

## Université Amar Telidji - Laghouat



Faculté d'Architecture et de Génie civil

Thèse de doctorat troisième cycle D-LMD

Spécialité : Matériaux et Analyse de Structures

Présentée par :

**LAOUBI Hamza**

**THÈME**

**Étude du comportement thermo-mécanique et durabilité d'un  
béton à base de plâtre allégé par des granulats de polystyrène**

Soutenue publiquement le : 18 Février 2021

**JURY :**

Monsieur	<b>T. BOUZIANI</b>	<b>Président du jury</b>	Professeur	U.A.T. Laghouat
Monsieur	<b>M. BEDERINA</b>	<b>Rapporteur</b>	Professeur	U.A.T. Laghouat
Mademoiselle	<b>A. DJOUDI</b>	<b>Co-rapporteur</b>	M.C.B	U.A.T. Laghouat
Monsieur	<b>M. BEDDAR</b>	<b>Examineur</b>	Professeur	U.de M'sila
Monsieur	<b>A. MEDDAH</b>	<b>Examineur</b>	M.C.A	U.de M'sila
Monsieur	<b>B. BELHADJ</b>	<b>Examineur</b>	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 Mademoiselle **DJOUDI Amina**, maitre de conférences à l'université de Laghouat, pour leur suivi et leurs nombreux conseils.

Je tiens à remercier le Professeur **BOUZIANI Tayeb**, Professeur à l'université 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 : **M. BEDDAR**, Professeur à l'université de M'sila, **A. MEDDAH**, Maître de conférences à l'université de M'sila, **B. BELHADJ**, Maître de conférences à l'université de Laghouat.

Je remercie tous les enseignants du département de génie-civil de l'université Amar TELIDJI de Laghouat, plus particulièrement messieurs : **Z. Makhloufi et A. Zaidi et A. Farhat**. Je remercie profondément les ingénieurs du laboratoire de génie civil **B. Mokdad et M. Brahim** ainsi que toute personne ayant contribué de près ou de loin dans l'élaboration de ce modeste travail.

Je remercie encore une fois monsieur **B. BELHADJ** pour leur contribution et leur aide dans la partie simulation.

Mes remerciements vont également à tous mes collègues et en particulier à **M. Sahraoui, Y. Ouldkhaoua, Z. Laidani, et M. Chenafi**.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour leur soutien moral et leur aide, ainsi que tous qui m'ont soutenu et aidé tout le long de ce travail.

## DEDICACES

À mes très chers parents.

À ma femme qui m'a toujours soutenu et aidé.

À ma fille Maria et mon fils ouais.

À mes frères et sœurs.

À ma grande famille.

À tous mes amis.

# SOMMAIRE

RESUMES

NOMENCLATURE

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION

GENERALE.....1

## CHAPITRE I:

### GENERALITES ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

I.1. Économie D'energie Lors De La Phase D'utilisation Des Batiments.....	5
I.2. Gypse.....	6
1) La Pierre A Platre.....	6
2) Gisement De Gypse .....	7
I.3.Platre .....	8
I.3.1. Structure Cristalline Du Semihydrate .....	10
I.3.2. Microstructure Du Platre.....	10
I.3.3. Comportements Du Platre.....	11
I.4. Mortier De Platre .....	14
I.5.Beton De Platre .....	16
I.6. Domaine D'application Des Elements A Base De Platre .....	19
I.7.Reglementations Du Platre En Algerie .....	20
I.8. Coût.....	21
Ii. Generalites Sur Les Betons Legers .....	21
Ii.1. Proprietes Des Betons Legers .....	22
Ii.2. Les Betons De Polystyrene : .....	23
Ii.2.1. Billes De Polystyrene Expanse .....	24
Ii.2.2. Proprietes Du Polystyrene.....	24
Ii.3. Caracteristiques Physico-Mecaniques Des Betons De Polystyrene :.....	26
Iii. Etude Bibliographique Sur Les Materiaux Composites A Base De Platre .....	26
Iii.1. Études Sur L'incorporation Des Additions Dans Des Composites De Platre .....	27
A) L'augmentation De La Résistance : .....	27
B) L'amélioration Du Comportement Thermique:.....	28
B) La Réduction De La Densité .....	29
Iii.2. Études Sur L'utilisation De Polystyrène Expanse Dans Des Composés De Plâtre.....	32
Iii.3. Necessite D'optimiser Le Platre En Tant Que Materiau De Construction Actuel .....	34
Iv. Bilan Thermique Du Bâtiment .....	34
Iv.1. Strategie Bioclimatique Dans Les Milieux Arides .....	35
Iv.3. Methodes D'évaluation De La Performance Thermique Du Bati.....	36
Conclusion .....	36

