al. [113]. Il convient de noter que l'avantage est toujours au profit des bétons ayant des propriétés thermo-physiques améliorées.

Enfin, il faut noter l'existence d'une relation forte entre le temps de retard (ϕ) et le facteur d'amortissement (f) pour les différentes épaisseurs de bétons étudiés, comme le montre la Fig. IV. 12. Lorsque le temps de retard augmente, le facteur d'amortissement diminue, suivant des équations polynomiales, avec des coefficients de corrélations très proches de 1 pour les différents types de bétons étudiés.

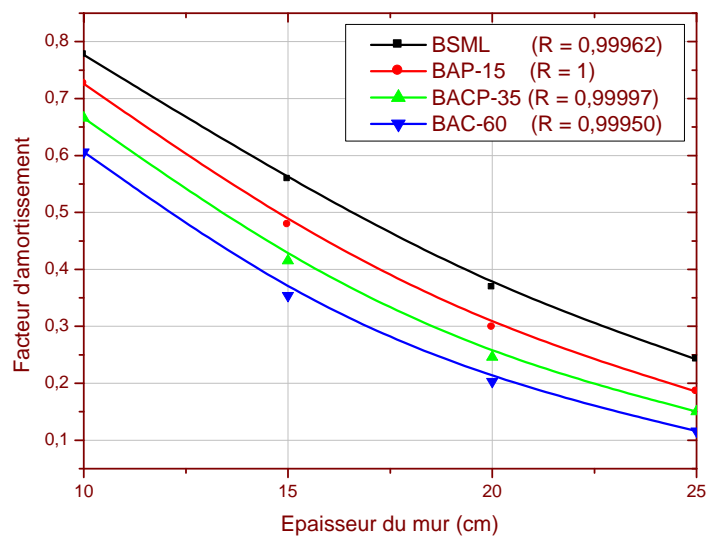


Fig. IV. 11. Relation entre l'épaisseur du mur et le facteur d'amortissement des différents bétons étudiés

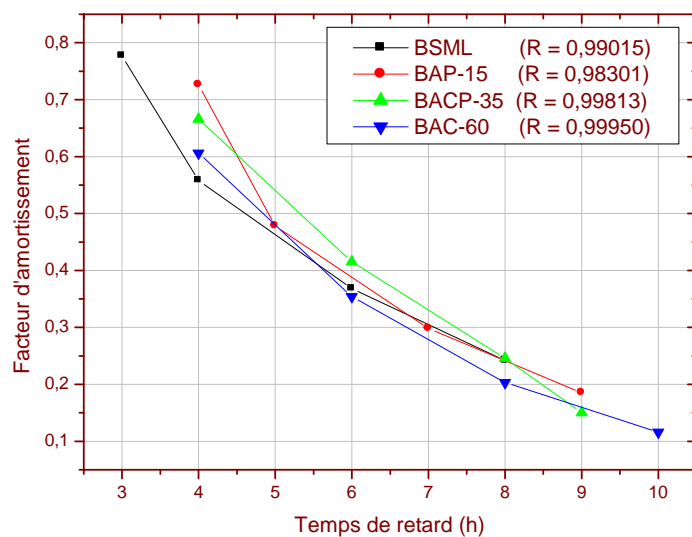


Fig. IV. 12. Relation entre le temps de retard et le facteur d'amortissement des différents bétons étudiés

II. 2. EFFET DE L'AJOUT D'UN VIDE D'AIR (MUR ORIENTE SUD)

Afin d'avoir une idée sur l'effet de l'ajout d'un vide d'air ou autrement dit de la lame d'air, la simulation a été faite pour les murs orientés vers le sud dont l'épaisseur optimale est respectivement de 20 cm pour un mur à une seule paroi en béton (BACP-35) et (BAC-60), ainsi que de 25 cm pour un mur à une seule paroi en béton (BSML) et (BAP-15). L'épaisseur du vide d'air est de 5 cm pour un mur à double paroi (10+5+10) cm, le choix de cette épaisseur a été basé sur le fait que cette épaisseur constitue une épaisseur optimale d'après la réglementation thermique en Algérie (DTR-1997). Dans la simulation, le vide d'air est traité comme une couche dont la résistance thermique est de 0.16 m²K/W.

Les résultats de la simulation présentés par les figures IV. 13. à IV. 16. et les équations (IV. 3 et IV. 4), permettent de calculer le temps de retard (Φ) et le facteur d'amortissement (f) des différents murs et épaisseurs étudiés. Les résultats sont mentionnés dans le tableau IV. 2. L'ajout du vide d'air a amélioré les facteurs d'amortissements de 26,85% pour le (BSML), de 24,32% pour le (BAP-15), de 46,74% pour le (BACP-35) et de 43,34% pour le (BAC-60). Le temps de retard est amélioré d'une heure pour le (BACP-35) et le (BAC-60). Ces améliorations s'expliquent par le rôle avantageux du vide d'air qui a réduit le transfert de chaleur à travers la paroi et par conséquent a amélioré la résistance thermique de la paroi, ce qui contribue à la réduction de la consommation d'énergie pendant l'été [118].

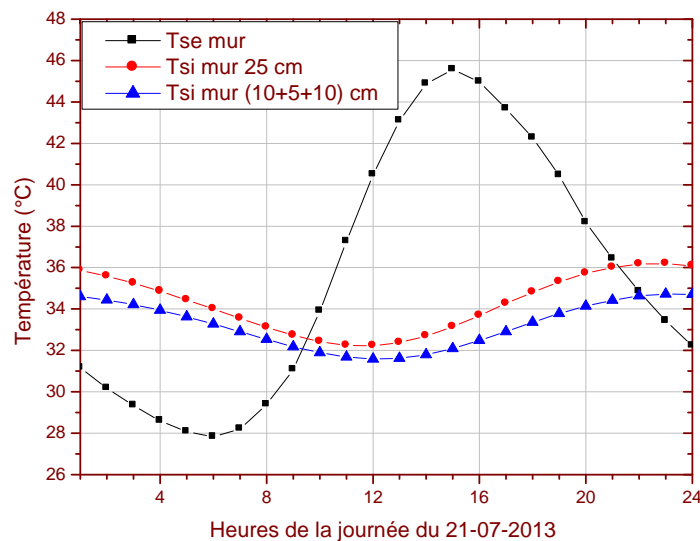


Fig. IV. 13. Température de surface extérieure et intérieure des murs de 25 cm et (10+5+10) cm en (BSML)

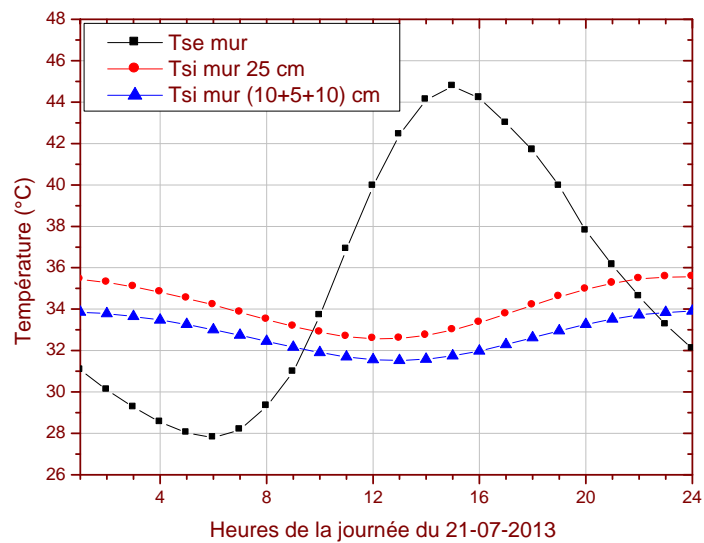


Fig. IV. 14. Température de surface extérieure et intérieure des murs de 25 cm et (10+5+10) cm en (BAP-15)

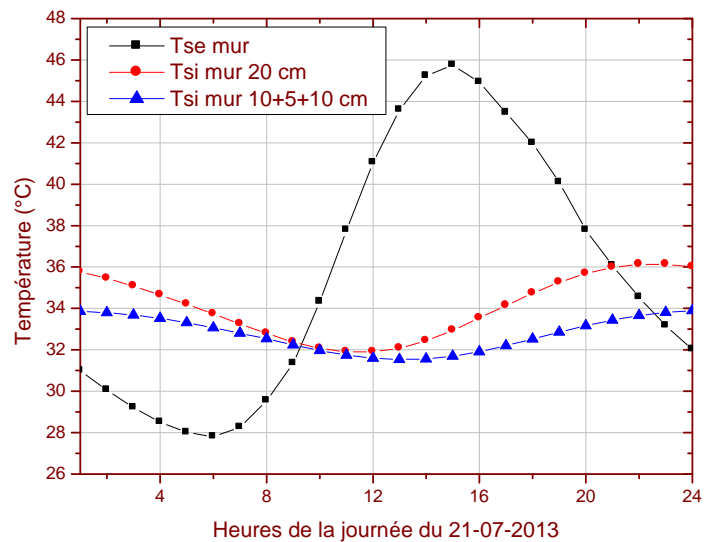


Fig. IV. 15. Température de surface extérieure et intérieure des murs de 20 cm et (10+5+10) cm en (BACP-35)

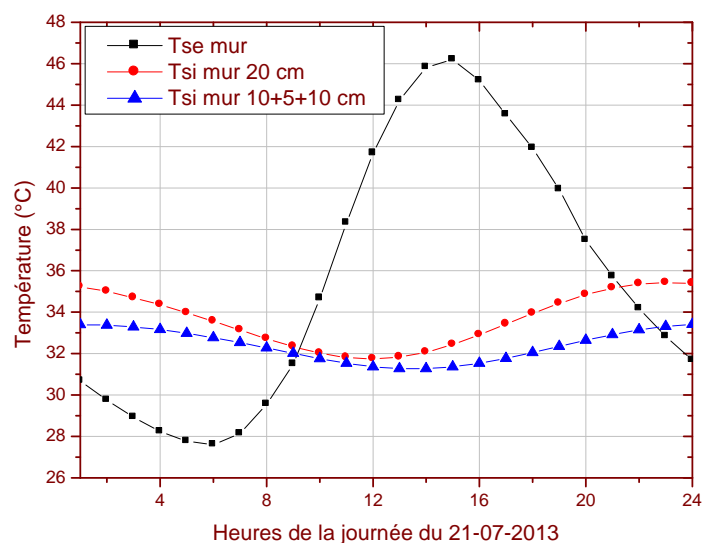


Fig. IV. 16. Température de surface extérieure et intérieure des murs de 20 cm et (10+5+10) cm en (BAC-60)

Tableau IV. 2. Temps de retard et facteur d'amortissement des murs (à une seule paroi et double paroi) et bétons étudiés

Type des bétons étudiés	Mur à une seule paroi 20 cm		Mur à une seule paroi 25 cm		Mur à double paroi (10+5+10) cm	
	ϕ (h)	f	Φ (h)	f	ϕ (h)	f
BSML	6	0,368	8	0,242	8	0,177
BAP-15	7	0,298	9	0,185	9	0,140
BACP-35	8	0,246	9	0,150	9	0,131
BAC-60	8	0,203	10	0,116	9	0,115

D'une façon générale, les résultats sont intéressants et encourageants, surtout en ce qui concerne le temps de retard des trois bétons de sables légers par rapport au béton de sable allégé par des copeaux de bois traités par enrobage superficiel avec une amélioration de deux heures [119,120].

II. 3. EFFET DE L'ORIENTATION DU MUR (MUR DOUBLE PAROI)

L'étude de l'effet de l'orientation du mur a été faite pour des murs à double paroi sans revêtement. A titre d'exemple pour le (BACP-35), les résultats de la simulation présentés par les figures IV. 17. à IV. 20. et les équations (IV. 3 et IV. 4), permettent de calculer le

temps de retard (Φ) et le facteur d'amortissement (f) des différents murs. La synthèse des résultats de la simulation, avec les différentes améliorations, est reportée dans le tableau IV. 3.