**CHAPITRE II :**  
**MATÉRIAUX UTILISÉS ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES**

Introduction.....	38
I. Matieres Premieres .....	38
I.1. Platre .....	38
I.1.1. Caracteristiques Chimiques Et Mineralogiques .....	38
I.1.2. Proprietes Physiques .....	39
Caractéristiques Physiques .....	39
Caractéristiques De La Pâte Pure Du Plâtre Utilisé .....	39
I.1.3. Finesse De Mouture .....	39
I.2. Sable De Dune.....	41
I.2.1. Proprietes Physiques .....	41
I.3. Granulats De Polystyrene Expanse .....	42
I.4. Chaux .....	44
I. 4. Eau De Gachage .....	46
II. Techniques De Mesure Experimentales.....	46
II. 1. 1. Proprietes Mecaniques Des Composites .....	47
II. 1. 1.1. Traction Par Flexion.....	47
II. 1. 1. 2. Essai De Compression.....	47
II.2. Porosite : .....	48
II. 3. Caracterisation Thermo-Physiques .....	50
II. 4. Analyse De La Microstructure .....	51
II.4.1. Imagerie Optique.....	51
II.4.2. Analyse Par Microscope Electronique A Balayage Et Par Spectroscopie A Rayons X A Dispersion D'energie .....	52
II.5. Formulation Des Betons De Platre Allege Par Des Granulats De Polystyrene Expanse..	52
III. Conclusion .....	55

**CHAPITRE III :**  
**RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET ANALYSE**

Introduction .....	56
I. Resultats Experimentaux Et Analyse .....	56
I.1. Densite.....	56
I.2. Porosite.....	58
I.3. Résistance Mécanique .....	59
I.3.1. Résistance A La Flexion Et La Compression.....	59
I.4. Etude Des Proprietes Thermique.....	62
I.4.1. Conductivite Thermique.....	63
I.4.2. Diffusivite Thermique .....	64
I.4.3. Chaleur Specifique .....	65
I.4.4. Effusivite Thermique.....	66
I.5. Modelisation De La Conductivite Thermique Des Composites Etudies.....	67
I.5.1. Modeles Par Homogeneisation Autocohérente (Hac) .....	68
I.5.2. Comparaison Entre Les Mesures Experimentales Et Les Mesures Predites Par L'approche Hac ..	71
I.6. Aspect Et Structure Generale .....	72
II.Etude De La Durabilite Des Betons De Platre Alleges Par Les Granulats De Polystyrene Expanse ...	73
II.1. Influence Des Différents Milieux Hygrometriques Sur Les Proprietes Mécaniques Des Bétons De Platre Leger En Fonction Du Temps .....	74
III.1.1. Résistance A La Compression .....	74
II.1.2. Résistance A La Traction Par Flexion.....	75
II.1.3. Analyse Par Microscopie Electronique A Balayage .....	76
II.2.1. Aspect General Des Echantillons.....	80
II.2.2. Proprietes Mecaniques .....	82
II.2.3. Changements De Masse .....	83
II.2.4. Analyse Par Microscope Optique.....	84
II.2.5. Analyse Par Microscopie Electronique A Balayage .....	86
III. Potentiel D'utilisation Des Betons De Platre Legers.....	91
IV. Conclusion.....	91

**CHAPITRE IV :**  
**SIMULATION NUMERIQUE DU**  
**COMPORTEMENT THERMO-PHYSIQUE DES**  
**MURS EXTERIEURS EN MILIEU ARIDE**

Introduction.....	93
I. Caracteristiques climatiques de la ville de laghouat.....	93
II. Transfert de chaleur et le confort thermique .....	96
II.1. Simulation numerique .....	97
II.1.1. Objectifs de la simulation.....	97
II.2. Proprietes thermo-physiques du mur.....	97
II.3. Temps de retard et facteur d’amortissement .....	97
II.3.1. Temperatures de surfaces du mur.....	99
II.4. Methode de simulation .....	100
III. esultats de la simulation .....	102
III.1. Effet de l’épaisseur de la couche ajoutee au mur (mur oriente sud) .....	102
III.2. Recommandation de cette technique constructive .....	109
IV. uantification des gains énergétiques .....	110
IV. 1. Demande energetique mensuelle de chauffage et de refroidissement. ....	112
IV.2. Consommation energetique annuelle totale du batiment .....	114
V. Conclusion .....	115
 <b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	 <b>116</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	
<b>ANNEXES</b>	

---

# RÉSUMÉS

---

## RÉSUMÉ

L'un des secteurs qui consomment le plus d'énergie en Algérie est le résidentiel, en particulier avec la demande de chauffage et de refroidissement des bâtiments.

D'un point de vue technique, pour réduire la consommation d'énergie durant le chauffage et le refroidissement, l'une des alternatives les plus notables est l'amélioration du comportement thermique de l'enveloppe. Pour cela une réflexion sur la formulation d'un béton de plâtre léger isolant à base de billes de polystyrène expansé, qui est connu par sa faible conductivité thermique, a été menée.

Une étude des propriétés physico-mécaniques et thermique des composites de plâtre allégé par des billes de polystyrènes expansé a été faite, tout en étudiant leur durabilité dans différents milieux hygroscopiques, tels que l'air et l'humidité, en les exposant aux cycles de séchage – humidification. Les échantillons ont été également exposés à différents milieux chimiques pour évaluer la résistance du matériau aux attaques des acides et aux agressions de sulfate.

Les résultats obtenus révèlent bien l'intérêt remarquable du caractère d'allègement des granulats de polystyrène, notamment, dans l'amélioration des performances thermiques des bétons élaborés. Cependant, on a enregistré une chute considérable de la résistance mécanique en fonction du dosage en PSE. Une baisse des propriétés mécaniques a également été observée à long terme dans les différents milieux étudiés.

Par ailleurs, une étude théorique par simulation numérique a porté sur la faisabilité de l'intégration de ce composite "plâtre et billes de polystyrènes expansé (BPSE)", dans la réhabilitation des anciennes constructions de la région de Laghouat, qui se caractérise par un climat aride, chaud en été et froid en hivers. L'effet de l'ajout du matériau isolant proposé aux différents murs extérieurs, l'effet de l'orientation de ces murs, ainsi que l'effet de l'ajout de lame d'air, ont été également étudiés.

**Mots clés :** béton de plâtre ; polystyrène expansé, propriétés thermiques, durabilité, simulation ; réhabilitation ; granulats légers

## ABSTRACT

One of the sectors that consumes the most energy in Algeria is the residential sector, in particular with the demand for heating and cooling of buildings.

From a technical point of view, to reduce the consumption of heating and cooling, one of the most notable alternatives is the improvement of the thermal behavior of the envelope. For this, a reflection on the formulation of a lightweight insulating plaster concrete based on expanded polystyrene beads, which is known by its low thermal conductivity, has been led.

A study of the physico-mechanical and thermal properties of plaster composites lightened by expanded polystyrene beads has been made, while studying their durability in different hygroscopic environments, such as air and humidity and also exposing them to ‘‘drying – humidification’’ cycles. Different chemical environments, to measure the material's resistance to acid attacks and sulphate attacks, have been also studied.