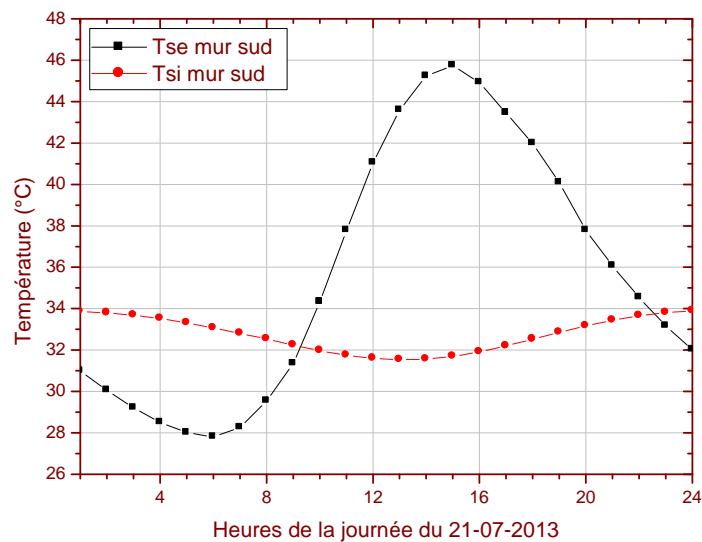


Fig. IV. 17. Température de surface extérieure et intérieure du mur en (BACP-35) d'épaisseur (10+5+10) cm orienté vers le sud

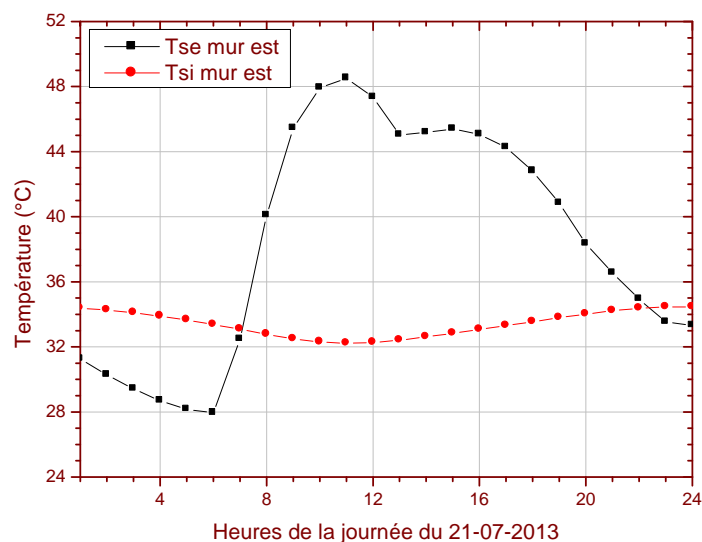


Fig. IV. 18. Température de surface extérieure et intérieure du mur en (BACP-35) d'épaisseur (10+5+10) cm orienté vers l'est

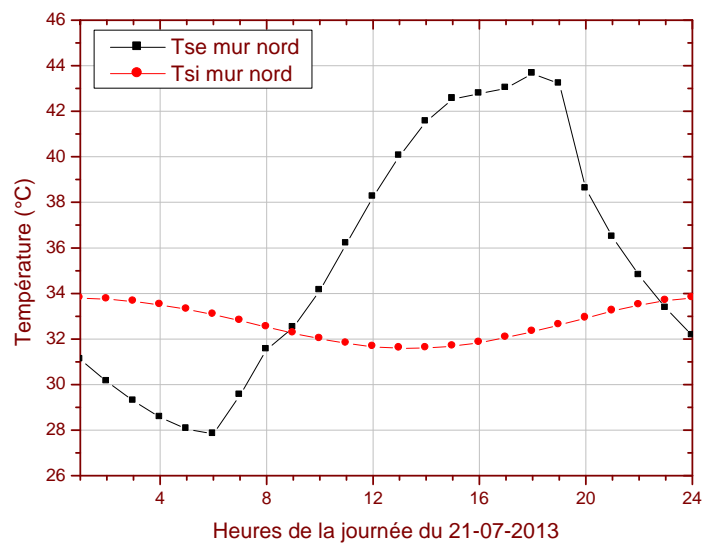


Fig. IV. 19. Température de surface extérieure et intérieure du mur en (BACP-35) d'épaisseur (10+5+10) cm orienté vers le nord

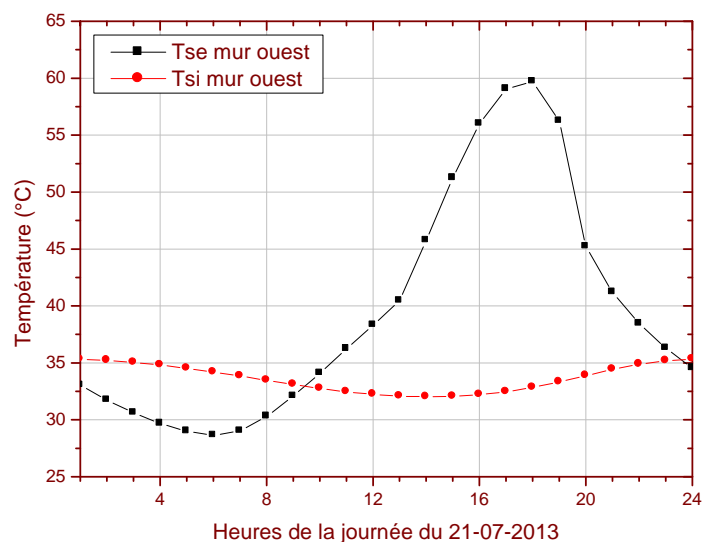


Fig. IV. 20. Température de surface extérieure et intérieure du mur en (BACP-35) d'épaisseur (10+5+10) cm orienté vers l'ouest

Tableau IV. 3. Temps de retard et facteur d'amortissement pour différentes orientations de murs sans revêtements pour les différents bétons étudiés

Type des bétons étudiés et Amélioration	Orientation d'un mur de (10+5+10) cm à double paroi							
	Mur sud		Mur est		Mur nord		Mur ouest	
	Φ (h)	f	ϕ (h)	f	ϕ (h)	f	ϕ (h)	f
BSML	8	0,177	12	0,146	6	0,188	5	0,146
BAP-15	9	0,140	12	0,121	6	0,148	6	0,117
Amélioration	+1h	-20,90%	-	-17,12%	-	-21,27%	+1h	-19,86%
BACP-35	9	0,131	13	0,108	6	0,139	6	0,106
Amélioration	+1h	-25,98%	+1h	-26,02%	-	-26,06%	+1h	-27,39%
BAC-60	9	0,115	13	0,095	7	0,123	7	0,091
Amélioration	+1h	-35,02%	+1h	-34,93%	+1h	-34,57%	+2h	-37,67%

On peut constater que les orientations favorables qui constituent les meilleurs compromis entre le temps de retard et le facteur d'amortissement pour des murs à double paroi sans revêtements sont l'orientation sud et est, lorsqu'on tient compte du temps de retard qui est ≥ 8 heures, et cela pour les différentes formulations de bétons étudiés. Par contre, les orientations défavorables sont le nord et l'ouest. L'interprétation des résultats obtenus pour le facteur d'amortissement a montré, pour chaque orientation, l'existence d'une tendance polynomiale en fonction de la teneur en matériaux lignocellulosiques pour les différents types de bétons étudiés comme le montre la Fig. IV. 21.

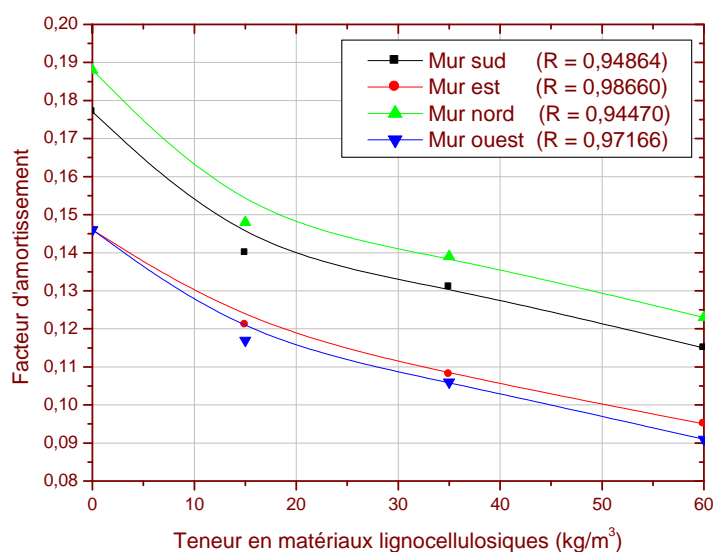


Fig. 21. Effet de l'orientation et la teneur en matériaux lignocellulosiques sur le facteur d'amortissement

Ces tendances sont presque identiques pour les différentes orientations et présentent des coefficients de corrélations se rapprochant de 1, avec toutefois un avantage au profit des bétons ayant les meilleures propriétés thermo-physiques.

II. 4. EFFET DE L'AJOUT DES REVÊTEMENTS (MUR DOUBLE PAROI)

L'ajout du revêtement extérieur et intérieur d'épaisseur de 1 cm chacun augmente l'épaisseur du mur à double paroi de 25 à 27 cm. Les matériaux prévus pour le revêtement du mur sont un mortier de ciment pour le revêtement extérieur et un enduit de plâtre pour le revêtement intérieur. Les propriétés thermo-physiques de ces deux matériaux de revêtement sont mentionnées dans le tableau VI. 4.

Tableau IV. 4. Propriétés thermo-physiques des revêtements du mur

Propriétés thermo-physiques	Mortier de ciment	Enduit en plâtre
Conductivité thermique	1,40 (W/m.K)	0,05 (W/m.K)
Chaleur spécifique	1200 (J/kg.K)	1000 (J/kg.K)
Masse volumique	2100 (kg/m ³)	1300 (kg/m ³)

A titre d'exemple, les tableaux IV. 5, IV. 6, IV. 7 et IV. 8. montrent l'effet de l'orientation des murs à double paroi avec revêtements sur le temps auquel on obtient les températures maximales et minimales des surfaces extérieure et intérieure du mur et cela respectivement pour les bétons (BSML), (BAP-15), (BACP-35) et (BAC-60).