The results obtained show the remarkable benefit of the lightening nature of polystyrene aggregates, in particular in improving the thermal performance of the concretes produced. On the other hand, a considerable drop in mechanical strength was recorded as a function of the EPS dosage; a decrease, in long-term mechanical properties in different environments, has been recorded.

Moreover, a theoretical study, by numerical simulation, concerns the feasibility of integrating this composite of plaster and expanded polystyrene beads (BPSE), in the rehabilitation of old buildings in the region of Laghouat, which is characterized by an arid climate, hot in summer and cold in winter. The effect of adding the proposed insulation material to the various exterior walls, the effect of the orientation of these walls and the effect of adding an air gap have been studied.

**Keywords:** plaster concrete; expanded polystyrene, thermal properties, durability, simulation, rehabilitation. lightweight aggregates

## ملخص

من القطاعات الأكثر استهلاكاً للطاقة في الجزائر القطاع السكني، ولا سيما مع الطلب على التدفئة وتبريد المباني. من الناحية التقنية وللحد من استهلاك التدفئة والتبريد للطاقة، فإن أحد أبرز البدائل هو تحسين السلوك الحراري للغلاف الخارجي للبناء. لهذا اتجه الباحثون إلى التفكير في إعداد خرسانة الجص خفيفة الوزن، العازلة حرارياً والمكونة من حبيبات البولسترين المنفوخة والمعروفة بناقليتها الضعيفة للحرارة.

في هذا العمل نقوم بدراسة الخصائص الفيزيائية الميكانيكية والحرارية لمركبات الجص التي تم تخفيفها بواسطة حبيبات البولسترين المنفوخة وأيضاً دراسة مقاومتها في بيئات إستراتيجية مختلفة، مثل الهواء والرطوبة وأيضاً بتعريضها لدورات التجفيف- الترطيب. وفي أوساط كيميائية مختلفة لتقييم مقاومة المادة للهجمات الحمضية وهجمات الكبريتات. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها تحسن الأداء الحراري للخرسانة المنتجة وفي المقابل تم تسجيل انخفاض كبير في المقاومة الميكانيكية مع زيادة نسبة حبيبات البولسترين ولاحظنا أيضاً انخفاض مقاومة المادة على المدى الطويل في الأوساط المختلفة المدروسة.

و قد تم إجراء دراسة نظرية بالمحاكاة العددية و وجدنا إمكانية دمج هذا المركب من الجص وحبيبات البولسترين المنفوخ (BPSE) في إعادة تأهيل المباني القديمة في منطقة الأغواط التي تتميز بمناخ حار جاف في الصيف وجو بارد في الشتاء. قمنا بدراسة تأثير إضافة مادة العزل المقترحة إلى الجدران الخارجية المختلفة وكذلك تأثير اتجاه الجدار وإضافة فراغ هوائي بين طبقات الجدار على تغير وقت التأخير ( $\Phi$ ) و معامل التخميد (f)

يمكن الاستنتاج أنه عند سماكة الطبقة المضافة، بدون ومع فراغ هوائي، يزداد وقت التأخير ( $\Phi$ ) ويقل عامل التخميد (f) وهذا يعني أن المقاومة الحرارية للجدار تزداد. المحاكاة تبين أن دمج هاته المادة في المنشأة المحلية له تأثير مفيد في خلق الراحة الحرارية وترشيد استهلاك الطاقة مما يؤثر إيجاباً على البيئة طيلة دورة الحياة للبناء.