Tableau IV. 5. Heure des températures maximales et minimales des murs extérieurs et intérieurs (BSML)

Orientation du mur	Mur sud		Mur est		Mur nord		Mur ouest	
	T_{max}	heure	T_{max}	heure	T_{max}	heure	T_{max}	heure
Température extérieure	45,08	15,00	46,83	11,00	43,18	18,00	57,64	18,00
	T_{min}	heure	T_{min}	heure	T_{min}	heure	T_{min}	heure
	27,63	06,00	27,73	06,00	27,65	06,00	28,31	06,00
Température intérieure	T_{max}	heure	T_{max}	heure	T_{max}	heure	T_{max}	heure
	34,00	24,00	34,52	23,00	33,94	24,00	35,48	24,00
	T_{min}	heure	T_{min}	heure	T_{min}	heure	T_{min}	heure
	31,26	13,00	31,95	11,00	31,33	13,00	31,71	14,00

Tableau IV. 6. Heure des températures maximales et minimales des murs extérieurs et intérieurs (BAP-15)

Orientation du mur	Mur sud		Mur est		Mur nord		Mur ouest	
	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure
Température extérieure	44,65	15,00	46,39	11,00	42,87	18,00	56,91	18,00
	T _{min}	heure	T _{min}	heure	T _{min}	heure	T _{min}	heure
	27,88	06,00	28,03	06,00	27,91	06,00	28,71	06,00
	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure
Température intérieure	33,53	24,00	34,10	24,00	33,44	24,00	34,79	01,00
	T _{min}	heure	T _{min}	heure	T _{min}	heure	T _{min}	heure
	31,46	13,00	32,12	11,00	31,50	14,00	31,97	14,00
	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure

Tableau IV. 7. Heure des températures maximales et minimales des murs extérieurs et intérieurs (BACP-35)

Orientation du mur	Mur sud		Mur est		Mur nord		Mur ouest	
	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure
Température extérieure	45,27	15,00	47,20	11,00	43,21	18,00	57,96	18,00
	T _{min}	heure	T _{min}	heure	T _{min}	heure	T _{min}	heure
	27,59	06,00	27,72	06,00	27,61	06,00	28,31	06,00
	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure
Température intérieure	33,20	24,00	33,73	24,00	33,13	02,00	34,38	01,00
	T _{min}	heure	T _{min}	heure	T _{min}	heure	T _{min}	heure
	31,17	14,00	31,78	12,00	31,21	14,00	31,63	15,00
	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure

Tableau IV. 8. Heure des températures maximales et minimales des murs extérieurs et intérieurs (BAC-60)

Orientation du mur	Mur sud		Mur est		Mur nord		Mur ouest	
	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure
Température extérieure	45,68	15,00	47,77	11,00	43,41	18,00	58,64	18,00
	T _{min}	heure	T _{min}	heure	T _{min}	heure	T _{min}	heure
	27,40	06,00	27,53	06,00	27,43	06,00	28,08	06,00
	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure
Température intérieure	32,76	02,00	33,24	24,00	32,71	02,00	33,83	02,00
	T _{min}	heure	T _{min}	heure	T _{min}	heure	T _{min}	heure
	30,90	14,00	31,48	12,00	30,94	14,00	31,33	15,00
	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure	T _{max}	heure

L'heure des températures de surfaces extérieures maximales du mur est la même pour chaque orientation et cela pour les différents types de béton étudiés ; soient 15h00 pour le mur orienté sud, 11h00 pour le mur orienté est, 18h00 pour le mur orienté nord et ouest. Néanmoins, l'heure des températures de surfaces intérieures maximales du mur varie de 23h00 à 24h00 pour le mur orienté vers le sud et l'est, de 24h à 1h00 pour le mur orienté vers le nord et de 23h00 à 1h00 pour le mur orienté vers l'ouest. Il faut noter que l'orientation 'est' a donné un long temps de retard, ce qui est conforme aux résultats de la bibliographie [85,121].

D'après les résultats de la simulation synthétisés dans le tableau IV. 9 avec les différentes améliorations, les orientations favorables qui constituent les meilleurs compromis entre le temps de retard et le facteur d'amortissement pour des murs à double paroi avec revêtements intérieur et extérieur sont l'orientation 'sud' et 'est' pour le (BAP-15), l'orientation 'sud', 'est' et 'nord' pour le béton (BACP-35), ainsi que toutes les orientations pour le béton (BAC-60). Cela explique l'effet avantageux des revêtements intérieur et extérieur pour les bétons ayant des propriétés thermo-physiques améliorées. Les temps de retards, plus particulièrement, sont améliorés, surtout pour l'orientation 'nord' avec une augmentation d'une heure pour le (BACP-35) et les orientations 'nord' et 'ouest' avec une augmentation d'une heure pour le (BAC-60).

Tableau IV. 9. Temps de retard et facteur d'amortissement pour différentes orientations des murs des bétons étudiés avec revêtements

Type des bétons étudiés	Orientation d'un mur de (10+5+10) cm à double paroi							
	Mur sud		Mur est		Mur nord		Mur ouest	
	Φ (h)	f	ϕ (h)	f	ϕ (h)	f	ϕ (h)	f
BSML	9	0,157	12	0,134	6	0,168	6	0,128
BAP-15	9	0,123	13	0,107	6	0,129	7	0,100
Amélioration	-	-21,65%	+1h	-20,14%	-	-23,21%	+1h	-21,87%
BACP-35	9	0,114	13	0,100	8	0,121	7	0,091
Amélioration	-	-27,38%	+1h	-25,37%	+2h	-27,97%	+1h	-28,90%
BAC-60	11	0,101	13	0,086	8	0,110	8	0,081
Amélioration	+2h	-35,66%	+1h	-35,82%	+2h	-34,52%	+2h	-36,71%

L'interprétation des résultats obtenus pour le facteur d'amortissement a montré, pour chaque orientation, l'existence d'une tendance polynomiale en fonction de la teneur en

matériaux lignocellulosiques pour les différents types de bétons étudiés comme le montre la Fig. IV. 22, ce qui est similaire à la Fig. IV. 21. Ces tendances sont presque identiques pour les différentes orientations et avec des coefficients de corrélations se rapprochant de 1, avec toutefois un avantage au profit des bétons ayant les meilleures propriétés thermo-physiques. On peut dire alors que le facteur d'amortissement dépend principalement des matériaux du mur et ne présente presque aucune relation avec les données climatologiques [122].

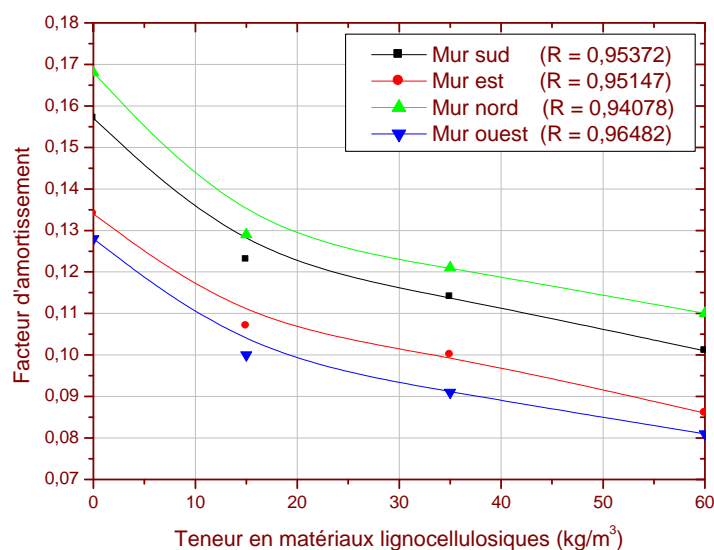


Fig. IV. 22. Effet de l'orientation des murs avec revêtements et de la teneur en matériaux lignocellulosiques sur le facteur d'amortissement

D'autre part, l'effet avantageux des revêtements, intérieur et extérieur, s'explique par les améliorations portées dans le tableau IV. 10, qui concernent le temps de retard et le facteur d'amortissement, par rapport aux résultats obtenus pour des murs à double paroi sans revêtements.

Tableau IV. 10. Effet des revêtements sur le temps de retard et le facteur d'amortissement pour différents orientations des murs des bétons étudiés

Type des bétons étudiés	Orientation d'un mur de (10+5+10) cm à double paroi							
	Mur sud		Mur est		Mur nord		Mur ouest	
	Φ (h)	f	ϕ (h)	f	ϕ (h)	f	ϕ (h)	f
BSML	+1h	-11,29%	-	-8,21%	-	-10,63%	+1h	-12,32%
BAP-15	-	-12,14%	+1h	-11,57%	-	-12,83%	+1h	-14,52%
BACP-35	-	-12,97%	-	-7,40%	+2h	-12,94%	+1h	-14,15%
BAC-60	+2h	-12,17%	-	-9,47%	+1h	-10,57%	+1h	-10,98%

II. 5. SYNTHÈSE DES RESULTATS

II. 5. 1. ZONING CLIMATIQUE

D'une façon générale, l'étude de l'effet de l'orientation des murs en milieux arides a montré que les orientations favorables en fonction du temps de retard et du facteur d'amortissement sont celles du 'sud' et 'est'. Les orientations 'nord' et 'ouest' sont très défavorables, sauf pour les bétons dont la teneur en matériaux lignocellulosiques est supérieure à 35 kg/m^3 . Pour un meilleur confort thermique avec une consommation d'énergie réduite, il faut donc disposer les espaces suivant leurs besoins énergétiques, c'est-à-dire, qu'il faut élaborer un « **zoning climatique** » en regroupant les espaces habitables suivant l'orientation 'sud' et 'est' et les espaces de services (espaces tampons) du côté nord et ouest. De plus, cette constatation relative aux orientations préférables est conforme à la recommandation de la bibliographie comme le montre la Fig. IV. 23.

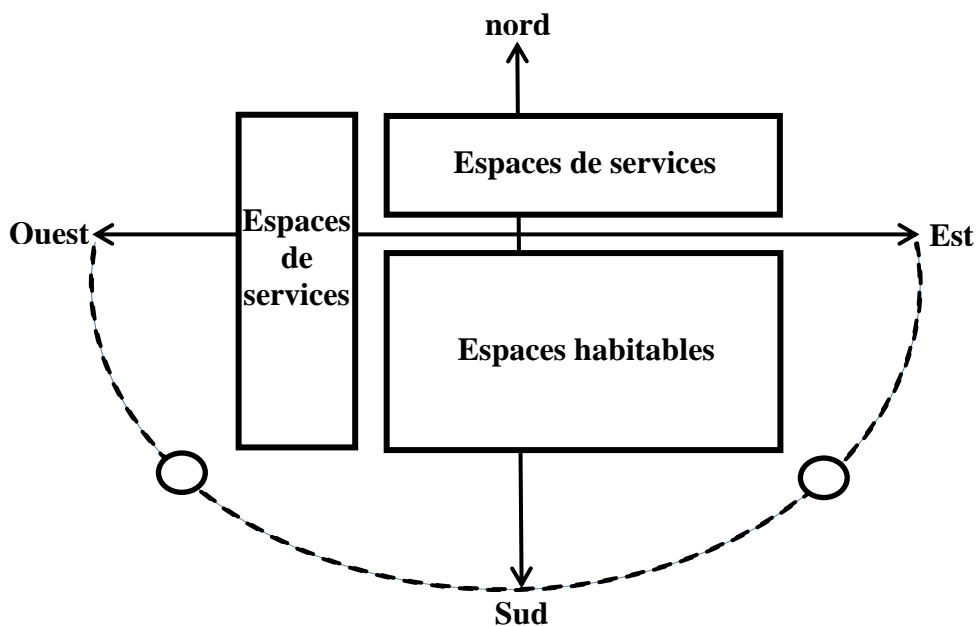


Fig. IV. 23. Zoning climatique [112]

Il convient également de noter que, dans les milieux scientifiques, il est admis que toute forme allongée le long d'un axe 'est-ouest' ainsi qu'une forme compacte du bâtiment donnent les meilleures performances thermiques [112]. De plus ces recommandations constituent un meilleur compromis entre l'été et l'hiver car l'orientation 'sud' est la plus recommandée en hiver, cette façade du bâtiment étant la plus ensoleillée.

Enfin, on peut dire que l'inertie thermique représente un des paramètres majeurs qui contribue à l'amélioration du niveau de confort thermique en été et en hiver avec une consommation d'énergie réduite. Les autres paramètres de la stratégie bioclimatique en été sont l'implantation du bâtiment, la ventilation, la végétation (arbres à feuilles caduques) et la protection des parties vitrées. Pour réduire le rayonnement solaire de l'orientation ouest, il existe d'autres solutions pour la conception architecturale en plus des zones tampons (zonage climatique), telle que l'augmentation de l'épaisseur de la paroi, assurant une isolation thermique et de la végétation à feuilles caduques.