**الكلمات الرئيسية:** خرسانة الجص؛ البولسترين المنفوخ، الخصائص الحرارية، الديمومة، المحاكاة، إعادة التأهيل، الحبيبات الخفيفة

## NOMENCLATURE

<b>E/P</b>	: Eau totale / Plâtre
<b>Q</b>	: Densité de flux de chaleur ( $W/m^2$ ).
<b><math>\lambda</math></b>	: Conductivité thermique ( $W/mK$ ).
<b>grad T</b>	: Gradient de température.
<b>a</b>	: Diffusivité thermique ( $m^2/s$ ).
<b><math>\rho</math></b>	: Masse volumique du matériau ( $kg/m^3$ ).
<b>cp</b>	: Chaleur spécifique massique ( $J/kgK$ ).
<b>S</b>	: Sable
<b><math>\gamma</math></b>	: Masse volumique apparente du sable ( $kg/m^3$ ).
<b><math>\gamma_s</math></b>	: Masse volumique absolu du sable ( $kg/m^3$ ).
<b>MF</b>	: Module de finesse.
<b>ESv</b>	: Equivalent de sable visuel.
<b>ESp</b>	: Equivalent de sable au piston.
<b>Cp</b>	: Compacité.
<b><math>C_{ab}</math></b>	: Coefficient d'absorption d'eau (%).
<b>BP 3.15</b>	: Béton allégé par les billes de polystyrène expansé avec un diamètre de 3.15 mm.
<b>BP 4</b>	: Béton allégé par les billes de polystyrène expansé avec un diamètre de 4 mm.
<b>BP5-7</b>	: Béton allégé par les billes de polystyrène expansé avec un classe de 5-7 mm.
<b>Tse</b>	: Température de la surface extérieure du mur ( $^{\circ}C$ ).
<b>Tsi</b>	: Température de la surface intérieure du mur ( $^{\circ}C$ ).
<b><math>\Phi</math></b>	: Temps de retard (h).
<b>f</b>	: Facteur d'amortissement.
<b><math>T_{Tse(max)}</math></b>	: Temps auquel la température de surface extérieure du mur est maximale.
<b><math>T_{Tsi(max)}</math> . . . .</b>	: Temps auquel la température de surface intérieure du mur est maximale.

# LISTE DES TABLEAUX

# **LISTE DES TABLEAUX**

## **CHAPITRE I :**

### **GENERALITES ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE**

Tab I. 1. Classification de la pierre a plâtre.....	6
Tab I. 2. Quelques exploitations de gypse en Algérie.....	7
Tab I. 3. Caractéristiques du système CaSO <sub>4</sub> et ses hydrates .....	9
Tab I. 4. Caractéristiques thermiques du plâtre.....	13
Tab I. 5. Normes algériennes sur les plâtres.....	20
Tab I. 6. Valeurs de la résistance en compression du PSE en fonction de sa densité .....	25
Tab I. 7. Conductivité thermique des bétons de polystyrène.....	25

## **CHAPITRE II :**

### **MATÉRIAUX UTILISÉS ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES**

Tab II. 1. Analyse chimique du plâtre utilisé.....	37
Tab II. 2. Propriétés physiques du plâtre utilisé.....	37
Tab II. 3. Finesse des plâtres de construction.....	38
Tab II. 4. Finesse de mouture du plâtre.....	38
Tab II. 5. Propriétés physiques de sable de dune .....	39
Tab II. 6. Propriétés physiques des granulats de polystyrène.....	42
Tab II. 7. Analyse minéralogique et chimique de la chaux utilisée.....	42
Tab II. 8. Propriétés de la chaux utilisée .....	43
Tab II. 9. Principaux paramètres des composés de plâtre allégé obtenus à partir de la recherche documentaire .....	51

## **CHAPITRE IV :**

### **SIMULATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT THERMO- PHYSIQUE DES MURS EXTERIEURS EN MILIEU ARIDE**

Tab. IV. 1. Propriétés thermo-physiques des matériaux de construction .....	101
Tab. IV. 2. Temps de retard et facteur d'amortissement pour les différentes épaisseurs des murs étudié.....	104
Tab. IV. 3. Temps de retard et facteur d'amortissement des murs (à une seule paroi et double paroi) avec et sans lame d'air orientés vers le 'Sud' .....	110