II. 5. 2. CHOIX DU BETON DE SABLE LEGER

La Fig. IV. 24 et la Fig. 25. montrent l'effet avantageux des revêtements pour des murs à double paroi d'épaisseur de 27 cm. Il a été constaté que la meilleure composition est le (BAC-60) car toutes les orientations du mur ont donné un temps de retard (ϕ) ≥ 8 h, le seul défaut de ce type de béton est le retrait important, qui limite son utilisation. Néanmoins, le (BACP-35) présente le meilleur compromis entre les propriétés de l'inertie thermique, avec un temps de retard (ϕ) ≥ 8 h pour toutes les orientations, sauf l'orientation 'ouest' avec (ϕ) = 7 h, mais le temps de retard reste, quand même, acceptable, car il est très proche du temps recommandé.

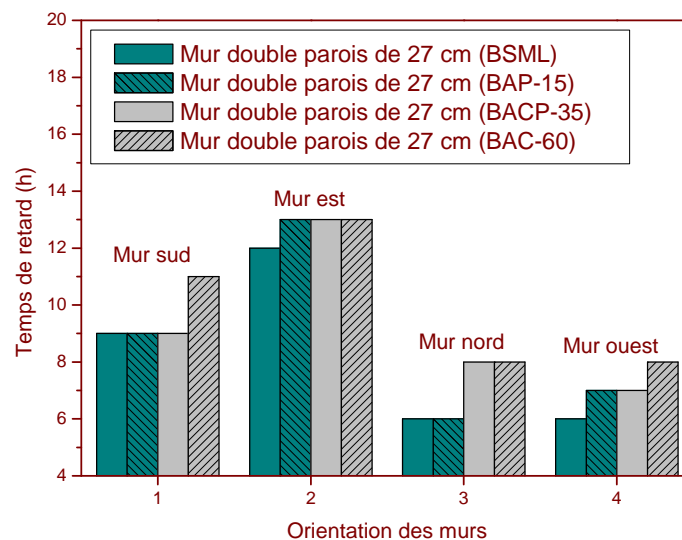


Fig. IV. 24. Effet des revêtements et de l'orientation des murs sur le temps de retard
- Cas du mur à double paroi -

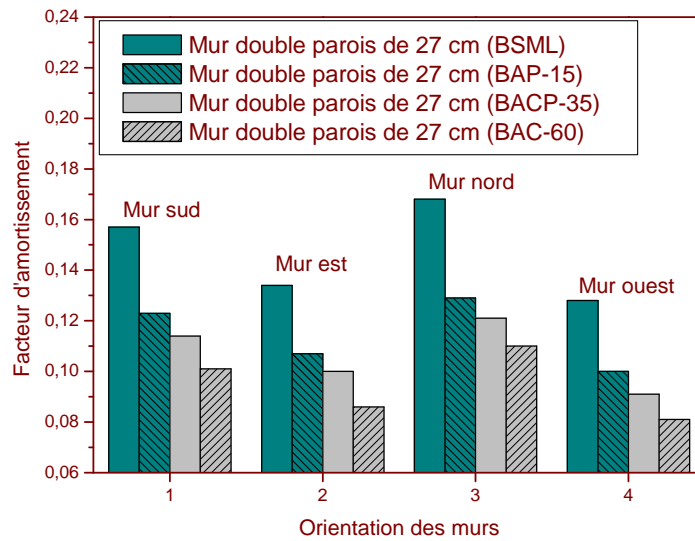


Fig. IV. 25. Effet des revêtements et l'orientation des murs sur le facteur d'amortissement - Cas du mur à double paroi -

II. 5. 3. AVANTAGES ET MISE AU POINT DU BETON DE SABLE LEGER

Dans la ville de Laghouat (Algérie), l'habitat traditionnel utilise des matériaux locaux tels que la pierre, la brique ancienne, la boue, etc., avec des murs d'épaisseur de 50 à 60 cm. Les habitations traditionnelles sont plus confortables que les nouveaux habitats à base de nouveaux matériaux, tels que le béton, le parpaing, la nouvelle brique, etc., avec des murs d'épaisseur de 20 à 30 cm. Ceci est essentiellement dû aux différences dans l'inertie thermique de l'enveloppe bâtie.

L'approche d'un béton de sable léger à base de matériaux locaux disponibles en grandes quantités à faible coût, avec en outre, la réutilisation des déchets industriels est une approche environnementale et durable, car elle contribue au respect des trois piliers du développement durable à savoir l'environnement, l'économie et le social. L'approche de ce travail visait l'amélioration des propriétés thermo-physiques, la réduction des émissions de CO₂, la durabilité des matériaux de construction et enfin la réduction de la consommation d'énergie lors de la phase de fabrication et d'exploitation à travers l'élaboration d'un matériau constituant la paroi extérieure d'un bâtiment et possédant un long temps de retard et un faible facteur d'amortissement.

En effet, dans les milieux arides, ce type de béton léger permet de minimiser l'impact des facteurs climatiques extérieurs et contribue à l'amélioration du niveau de confort thermique avec une consommation d'énergie réduite. Les performances obtenues pour le béton de sable allégé par des matériaux lignocellulosiques (pailles d'orge et copeaux de bois) montrent que ce matériau peut être considéré comme un béton léger utilisable dans des environnements arides. De plus, outre ses qualités thermiques, ce type de matériau présente des avantages économiques.

La destination de ce type de béton est aussi la construction de murs extérieurs sous forme de remplissage, et ceci pour se rapprocher de la réalité, du fait que généralement dans le domaine de la construction, les murs extérieurs des habitations se réalisent en double paroi sous forme de remplissage. A noter que les matériaux mis au point sont intéressants par leur comportement thermique. Leurs caractéristiques mécaniques permettent aussi un dimensionnement compatible avec les constructions modernes.

Pour cela, une étude expérimentale complémentaire s'avère nécessaire dont l'objectif est l'étude des propriétés thermo-physiques de blocs creux conçus avec du béton de sable allégé par la paille d'orge (BAP-15) et du béton allégé par les copeaux de bois et la paille d'orge (BACP-35). Il s'agirait essentiellement d'optimiser leurs dimensions ainsi que le nombre et l'arrangement des vides afin de concevoir des enveloppes bâties appropriées grâce à un temps de retard et à un facteur d'amortissement adaptés. Ces caractéristiques sont en effet importantes pour prédire les charges de refroidissement et de chauffage des bâtiments qui peuvent ainsi avoir passivement un environnement intérieur confortable et être plus économes en énergie [122].

III. CONCLUSION

Dans ce chapitre, il a été déterminé l'effet de l'épaisseur du mur et des propriétés thermo-physiques du matériau à savoir: la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique, qui ont une influence directe sur le temps de retard (Φ) et le facteur d'amortissement (f). L'avantage observé est au profit de bétons légers isolant-porteurs, parmi lesquels le béton (BAP-15) et le béton (BACP-35). Ces derniers contribuent favorablement à minimiser les effets des facteurs climatiques extérieurs avec un long temps de retard et un faible facteur d'amortissement, tout en permettant une épaisseur optimale du mur de respectivement 25 cm et 20 cm.

Par ailleurs, l'étude théorique par simulation grâce au logiciel « EnergyPlus » a montré aussi que la présence d'un vide d'air dans le mur, a nettement amélioré les propriétés thermo-physiques du mur, le temps de retard (Φ) et le facteur d'amortissement (f).

Ces synthèses relatives aux propriétés thermo-physiques des éco-matériaux de construction, l'épaisseur optimale du mur, l'ajout d'un vide d'air, l'ajout des revêtements et les orientations préférables (zoning climatique) ne constituent cependant qu'une première approche afin de déterminer les indicateurs majeurs pour une construction durable en milieux arides.

Les résultats obtenus sont encourageants et prometteurs dans l'objectif de l'éco-conception car ils montrent qu'il est possible de concevoir une habitation passive sur la base de deux principes fondamentaux de l'architecture bioclimatique. Cette approche que l'on peut qualifier d'éco-architecture contribue favorablement à l'amélioration du niveau de confort thermique ainsi qu'aux économies d'énergie dans les habitations en milieux arides, tel que le sud de l'Algérie.

CONCLUSION GENERALE

Dans la perspective de construire un habitat durable, les éco-matériaux devraient satisfaire l'ensemble des exigences relatives à l'environnement, l'économie et le social. Pour choisir un éco-matériau de construction, il faut donc veiller à économiser les ressources naturelles, à éviter les émissions polluantes, à minimiser la production de déchets, à réduire les coûts, à éviter les matériaux qui émettent les substances nuisibles à la santé, et enfin, il faut surtout veiller à produire des éco-matériaux qui participent à l'amélioration du niveau de confort thermique des espaces habitables, surtout dans les zones climatiques sévères.

L'approche de cette étude, peut être considérée comme une première étape qui contribue à une approche environnementale et durable, car elle permet à la fois la valorisation de matériaux locaux comme le sable de dune et la paille d'orge dans le domaine de la construction, ainsi que la réutilisation de déchets industriels (déchets de bois et déchets de concassage). Il faut aussi noter que l'utilisation des ajouts minéraux a contribué favorablement à l'amélioration des propriétés mécaniques du composite malgré la réduction de l'utilisation du ciment et par conséquent à la réduction des émissions de CO₂. L'avantage est au profit de 10% d'ajout D (1/3 calcaire, 1/3 pouzzolane naturelle et 1/3 chaux hydraulique) pour lequel la résistance à la compression à 90 jours est $21,58 \pm 0,23$ MPa (soit une augmentation de 9,54%) par rapport à la composition de base. L'utilisation des ajouts minéraux a contribué favorablement au développement des silicates de calcium hydratés (C-S-H).

Cette étude a montré la faisabilité de l'incorporation des copeaux de bois et de la paille d'orge, séparément et en combinaison, surtout pour le (BAP-15) et le (BACP-35). L'avantage est au profit de l'éco-béton de sable allégé par 30 kg/m³ de copeaux de bois et 5 kg/m³ de paille d'orge (BACP-35), qui constitue un béton de sable léger isolant-porteur. Ce constat est fait sur la base des résultats mécaniques, thermiques avec un contrôle de la microstructure. Les principales améliorations de cette composition par rapport à la composition de base sont : la masse volumique sèche de 1470,57 kg/m³ (soit une réduction de 26,58%), la diffusivité thermique de $0,373 \times 10^{-6}$ m²/s (soit une réduction de 35,46%). De plus, les résultats de la microstructure sont très intéressants, surtout lorsque les deux matériaux lignocellulosiques utilisés n'ont subi aucun traitement.

L'hypothèse de la substitution partielle des copeaux de bois par de la paille d'orge a contribué favorablement à la réduction du retrait, avec une valeur de $0,751 \pm 0,028$ mm/m qui est inférieure à la valeur cible de 1 mm/m fixée par les programmes de recherches, et en particulier le programme européen « FOREST ». L'objectif visé est donc atteint. De plus, la paille d'orge a un effet positif sur l'amélioration de la ductilité et la ténacité du béton de sable, ainsi que sur l'ouverture de la fissure pour le (BAP-15) et (BACP-35).

La détermination des deux propriétés thermo-physiques du mur extérieur, le temps de retard (Φ) et le facteur d'amortissement (f) est indispensable afin de mieux apprécier le comportement thermo-physique des bétons étudiés pour la construction d'un mur extérieur en milieux arides, car les murs représentent la principale composante de l'enveloppe bâtie, séparant l'extérieur de l'intérieur, contribuant à l'inertie thermique d'une habitation.

D'après l'étude de la simulation numérique, on peut conclure que la détermination du temps de retard (Φ) et du facteur d'amortissement (f) est très importante à connaître, car ils déterminent l'inertie thermique de la paroi extérieure. Lorsque l'épaisseur du mur augmente, sans vide d'air et avec, le temps de retard augmente et le facteur d'amortissement diminue. Cela signifie que la résistance thermique du mur augmente. Ce qui s'explique par l'effet de la diffusivité thermique qui est fonction de la masse volumique, la conductivité thermique et la chaleur spécifique du matériau. L'avantage est au profit du béton ayant des propriétés thermo-physiques améliorées. De plus, les résultats de la simulation sont conformes à la littérature pour des murs à double paroi sans revêtements. Les orientations favorables sont l'est et le sud et les orientations défavorables sont le nord et l'ouest. Enfin il convient de noter que l'ajout des revêtements a amélioré davantage les propriétés thermo-physiques des murs à double paroi en BACP-35 pour l'orientation nord avec +2h par rapport au BAP-15, soit un temps de retard de 8h. L'orientation « ouest » est aussi améliorée avec un temps de retard de 7 heures qui reste très acceptable car il est proche du temps de retard recommandé qui est ≥ 8 heures d'après la littérature. L'objectif de l'optimisation de l'inertie thermique des murs extérieurs en milieux arides comme un principe de base de l'architecture bioclimatique est donc atteint.

Cette étude constitue une première approche afin de déterminer les indicateurs majeurs pour une construction durable dans les milieux arides à travers les propriétés thermo-physiques des éco-matériaux de construction dont la formulation est à base de matériaux et déchets locaux, l'épaisseur et la technique constructive des murs extérieurs, le zoning

climatique qui permet de disposer les espaces suivant les types d'activités, le taux de fréquentation de l'espace et les besoins énergétiques. Toutefois, dans le but de minimiser les effets climatiques extérieurs et par conséquent minimiser la consommation d'énergie, il faut veiller à prévoir des éco-matériaux de construction ayant une conductivité thermique réduite et une chaleur spécifique élevée afin d'avoir une bonne inertie thermique.

Les résultats obtenus sont encourageants, prometteurs dans l'option de l'éco-conception et incitent largement à promouvoir ce type de béton léger car il est possible de concevoir des habitations passives sur la base de deux principes fondamentaux de l'architecture bioclimatique : l'inertie thermique et l'orientation. Cette approche que l'on peut qualifier d'éco-architecture contribue favorablement à l'amélioration du niveau de confort thermique ainsi qu'aux économies d'énergie dans les habitations en milieux arides, tel que le sud de l'Algérie.

Enfin, et même si l'intérêt de ce type de matériaux de construction est déjà mis en évidence, des études complémentaires sont toujours souhaitables pour aller vers un développement industriel de ces produits. Il s'agit notamment de :

- ✚ La réflexion pour un traitement de la paille d'orge par une méthode de pulvérisation ou d'imprégnation qui augmente la rugosité après séchage afin d'augmenter davantage l'adhérence entre la matrice et la paille d'orge.
- ✚ L'étude de la durabilité des bétons étudiés, le (BAP-15) et le (BACP-35) dans les milieux agressifs.
- ✚ L'étude des propriétés thermo-physiques de blocs creux conçus avec du béton de sable allégé par la paille d'orge (BAP-15) et du béton allégé par les copeaux de bois et la paille d'orge (BACP-35), mais aussi leur dimensionnement ainsi que le nombre et l'arrangement des vides.
- ✚ La simulation numérique des logements avec les différentes composantes de l'enveloppe bâtie.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] S. Nezzar, M. Gourdache. Etude des Performances Energétiques d'une Conception Bioclimatique en Région Aride. World Energy Council, 1999.
 - [2] B. Belhadj, M. Bederina, N. Montrelay, J. Houessou, M. Quéneudec, Effect of substitution of wood shavings by barley straws on the physico-mechanical properties of lightweight sand concrete. *Construction and Building Materials*. 66 (2014) 247-258.
 - [3] M. Bederina, L. Marmoret, K. Mezreb, M.M. Khenfer, A. Bali, M. Quéneudec. Effect of the addition of wood shavings on thermal conductivity of sand concretes : Experimental study and modelling. *Construction and Building Materials*. 21 (2007) 662-668.
 - [4] G. Escadeillas. Les éco-matériaux dans la construction : Enjeux et perspectives. Septième édition des journées scientifiques du regroupement francophone pour la recherche et la formation sur le béton (RF)² B, Toulouse, France, 19-20 juin 2006.
 - [5] M. Khazma, A. Goullieux, R.M. Dheilly, M. Quéneudec. Coating of a lignocellulosic aggregate with pectin/polyethylenimin mixtures : Effect on flax shive and cement-shive composite properties. *Cement & Concrete Composites*. 34 (2012) 223-230.
 - [6] J. Lair, J.L. Chevalier, C. Gobin, F. Buyle-Bodin. Ingénierie du développement durable : vers la formalisation d'une doctrine française. XXX^{EMES} Rencontres universitaires de génie civil. Université la Rochelle. Vol. 1 (2003) 405-413.
 - [7] Document Internet, Site : www.ecobilan.com/dossier. Le bâtiment, un secteur au cœur du développement durable.
 - [8] R.J. Flatt, N. Roussel, C.R. Cheeseman. Concrete : An eco material that needs to be improved. *Journal of the European Ceramic Society*. 11 (2012) 2787-2798.
 - [9] J. Baron. Bétons de sable caractéristiques et pratiques d'utilisation. Presse de l'école national des ponts et chaussés, 1994.
 - [10] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei, A. Bahadori. Global strategies and potentials to curb CO₂ emissions in cement. *Journal of Cleaner Production*. 51(2013) 142-161.
 - [11] L. A. P. Oliveira, S. Jalali, J. M. Fernandes, E. Torres. The use of metakaolin in the production of environmentally efficient concrete. *Materials and Structures*. 38 (April 2005) 403-410.
 - [12] S.R. Karade. Cement-bonded composites from lignocellulosic wastes. *Construction and Building Materials*. 24 (2010) 1323-1330.
 - [13] Mangesh V. Madurwar, Rahul V. Ralegaonkar, Sachin A. Mandavgane. Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review. *Construction and Building Materials*. 38 (2013) 872-878.
 - [14] Renforcement des polymères par des fibres végétales. Journées scientifiques et techniques - AMAC. Revue des composites et des matériaux avancés. Volume 18 - n°2/2008, p186 et 216.
-

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [15] Document internet, site: www.atba.ch/.../Conference-bioclimatique-2007-Ecoquartier.
- [16] Fauteux Eric, Stéphane Fortin. Le béton de sable appliqué aux chaussées routières. Infrastructures, Montréal, CERIU, Vol. 9, N° 5, 2002.
- [17] Abdelatif Benaissa. Déformations différées du béton de sable. Thèse doctorat, université Bordeaux, 1992.
- [18] Robu Ion, Jauberthie Raoul, Cisse Ibrahima, Achoura Djamel. Comportement des bétons de sable en milieu sulfatique. Algérie Equipement. Revue technique de l'école Nationale des travaux publics, N° 40, 2005.
- [19] B. Belhadj, M. Bederina, K. Benguettache, M. Queneudec. Effect of the type of sand on the fracture and mechanical properties of sand concrete. *Advances in Concrete Construction*, Vol. 2, No. 1 (2014) 13-27.
- [20] Madani Bederina. Caractérisation mécanique et microstructure des bétons de sable locaux : Effet des Fillers et de la nature des sables sur le comportement mécanique du matériau. Mémoire de magister, UAT de Laghouat, 2000.
- [21] Adam M. Neville, Propriétés des bétons, Edition EYROLLES, 2000.
- [22] Madani Bederina. Caractérisation mécanique et physique des bétons de sables à Base de déchets de bois. Thèse doctorat, Ecole Nationale Polytechnique (Algérie) 2007.
- [23] Osman Unal, Tayfun Uygunoglu, Ahmet Yildiz, Investigation of properties of low-strength lightweight concrete for thermal insulation. *Building and Environment*. 42 (2007) 584-590.
- [24] P. Pimienta, J. Chandellier, M. Rubaud, F. Dutruel, H. Nicole. Etude de faisabilité des procédés de construction à base de béton de bois. Cahiers du CSTB, N° 2703, 1994.
- [25] S. B. Sadineni, S. Madala, R. F. Boehm, Passive building energy savings : A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15 (2011) 3617-3631.
- [26] Georges Dreux. Nouveau guide du béton. Editions EYROLLES, 1986.
- [27] Mitani Husam. Variations volumiques des matrices cimentaires aux très jeunes âges : approche expérimentale des aspects physiques et microstructuraux. Thèse de doctorat, Ecole nationale des ponts chaussés, 2003.
- [28] V. Baroghel Bouny. Caractérisations des pâtes de ciments et des bétons, Méthodes, Analyses, Interprétation. Thèse de doctorat, ENPC, (1994).
- [29] N. Setter, D. M. Roy. Mechanical features of chemical shrinkage. *Cement and Concrete Research*. 8 (1978) 623-634.
- [30] E. Tazawa, S. Miyazawa. Influence of constituents and compositions on autogenous shrinkage of cementitious materials. *Magazine of concrete research*. Vol. 49, N° 178 (1997) 15-22.
- [31] G. Toma. Comportement des bétons aux jeunes âges. Thèse doctorat, université de Laval – canada, 1999.
- [32] François de Larrard. Une approche de la formulation des bétons légers de structure.
-

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bulletin liaison des ponts et chaussées, réf. 3876, (1995).
- [33] G. Dreux. Composition des bétons légers. Presse de l'école national des ponts et chaussées, 1986.
- [34] Thomas A. Holm. Lightweight Concrete and Aggregates. American Society for Testing and Materials, 1994.
- [35] Ali Ledhem. Contribution à l'étude d'un béton de bois mise au point d'un procédé de minimisation des variations dimensionnelles d'un composite Argile-Ciment-Bois. Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, 1997.
- [36] A. Ledhem, R.M. Dheilily, M.L. Benmalek, M. Quéneudec. Properties of wood- based Composites formulated with aggregate industry waste. Construction and Building Materials. 14 (2000) 341-350.
- [37] A. Bouguerra, A. Ledhem, A. de Roodenbeke, M. Quéneudec. Incorporation de déchets argileux dans les bétons de bois: Propriétés mécaniques et Thermiques. Déchets sciences et techniques, N°4, décembre, 4^{ème} trimestre, (1996).
- [38] Messaouda Gotteicha. Caractérisation des bétons de sable à base de copeaux de bois traités. Mémoire de magister UAT de Laghouat, 2005.
- [39] A. Bouguerra, F. de Barquin, A. Ledhem, R. M. Dheilily, M. Quéneudec. Etude de la porosité des bétons de bois à matrice argileuse: relation avec les propriétés mécaniques et thermiques. CV 3.DOC.18.11.96, (1996).
- [40] P. Coatanlem, R. Jauberthie, F. Rendell. Lightweight wood chipping concrete durability. Construction and Building Materials. 20 (2006) 776-781).
- [41] M. Bederina, B. Laidoudi, A. Goullieux, M.M. Khenfer, A. Bali, M. Quéneudec. Effect of the treatment of wood shavings on the physic-mechanical characteristics of wood sand concretes. Construction and Building Materials. 23 (2009) 1311-1315.
- [42] M. Bederina, M. Gotteicha, B. Belhadj, R.M. Dheilily, M.M. Khenfer, M. Queneudec. Drying shrinkage studies of wood sand concrete – Effect of different wood treatments. Construction and Building Materials. 36 (2012) 1066-1075.
- [43] B. Belhadj, M. Bederina, M.M. Khenfer. Effet de différents traitements de copeaux de bois sur les propriétés physico-mécaniques des bétons de sables légers. Revue des Sciences et Sciences de l'ingénieur. Vol. 02, N° 01, 41-47, Décembre 2012.
- [44] Document internet, site: www.enset-oran.dz.
- [45] M.S. Bouglada. Effet de l'activation du ciment avec ajout minéral par la chaux fine sur le comportement mécanique du mortier. Mémoire de magister, Université de M'sila, 2008.
- [46] Y. Lin, S. Zhou, F. Li, Y. Lin. Utilization of municipal sewage sludge as additives for the production of eco-cement. Journal of Hazardous Materials. 213-214 (2012) 457-465.
- [47] S. Weiguo, Z. Mingkai, Z. Qinglin. A New kind of eco-cement made of cement kiln dust and granular blast furnace slag. Journal of Wuhan University of Technology Mater. Sci. Ed. Vol. 21 N° 1, 143-146, March 2006.
- [48] L. Zongshou, Z. Qian. Strength of limestone-based non-calcined cement and its
-