# LISTE DES FIGURES

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I : GENERALITES ET SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Fig. I. 1. Repartition de la consommation energetique finale par secteur.....	4
Fig. I. 2 morphologie du cristal de gypse.....	7
Fig. I. 3. Structure cristalline du gypse d'apres de jong et bouman .....	7
Fig. I. 4 structure atomique du semihydrate sur le plan (001) .....	10
Fig. I. 5. Images MEB (5m $\mu$ ) des plâtres : a-semihydrate $\alpha$ ; b-semihydrate $\beta$ . .....	10
Fig. I. 6. Enchevêtrement des cristaux du plâtre (image MEB - 20 $\mu$ m). .....	11
<b>Fig. I. 7.</b> Données expérimentales de reprise d'humidité d'une poutre de plâtre. ....	13
Fig. I. 8. Influence du rapport e/p sur les résistances mécaniques du mortier .....	15
Fig. I. 9. Influence du rapport s/p sur la résistance mécanique (a) en flexion ; (b) en Compression .....	15
Fig. I. 10. Conductivité thermique des différents mortiers de plâtre a différents temps de compactage. ....	16
Fig. I. 11. Variation de la maniabilité en fonction du rapport s/g pour le béton. ....	17
Fig. I. 12. Prototype avec mur en terre stabilisée et voutains en mortier de plâtre. ....	20
Fig. I. 13. Voutains en mortier de plâtre.....	20
Fig. I. 14. Détection de la température a l'intérieur et a l'extérieur du prototype avec une grande efficacité énergétique.....	20
Fig. I. 15. Conductivité thermique pour quelques bétons de granulats légers.....	23
Fig. I. 16. Image au meb montrant les billes de polystyrène dans une matrice de plâtre (g=180x) .....	25
Fig. I. 17. Représentation schématique du temps de retard et du facteur d'amortissement .....	36

## CHAPITRE II : MATÉRIAUX UTILISÉS ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES

Fig. II. 1. Diffractogramme de la poudre du plâtre utilisé.....	37
Fig. II. 2. Analyse granulométrique du sable de dune utilisé.....	39
Fig. II. 3. Diffratogramme aux rayons X du sable de dune. ....	40
Fig. II. 4. Aspect général d'une bille de polystyrène expansé.....	41
Fig. II. 5. Pycnomètre rempli d'eau + échantillon.....	41
Fig. II. 6.Schéma de la sonde TPS (mesure caractéristiques thermiques du polystyrène). ....	42
Fig. II. 7. Analyse chimique par DRX de la chaux hydraulique. ....	43
Fig. II. 8. Influence du pourcentage de la chaux sur le temps de prise du plâtre utilisé .....	44
Fig. II. 9. Dispositif de l'essai de Traction par Flexion.....	45
Fig. II. 10. Détail de l'essai de compression.....	46
Fig. II. 11. Instrument de mesure des propriétés thermo-physiques « Hot Disk TPS 500 » et la sonde. ....	49
Fig. II. 12. Imagerie optique et loupe binoculaire .....	50