- properties. Journal of Wuhan University of Technology- Mater. Sci. Ed. 471-475, June 2009.
- [49] Z. Makhloufi, E.H. Kadri, M. Bouhicha, A. Benaissa. Resistance of limestone mortars with quaternary binders to sulfuric acid solution. Construction and Building Materials. 26 (2012) 497-504.
- [50] Z. Makhloufi, E.H. Kadri, M. Bouhicha, A. Benaissa, R. Bennacer. The strength of limestone mortars with quaternary binders : Leaching effect by demineralised water. Construction and Building Materials. 36 (2012) 171-181.
- [51] A. Itim, K. Ezziane, E.H. Kadri. Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions. Construction and Building Materials. 25 (2011) 3603-3609.
- [52] O. Burgos-Montes, M. Palacios, P. Rivilla, F. Puertas. Compatibility between superplasticier admixtures and cements with mineral additions. Construction and Building Materials. 31 (2012) 300-309.
- [53] A.S.E. Belaidi, L. Azzouz, E. Kadri, S. Kenai. Effect of pozzolana and marbre powder on the properties of self compacting concrete. Construction and Building Materials. 31 (2012) 251-257.
- [54] S. Chabi, B. Mezghiche, H. Guettala. Etude de l'influence des additions minérales actives sur le comportement mécanique des ciments et mortiers. Courrier du savoir- N°5, juin 2004, pp.03-08.
- [55] M.M. Khenfer et P. Morlier. Caractérisation et microstructure des ciments renforcés de fibres de cellulose. Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées, réf. 4236, (2000).
- [56] Z. Li, X. Wang, L. Wang. Properties of hemp fibre reinforced concrete composites. Composites: Part A (applied sciences and manufacturing). 37 (2006) 497-505.
- [57] H. S. Yang, D.J. Kim, H.J. Kim. Rice straw-wood particle composite for sound absorbing wooden construction materials. Bioresource Technology. 86 (2003) 117-121.
- [58] P. Soroushian, F. Aouadi, H. Chowdhury, A. Nossoni, G. Sarwar. Cement-bonded straw board subjected to accelerated processing. Cement & Concrete Composites. 26 (2004) 797-802.
- [59] T. Ashour, H. Wieland, H. Georg, F.J. Bockisch, W. Wu. The influence of natural reinforcement fibres on insulation values of earth plaster for straw bale buildings. Materials and Design. 31 (2010) 4676-4685.
- [60] V. Nozahic, S. Amziane, G. Torrent, k. Saidi, H. De Baynast. Design of green concrete Made of plant-derived aggregates and a pumice-lime binder. Cement & Concrete Composites. 34 (2012) 231-241.
- [61] I. Merta, E.K. Tschegg. Fracture energy of natural fibre reinforced concrete. Construction and Building Materials. 40 (2013) 991-997.
- [62] P. Monreal, L.B. Mboumba-Manboundou, R.M. Dheilly, M. Quéneudec. Effects of aggregate coating on the hygral properties of lignocellulosic composites. Cement & Concrete Composites. 33 (2011) 301-308.
-

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [63] D. Taoukil, A. El bouardi, T. Ajzoul, H. Ezbakhe. Effect of the incorporation of wood wool on thermo physical properties of sand mortars. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 16(6), (2012) 1003-1010.
- [64] Belkacem Belhadj. Amélioration des propriétés thermo-physiques des bétons des sables allégés par des copeaux de bois en milieux arides (Cas de la ville de Laghouat). Mémoire de magister, UAT de Laghouat, 2007.
- [65] M. Khazma, A. Goullieux, R.M. Dheilily, B. Laidoudi, M. Queneudec. Impact of aggregate coating with a PEC elastomer on properties of lightweight flax shive concrete. *Industrial crops and Products*. 33 (2011) 49-56.
- [66] Yoshihiro Obata, Kazutoshi Takeuchi, Naho Soma, Kozo Kanayama. Recycling of wood waste as sustainable industrial resources—Design of energy saving wood-based board for floor heating systems. *Energy*. 31 (2006) 2341-2349.
- [67] Document Internet, Site: www.ademe.fr. Chutes, copeaux et sciures: que faire ?
- [68] K. Al Rim, A. Ledhem, O. Douzane, R.M. Dheilily, M. Quéneudec. Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites. *Cement & Concrete Composites*. 21 (1999) 269-276.
- [69] Hayoz Pascal, Peter Wolfgang, Rogez Daniel. A new innovative stabilization method for the protection of natural wood. *Prog Org Coat*. 48 (2003) 297-309).
- [70] Claude Alain Roulet. *Energétique du bâtiment II*. Edition presses polytechniques romandes, 1987.
- [71] T. Ashour, H. George, W. Wu. Performance of straw bale wall: A case of study. *Energy and Buildings*. 43 (2011) 1960-1967.
- [72] Suna JX, Xub F, Suna XF, Xiaoa B, Sunb RC. Physico-chemical and thermal characterization of cellulose from barley straw. *Polym Degrad Stab*. 88 (2005) 521-531.
- [73] J.M.L. Reis. Sisal fiber polymer mortar composites: Introductory fracture mechanics approach. *Construction and Building Materials*. 37 (2012) 177-180.
- [74] B. Belhadj, M. Bederina, Z. Makhoulfi, A. Goullieux, M. Quéneudec. Study of the thermal performances of an exterior wall of barley straw sand concrete in an arid environment. *Energy and Buildings*. 87 (2015) 166-175.
- [75] J. Zhou, Y. Chen, A review on applying ventilated double-skin facade to buildings in hot-summer and cold-winter zone in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 14 (2010) 1321-1328.
- [76] Z. Yilmaz, Evaluation of energy efficient design strategies for different climatic zones: Comparaison of thermal performance of buildings in temperate-humid and hot-dry climate. *Energy and Buildings*. 39 (2007) 306-316.
- [77] G. Manioglu, Z. Yilmaz, Energy efficient design strategies in the hot dry area of Turkey. *Building and Environment*. 43 (2008) 1301-1309.
- [78] Gul Koçlar Oral, Alpin Koknel Yener, Nurgun Tamer Bayazit, Building envelope design with the objective to ensure thermal, visual and acoustic comfort conditions. *Building and Environment*. 39 (2004) 281-287.
-

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [79] K. Ulgen, Experimental and theoretical investigation of effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*. 34 (2002) 273-278.
- [80] K. j. Kontoleon, D. K. Bikas, The effect of south wall's outdoor absorption coefficient on time lag, decrement factor and temperature variations. *Energy and Buildings*. 39 (2007) 1011-1018.
- [81] H. Asan, Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and decrement factor. *Building and Environment*. 32 (2000) 197-203.
- [82] H. Asan, Numerical computation of time lag and decrement factors for different building materials. *Building and Environment*. 41 (2006) 915-920.
- [83] H. Asan, Y.S. Sancakatar, Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*. 28 (1998) 159-166.
- [84] Soon-Ching Ng, Kaw-Sai Low, Ngee-Heng Tioh. Thermal inertia of newspaper sandwiched aerated lightweight concrete wall panels: Experimental study. *Energy and Buildings*. 43 (2011) 2956-2960.
- [85] L.E. Mavromatidis, M. El Mankibi, P. Michel, M. Santamouris, of time lags and decrement factors for wall complexes including multilayer thermal insulation in two different climatic zones. *Applied Energy*. 92 (2012) 480-491.
- [86] S. Andolsun, C.H. Culp, J.S. Haberi, M.J. Witte, EnergyPlus vs DDE-2.1e: the effect of ground coupling on cooling/heating energy requirements of slab-on-grade code houses in four climates of the US. *Energy and Buildings*. 52 (2012) 189-206.
- [87] P.C. Tabares-Velasco, C. Christensen, M. Bianchi, Verification and validation of EnergyPlus phase change material model for opaque wall assemblies, *Building and Environment*. 54 (2012) 186-196.
- [88] A.R. Rempel, A.W. Rempel, K.V. Cashman, K.N. Gates, C.J. Page, B. Shaw, Interpretation of passive solar field data with EnergyPlus models: un-conventional wisdom from four sunspaces in Eugene, Oregon. *Building and Environment*. 60 (2013) 158-172.
- [89] Y. Jiang, T. Ge, R. Wang, Performance simulation of a joint solid desiccant heat pump and variable refrigerant flow air conditioning system in EnergyPlus. *Energy and Buildings*. 65 (2013) 220-230.
- [90] N.M. Mateus, A. Pinto, G. Carrilho da Graca, Validation of EnergyPlus thermal simulation of a double skin naturally and mechanically ventilated test cell. *Energy and Buildings*. 75 (2014) 511-522.
- [91] David Y.K. Toguyeni, Ousmane Coulibaly, Abdoulaye Ouedraogo, Jean Kouliadiati, Yvan Dutil, Daniel Rousse. Study of the influence of roof insulation involving local materials on cooling loads of houses built of clay and straw. *Energy and Buildings*. 50 (2012) 74-80.
- [92] N. Fezzioui, B. Droui, M. Benyammine et S. Larbi. Influence des caractéristiques dynamiques de l'enveloppe d'un bâtiment sur le confort thermique au sud Algérien. *Revue des Energies Renouvelables*. Vol. 11 N°1 (2008) 25 - 34.
-

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [93] A. Mokhtari, K. Brahim, R. Benziadai. Architecture et confort thermique dans les zones arides application au cas de la ville de Béchar. *Revue des Energies Renouvelables*. Vol. 11 N  2 (2008) 307 – 315.
- [94] S.M.A. Bekkouche, T. Benouaz, M.K. Cherier, M. Hamdani, N. Benamrane, M.R. Yaiche. Thermal resistances of local building materials and their effect upon the interior temperatures case of a building located in Ghardaia region. *Construction and Building Materials*. 52 (2014) 59–70.
- [95] M. Bederina, M.M. Khenfer, R.M. Dheilily, M. Quéneudec. Reuse of local sand: effect of limestone filler proportion on the rheological and mechanical properties of different sand concrete. *Cement and Concrete Research*. 35 (2005) 1172-1179.
- [96] A.S. Al-Harthy, M. Abdel Halim, R. Taha, K.S Al-Jabri. The properties of concrete made with fine dune sand. *Construction and Building Materials*. 21 (2007) 1803-1808.
- [97] R. Dupain, R. Lanchan, J.C. Saint-Arroman. *Granulats, sols, ciment et bétons*. Edition Casteilla, 1995.
- [98] Document internet, site: www.lafarge-na.com.
- [99] Z. Makhloufi, T. Bouziani, M. Hadjoudja, M. Bederina. Durability of limestone mortars based on quaternary binders subjected to sulfuric acid using drying–immersion cycles. *Construction and Building Materials*. 71 (2014) 579–588.
- [100] Chi-Sun Poon, Dixon Chan. Effects of contaminants on the properties of concrete paving blocks prepared with recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*. 21 (2007) 164-175.
- [101] R. Kasemchaisiri, S. Tangtermsirikul. A method to determine water retainability of porous fine aggregate for design and quality control of fresh concrete. *Construction and Building Materials*. 21 (2007) 1322-1334.
- [102] W. Lijiu, Z. Shuzhong, Z. Guofan. Investigation of the mix ratio design of lightweight aggregate concrete. *Cement and Concrete Research*. 35 (2005) 931-935.
- [103] C. Ebbert, G. Grundmeier, N. Buitkamp, A. Kroger, F. Messerschmidt, P. Thissen. Toward a microscopic understanding of the calcium-silicate-hydrates/water interface. *Applied Surface Science*. 290 (2014) 207-214.
- [104] L.K. Aggarwal, J. Singh. Effect of plant fibre extractives on properties of cement. *Cement & Concrete Composites*. 12 (1990) 103-108.
- [105] H. Savastano, V. Agopyan, A. M. Nolasco, L. Pimentel. Plant fibre reinforced cement components for roofing. *Construction and Building Materials*. 13 (1999) 433-438.
- [106] V.M. John, M.A. Cincotto, C. Sjostrom, V. Agopyan, C.T.A. Oliveira. Durability of slag mortar reinforced with coconut fibre. *Cement & Concrete Composites*. 27 (2005) 565-574.
- [107] O. Yazoghli. Contribution à la valorisation des emballages alimentaires de post-consommation en polyéthylène terephthalate et en polyéthylène haute densité dans des matrices cimentaires. Etude de faisabilité et évaluation des performances physico-mécaniques, hydriques et thermiques. Thèse de doctorat, Université de Picardie Jules Verne (2005).
-