**CHAPITRE III :**  
**RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET ANALYSE**

Fig. III. 1. Variation de la densité des composites étudiés en fonction de la teneur et du diamètre des billes en PSE.	57
Fig. III. 2. Variation de Porosité des composites étudiés en fonction de la teneur et du diamètre des billes de PSE.	58
Fig. III. 3. Relation masse volumique sèche et la porosité des composites étudiées.	59
Fig. III. 4. Variation de résistance à la flexion des composites étudiés en fonction de la teneur et du diamètre des billes en PSE.	60
Fig. III. 5. Variation de résistance à la compression des composites étudiés en fonction de la teneur et du diamètre des billes en PSE.	61
Fig. III. 6. Variation de résistance à la compression des composites étudiés en fonction de la densité.	62
Fig. III. 7. Variation de conductivités thermiques $\lambda$ en fonction du teneur et du diamètre des billes de polystyrène.	63
Fig. III. 8. Relation entre la conductivité et la densité des composites étudiés.	64
Fig. III. 9. Variation de diffusivité thermiques $a$ en fonction du pourcentage et du diamètre des billes de polystyrène.	65
Fig. III. 10. Variation de chaleur spécifique des composites étudiés en fonction de la teneur et du diamètre des billes en PSE.	66
Fig. III. 11. Variation de l'effusivité thermique des composites étudiés en fonction de la teneur et du diamètre des billes en PSE.	67
Fig. III. 12. Inclusion sphérique tri-composite représentant le béton de plâtre allégé par le polystyrène expansé.	68 Fig.
III. 13. Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités estimées par le modèle d'homogénéisation auto-cohérente pour composites BP3.15.	70
Fig. III. 14. Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités estimées par le modèle d'homogénéisation auto-cohérente pour les composites BP4.	71
Fig. III. 15. Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités estimées par le modèle d'homogénéisation auto-cohérente pour les composites BP5-7.	71
Fig. III. 16. Aspect et structure du composite de plâtre.	73
Fig. III. 17. Variation de la résistance à la compression dans le temps et dans différents milieux hygroscopiques : (a) mortier de plâtre seul - (b) mortier de plâtre-polystyrène.	75
Fig. III. 18. Variation de la résistance à la flexion dans le temps et dans différents milieux hygroscopiques : (a) mortier de plâtre, (b) mortier de plâtre allégé MP3.15.	76
Fig. III. 19. Mortier de plâtre : conservé 58 jours (28 jours à l'air au labo et 30 jours dans l'humidité).	77
Fig. III. 20. Mortier de plâtre après 15 cycles « séchage-humidification ».	79
Fig. III. 21. Aspect général du mortier de plâtre à base de PSE après immersion: (a) dans l'eau, (b) dans une solution acide, (c) dans une solution de sulfate.	81
Fig. III. 22. Propriétés mécaniques pour les mortiers de plâtre allégés par les granulats de polystyrène expansé conservés dans les différents milieux étudiés.	83
Fig. III. 23. La perte de masse pour les mortiers de plâtre allégés par les granulats de polystyrène expansé conservés dans les différents milieux.	84
Fig. III. 24. Visualisation au microscope vidéo d'un mortier de plâtre à base de PSE après immersion dans différentes solutions.	85
Fig. III. 25. Analyse SEM et EDX d'un mortier de plâtre à base de PSE après immersion dans l'eau.	87
Fig. III. 26. Analyse SEM et EDX d'un mortier de plâtre à base de PSE après immersion dans une solution acide.	88
Fig. III. 27. Analyse SEM et EDX d'un mortier de plâtre à base de PSE après immersion dans une solution de sulfate	90

**CHAPITRE IV :**  
**SIMULATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT THERMO-**  
**PHYSIQUE DES MURS EXTERIEURS EN MILIEU ARIDE**

Fig. IV. 1. Situation de la ville de Laghouat.....	94
Fig. IV. 2. Températures moyennes mensuelles de l'année 2018.....	94
Fig. IV. 3. Irradiation globale sur le plan horizontal.....	95
Fig. IV. 4. Schéma du transfert de chaleur dans un mur extérieur.....	96
Fig. IV. 5. Représentation schématique du temps de retard ( $\Phi$ ) et du facteur d'amortissement ( $f$ ).....	98
Fig. IV. 6. Les différents nœuds étudiés dans les couches de la paroi .....	99
Fig. IV. 7. Effet de l'épaisseur du mur 1 sur Tsi.....	102
Fig. IV. 8. Effet de l'épaisseur du mur 2 sur Tsi.....	103
Fig. IV. 9. Effet de l'épaisseur du mur 3 sur Tsi.....	103
Fig. IV. 10. Effet de l'épaisseur du mur 4 sur Tsi.....	104
Fig. IV. 11. Relation épaisseur des murs orientés 'Sud' et temps de retard.....	107
Fig. IV. 12. Relation entre l'épaisseur du mur et le facteur d'amortissement des différents murs étudiés.....	108
Fig. IV. 13. Relation entre le temps de retard et le facteur d'amortissement des différents murs étudiés.....	109
Fig. IV. 14. Effet de couche ajoutée sur le temps de retard pour différents types de murs orientés vers le 'Sud' .....	112
Fig. IV. 15. Effet de couche ajoutée sur le facteur d'amortissement pour différents types de murs orientés vers le 'Sud' .....	112
Fig. IV. 16. Vue en plan niveau 1.....	114
Fig. IV. 17. Vue en plan Rez-de-chaussée.....	115
Fig. IV. 18. Modèle 3D.....	115
Fig. IV. 19. Demande énergétique mensuelle de chauffage et de climatisation pour le cas initial.....	116
Fig. IV. 20. Demande énergétique mensuelle de chauffage et de climatisation pour le cas amélioré.....	117
Fig. IV. 21. Bilan énergétique du bâtiment mois par mois.....	117
Fig. IV. 22. Bilan énergétique du bâtiment par année .....	118
Fig. IV. 33.. Performance énergétique de la maison dans le cas initial et après la réhabilitation.....	119

INTRODUCTION  
GENERALE

### INTRODUCTION GÉNÉRALE

La réduction de la consommation d'énergie est une mission mondiale dans laquelle les bâtiments jouent un rôle fondamental, car ils sont responsables de 34 % de la consommation d'énergie et de 40 % des émissions de CO<sub>2</sub> [1]. Cependant une grande partie du problème vient des bâtiments anciens, qui consomment cinq à huit fois plus que ceux des nouvelles constructions. Les premiers, constituent un problème important, car 35% des bâtiments ont plus de 50 ans, auxquels s'ajoutent également ceux construits avant l'entrée en vigueur de la norme D.T.R C3-2 (1986). Par conséquent, le manque d'isolation thermique dans l'enveloppe, qui est responsable de la conservation de l'énergie produite à l'intérieur, a exigé aux utilisateurs de faire une rénovation énergétique, afin de réduire, en particulier, la demande de chauffage et de refroidissement des bâtiments. L'une des alternatives les plus notables est l'amélioration du comportement thermique de l'enveloppe. En fait, les réglementations nationales sont de plus en plus exigeantes à cet égard, ce qui se traduit, en général, par une augmentation de la quantité du matériau, thermiquement isolant, qui est ajouté à l'enveloppe du bâtiment.

Le plâtre est très connu dans le domaine de la construction de bâtiments, mais malgré l'existence d'énormes gisements de gypse comme matière première pour la production du plâtre dans de nombreuses régions du monde, malheureusement son utilisation reste limitée. En effet, ce matériau est encore utilisé sous sa forme traditionnelle de poudre mélangée à l'eau pour réaliser des revêtements. Son développement ne s'est pas étendu au-delà des éléments préfabriqués tels que les plaques, tuiles, dalles, etc.

Dans ce contexte, il convient de noter qu'il est vraiment intéressant, pour le secteur, de développer la recherche de nouveaux matériaux plus performants et à haute isolation thermique, particulièrement axés sur la réhabilitation énergétique des bâtiments. Ces matériaux doivent être respectueux de l'environnement, ainsi que compatibles avec les systèmes de construction des bâtiments à réhabiliter.

En ce sens, cette thèse de doctorat porte sur l'étude d'un nouveau matériau composé de plâtre et de sable de dune ainsi que des billes de polystyrène expansé, dans des proportions élevées, pour obtenir un matériau à haute isolation thermique qui pourrait être utilisé pour les façades des bâtiments résidentiels existants (à partir d'une optimisation future, en intervenant dans les

facteurs établis), destiné à réduire les pertes d'énergie, et par conséquent, à réduire la consommation d'énergie de ce type de bâtiments ; ainsi, on peut atteindre des niveaux d'isolation thermique nettement supérieurs à ceux des panneaux du marché développés pour le même but.

Le polystyrène expansé est un matériau bien connu par sa faible conductivité thermique, qui a suscité un grand intérêt dans le monde entier pour le développement de nouveaux matériaux et systèmes de construction avec une isolation thermique plus élevée que celles des autres matériaux traditionnels utilisés dans la construction.

Afin de la bien structurer, cette thèse a été répartie en quatre principaux chapitres :

- ❖