- [108] R.D. Tolédo Filho, K. Scrivener, G.L. England, K. Ghavami. Durability of alkali-sensitive sisal and coconut fibres in cement mortar composites. *Cement & Concrete Composites*. 22 (2000) 127-143.
- [109] B.J. Mohr, H. Nanko, K.E. Kurtis. Durability of kraft fiber-cement composites to wet/dry cycling. *Cement & Concrete Composites*. 27 (2005) 435-448.
- [110] B.J. Mohr, J.J. Biernacki, K.E. Kurtis. Microstructural and chemical effects of wet/dry cycling on pulp fiber-cement composites. *Cement and Concrete Research*. 36 (2006) 1240-1251.
- [111] E. Kruger, B. Givoni. Thermal monitoring and indoor temperature predictions in a passive solar building in an arid environment. *Building and Environment*. 43 (2008) 1792-1804.
- [112] S. Mazouz, *Elements de conception architecturale*. Office des publications universitaires. 07-2004 Alger.
- [113] X. Jin, X. Zhang, Y. Cao, G. Wang. Thermal performance evaluation of the wall using heat flux time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*. 47 (2012) 369-374.
- [114] H. Bencheikh. Étude et réalisation d'un système de refroidissement utilisant une toiture radio-évaporative en climat aride. Thèse de doctorat E-Science, université de Constantine, 2007.
- [115] N. Fumo, P. Mago, R. Luck. Methodology to estimate building energy consumption using EnergyPlus Benchmark Models. *Energy and Buildings*. 42 (2010) 2331-2337.
- [116] E. Erell, Y. Etzion. A radiative cooling system using water as a heat exchange medium. *Architectural science Review*. 35 (1992) 39-49.
- [117] Y. Zhang, K. Lin, Q. Zhang, H. Di. Ideal thermophysical properties for free-cooling (or heating) buildings with constant thermal physical property material. *Energy and buildings*. 38 (2006) 1164-1170.
- [118] K.S. Al-Jabri, A.W. Hago, A.S. Al-Nuaimi, A.H. Al-Saidy. Concrete blocks for thermal insulation in hot climate. *Cement and Concrete Research*. 35 (2005) 1472-1479.
- [119] B. Belhadj, H. Bencheikh, M.M. Khenfer, L'effet d'allégement des bétons de sables par copeaux de bois sur le temps de retard et le facteur d'amortissement. *Biskra, architecture and sustainability international conference'2011, Architecture and urban design aspects and future prospects*. Proceeding 542-552, December 4-5, 2011, Algeria.
- [120] Hamida Ben Cheikh¹, Belhadj Belkacem¹, Khenfer Med Mouldi¹. The effect of alleviating the sand concrete by wood shavings on wall time lag and decrement factor. *Civil and Environmental Research*, Vol.5 (2013) 16-20. Special Issue for International Congress on Materials & Structural Stability, Rabat, Morocco, 27-30 November 2013.
- [121] K.J. Kontoleon, E.A. Eumorfopoulou, The influence of wall orientation and exterior surface solar absorptivity on time lag and decrement factor in the Greek region. *Renewable Energy*. 33 (2008) 1652-1664.
- [122] C. Sun, S. Shu, G. Ding, X. Zhang, X. Hu. Investigation of time lags and decrement factors for different building outside temperatures. *Energy and Buildings* 61 (2013) 1-7.
-

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXE (I)

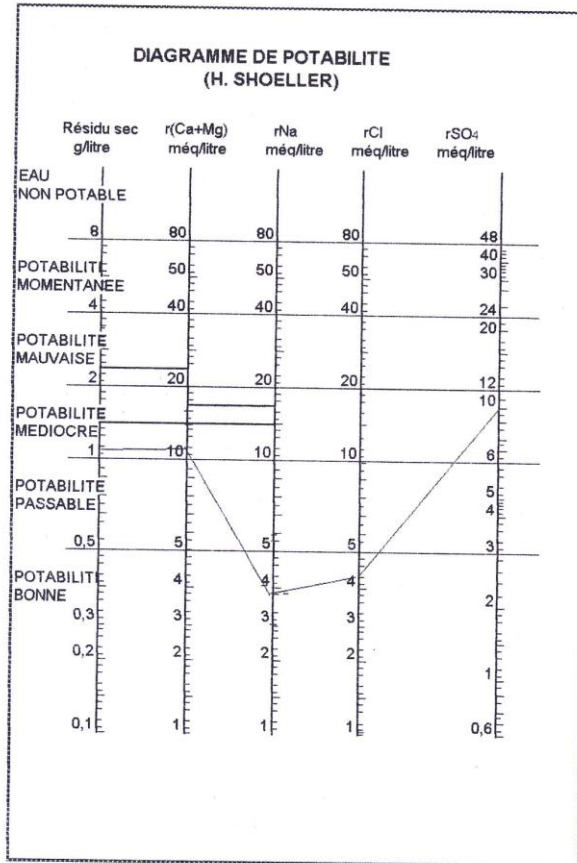
L'analyse physico-chimique de l'eau de gâchage est faite au laboratoire de l'EPDEMIAS de Laghouat dont les résultats sont présentés ci-dessous.

RESULTATS DE L'ANALYSE DE L'EAU

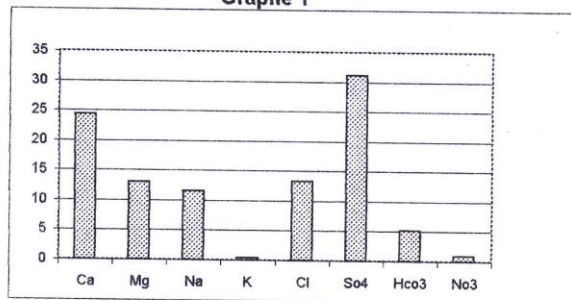
Origine	Eau robinet	/	/	Bactériologie	
Date de prélèvement	07.08.2006	T°C	/	N° des germes totaux	
Date d'envoi	07.08.2006	N° Echant	812	Coliformes	
Ca en mg/litre (Calcium)	156	Balance cations mé/l 15,89	7,8	Escherichia coli	
Mg en mg/litre (Magnésium)	51		4,1	Streptocoques fécaux	
Na en mg/litre (sodium)	86		3,74	Sulfito-réducteurs	
K en mg/litre (Potassium)	6		0,4	Bactériophage fécaux	
Cl en mg/litre (Chlorures)	151,7	Balance anions mé/l 16,21	4,28	Autres germes	
SO4 en mg/litre (Sulfates)	480		10	Turbidité en NTU	
CO3 en mg/litre (Carbonate)				1,2	
HCO3 en mg/litre (Bicarbonat)	100,7		1,65		
NO3 en mg/litre (Nitrates)	17,5		0,28		
Conductivité En 1/10 ms/cm à 25°C	16,79	Minéralisation 1140 mg/l		TDS en mg/litre	838
				Salinité ‰	0,8
Résidu sec à 180°C	1175 mg/l	Somme des ions 1049 mg/l		TEST CHLORE en mg/l	< 0,02
				Couleur 436 nm	2,3 m-1
T.H T.A.C	T.A	S.A.F	I.S	T=30,8°C PH=7,5	
60°F 8,25°F	/	39,7°F	71,4°F	RSA=1,52	
Nitrite NO2		Eléments Toxiques ou Indésirables Mg/litre	Chrome		
Ammonium NH4			Cu comb		
Indice de KMnO4			Cu total		
CO2 total			Zinc		
Pourcentage de saturation en O2 %			Mn		
Oxygène dissous O2	9,4 mg/l		Aluminium		
Phosphate PO4			Ozone		
MES en mg/litre			Iode	0,35	
Fer dissous	Mg/l		Brome	> 0,25	
PH (Laboratoire)	7,5		SiO2dissoute	3,7	
			H2S		
GRAPHIQUE 2 mé/litre %					
Cations	Ca=24,3%	Mg=13,06%	Na=11,63%	K=0,46%	Faciès de l'eau
Anions	Cl=13,35%	SO4=31,1%	HCO4=5,13%	NO3=0,87%	Sulfatée-Calcique
INTERPRETATION DE L'ANALYSE		POTABILITE CHIMIQUE : PASSABLE			

ANNEXE (I)

D'après la norme Algérienne, les résultats obtenus de l'analyse de l'eau confirme sa potabilité, et cela comme le montre les graphes ci-dessous.



Graphe 1



Graphe 2

ANNEXE (II)

PROCESSUS D'INTRODUCTION DES DONNEES



EnergyPlus lit le dictionnaire des données (Energy+IDD) et les données d'entrée (IDF). Les données d'entrée au programme sont :

a. Energy+IDD : le dictionnaire des données de l'entrée (IDD) est un dossier qui contient une liste d'EnergyPlus avec spécification des données de chaque objet exigé.

b. IDF : dossier de données de l'entrée (IDF) est un dossier qui contient les données qui décrivent le bâtiment.

Les données pour le logiciel peuvent être introduites suivant deux formats :

L'Éditeur IDF (**Figure 1**) : est un composant facultatif de l'installation EnergyPlus. Pour les utilisateurs qui veulent créer ou éditer EnergyPlus. L'Éditeur IDF est un éditeur très simple qui lit l'IDD et IDF, il autorise la création ou la révision de dossiers IDF. Il peut être accessible d'un raccourci dans le principal répertoire l'EnergyPlus ou directement de EP - Launch (**Figure 2**). L'Editeur texte (**Figure 3**) : les éditeurs du texte, tels que les bloc-notes, peuvent être aussi utilisés pour éditer un dossier IDF. Ne pas utiliser les étiquettes et les caractères spéciaux dans l'IDF. Les données à introduire sont les suivantes :

- Le bâtiment (nom du bâtiment, orientation et localisation du site).
- Situation du projet (faisceau horaire, latitude, longitude et altitude).
- Conditions climatiques (température, vitesse et direction du vent, pression barométrique et aspect du ciel).
- Les propriétés thermo-physiques des matériaux (épaisseur, conductivité thermique, masse volumique et chaleur spécifique).
- zone (nom, orientation et coordonnées du point de repère).
- Les coordonnées de toutes les faces de l'enveloppe ainsi que les ouvertures.

EnergyPlus consiste juste en un dossier exécutable, il a besoin de plusieurs fichiers d'entrée qui décrivent le bâtiment à modéliser et son environnement. Le programme produit plusieurs fichiers de sortie. Les résultats peuvent être obtenus à différentes zones durant la durée de la simulation avec la possibilité de varier l'intervalle de temps.

ANNEXE (II)

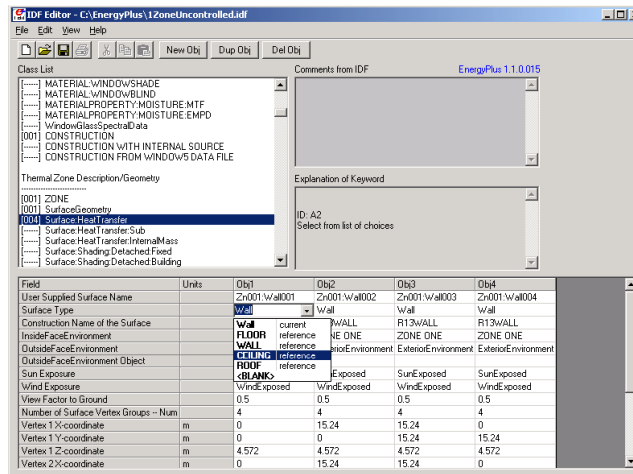


Figure 1 : Éditeur IDF

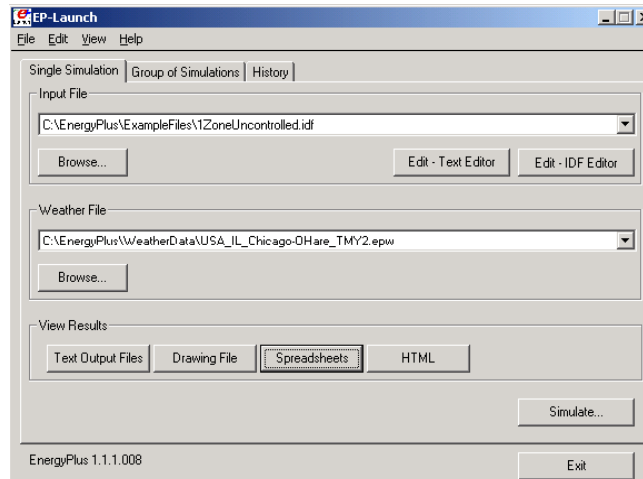


Figure 2 : EP-Launch

Location,	
Laghout,	!- Location Name
33.8,	!- Latitude {deg}
2.87,	!- Longitude {deg}
1,	!- Time Zone {hr}
765;	!- Elevation {m}
Design Day Name	
Design Day,	
21 juillet,	!- Design Day Name
!	Max Dry-Bulb {C}
42.5	!- Maximum Dry-Bulb Temperature {C}
!	Daily Temp Range {C}
17.3	!- Daily Temperature Range {deltaC}
!	Wet-Bulb at Max {C}

Figure 03: Editeur de texte

ANNEXE (II)

Exemple de résultats de la simulation numérique à l'aide du logiciel « **EnergyPlus** » sont portés ci-dessous pour un mur à double paroi de 27 cm d'épaisseur dont la constitution de l'extérieur à l'intérieur est comme suit:

- Crépissage extérieur en mortier de ciment d'épaisseur de 1 cm.
- Paroi en BACP-35 d'épaisseur de 10 cm.
- Vide d'air ou lame d'air d'épaisseur de 5 cm.
- Paroi en BACP-35 d'épaisseur de 10 cm.
- Crépissage intérieur en enduit de plâtre d'épaisseur de 1 cm.

RESULTAT DE LA SIMULATION

Date/Time,WALL01:Surface Inside Temperature[C](TimeStep),WALL01:Surface Outside Temperature[C]

(TimeStep),DOOR:Surface Inside Temperature[C](TimeStep),DOOR:Surface Outside Temperature[C]

(TimeStep),WALL02:Surface Inside Temperature[C](TimeStep),WALL02:Surface Outside Temperature[C]

(TimeStep),WALL03:Surface Inside Temperature[C](TimeStep),WALL03:Surface Outside Temperature[C]

(TimeStep),WALL04:Surface Inside Temperature[C](TimeStep),WALL04:Surface Outside Temperature[C]

(TimeStep),FLOOR:Surface Inside Temperature[C](TimeStep),FLOOR:Surface Outside Temperature[C]

(TimeStep),ROOF:Surface Inside Temperature[C](TimeStep),ROOF:Surface Outside Temperature[C]

(TimeStep),ZN01:Mean Air Temperature[C](TimeStep)

07/21

01:00:00,33.2014491385868,30.7674698672744,33.3506133383423,30.9678286016878,33.6843170059161,31.0091877773674,33.1334171929605,30.8579980594535,34.3861303570841,32.5400487375307,25.3990248838403,18.0000000000000,34.0873788318690,33.0619557682123,32.0026175369550.

07/21

02:00:00,33.1851803255450,29.8254846821930,33.3275223339267,30.0079740091556,33.6240193289794,30.0387462381270,33.1346178437921,29.8941783840574,34.3672321280203,31.2869538335124,25.4151988924878,18.0000000000000,33.8211554425474,31.5186002403275,31.9777057125581.

07/21

03:00:00,33.1142253127684,28.9957624572370,33.2491731413834,29.1626465825984,33.5125345799986,29.1844750212378,33.0769822992713,29.0481419124657,34.2668352339353,30.2104643503593,25.3987431287469,18.0000000000000,33.5137404837800,30.2007304742038,31.8976029420656.

07/21

04:00:00,32.9952572340710,28.2912799319401,33.1225676670822,28.4440124391286,33.3564003964275,28.4586953050274,32.9680787826632,28.3313280177480,34.1004817072078,29.3084455395236,25.3532773005247,18.0000000000000,33.1789352126911,29.0993740495052,31.7705253039831.

07/21

05:00:00,32.8349354246322,27.7893081072533,32.9545980272388,27.9276046734211,33.1621024418824,27.9381575398834,32.8153236461390,27.8199924471133,33.8815579687159,28.6471390080865,25.2828476722175,18.0000000000000,32.8265076073823,28.2782546193270,31.6041780302713.

07/21

06:00:00,32.6395947800437,27.5906401376018,32.7517555663342,27.7124832608393,32.9357797576213,27.7232356624392,32.6256504656278,27.6141995589441,33.6213338597034,28.3190166895063,25.1912551185126,18.0000000000000,32.4633153212332,27.8303549368283,31.4054613894596.

07/21

07:00:00,32.4162385750047,28.0142950484836,32.5211368063058,28.1661955316643,32.6842388588139,31.6925203305431,32.4065273328548,29.1307296975026,33.3303469116369,28.6817271024000,25.0826737554016,18.0000000000000,32.0962804707524,29.0054317436966,31.1814884253887.

07/21

08:00:00,32.1726284406415,29.2460106484245,32.2705692444200,29.4607614004607,32.4168956057842,38.6438517415993,32.1666396111516,31.0458699401483,33.0188637125496,29.9013813204823,24.9611255602788,18.0000000000000,31.7336897997964,33.6744432219138,30.9402230877478.

07/21

09:00:00,31.9198678167656,31.0174524470097,32.0113358516672,31.2807075947342,32.1574233844660,43.8466945709123,31.9207356052156,32.1202569776577,32.6998444662902,31.6620797098577,24.8320700361041,18.0000000000000,31.3947203591173,40.2498431305138,30.6950783018904.

07/21

10:00:00,31.6743257629673,33.8790623425606,31.7601392397929,34.3876313028451,31.9458518164764,46.4342184641546,31.6888625409191,33.7597674553327,32.3910868476900,33.6873322261485,24.7038641587894,18.0000000000000,31.1177942656278,47.3248097525948,30.4669912370372.

07/21

11:00:00,31.4564796326326,37.2448580418226,31.5378605860733,38.0610178414135,31.8183148396080,47.2092533251719,31.4892050544266,35.8178390337699,32.1136089188912,35.8540708328840,24.5874380398147,18.0000000000000,30.9501720019623,54.2810015276329,30.2785853298827.

07/21

12:00:00,31.2879408553685,40.4543806623490,31.3669605071202,41.5331700918391,31.7881163709168,46.3672566568055,31.3355870394030,37.9109879307424,31.8866351607706,37.9836398860722,24.4931464109554,18.0000000000000,30.9265303691474,60.4555377841159,30.1467879140896.

07/21

13:00:00,31.1891555669078,43.0054894206647,31.2691364301254,44.2537197909678,31.8470607321640,44.4055859053537,31.2401239487888,39.7525148170206,31.7254607514408,40.1311912635766,24.4296658445493,18.0000000000000,31.0609695232759,65.2067933378870,30.0817236447147.

07/21

14:00:00,31.1731586802827,44.6880751818540,31.2583441354065,45.9902205348564,31.9724744287196,44.5104967729650,31.2106035639173,41.2813084650262,31.6386425406771,44.9834346254549,24.4013182578291,18.0000000000000,31.3432620486763,68.1704716900166,30.0854305211319.

07/21

15:00:00,31.2439913439043,45.2766185876047,31.3386776785198,46.4949333245879,32.1385218985295,44.7805460660082,31.2503289827375,42.3090967694951,31.6313614706240,50.1094811498012,24.4097050332676,18.0000000000000,31.7466044790178,69.0721530126403,30.1545776916461.

07/21

16:00:00,31.3953769154377,44.5801915021066,31.5029599176633,45.5631482292150,32.3277933267584,44.5412705036627,31.3567716719183,42.5706526393862,31.7118779513038,54.5575666075400,24.4532444133322,18.0000000000000,32.2315123216769,67.7530485339553,30.2836116186014.

07/21

17:00:00,31.6131890186463,43.2063955684479,31.7353583522025,43.9419820619861,32.5342027107337,43.8146819507990,31.5230682164031,42.7458593682862,31.8913556671217,57.3888269518349,24.5290866238853,18.0000000000000,32.7540017624296,64.3936462539209,30.4668301261999.

07/21

18:00:00,31.8764478926132,41.7274119540494,32.0126721595387,42.3546573754969,32.7538082732621,42.4280541148474,31.7375310510238,43.2147502047775,32.1734268168551,57.9628162588734,24.6326211269096,18.0000000000000,33.2681849372739,59.2279256472045,30.6951454865528.

07/21

19:00:00,32.1614541312679,39.8744147921983,32.3091796388564,40.4161750840537,32.9799329716949,40.5270305351050,31.9865614357991,42.7120022876204,32.5479478470100,54.7753353485992,24.7578379159409,18.0000000000000,33.7309424904713,52.7846841079010,30.9552205303900.

07/21

20:00:00,32.4457731066395,37.6100644929412,32.6014613246236,38.0010844514228,33.2015095137907,38.1116940145719,32.2569426621804,38.5265597927404,32.9879831788073,44.7859070655851,24.8968699500447,18.0000000000000,34.1043885129934,46.4318344022319,31.2299141986925.

07/21

21:00:00,32.7092052259513,35.8702001053828,32.8692853950017,36.1925881480657,33.4036217041606,36.2900334544072,32.5318956200526,36.2858762855329,33.4466603106167,40.5044373879017,25.0398938501062,18.0000000000000,34.3585379814564,42.5212753036445,31.4974533076821.

07/21

22:00:00,32.9326368000514,34.3138802512105,33.0937645122552,34.5942273329966,33.5688497432431,34.6749244256726,32.7831508114932,34.5569029847991,33.8569684664630,37.7452810163955,25.1748130098548,18.0000000000000,34.4761199673975,39.4388909245663,31.7300341493830.

07/21

23:00:00,33.1009936776735,32.9470144363693,33.2602266879432,33.1959269766115,33.6824626416690,33.2610670282854,32.9827228647836,33.1123706060555,34.1658373548039,35.6411481180312,25.2889955060031,18.0000000000000,34.4614404362876,36.9031380516028,31.9039169322944.

07/21

24:00:00,33.2068655016159,31.7856614406182,33.3619047510178,32.0083612417149,33.7371418372870,32.0605623738150,33.1163736149846,31.9063039164060,34.3561258027853,33.9560629000290,25.3733872452551,18.0000000000000,34.3369112705486,34.8167196614322,32.0089419266165.
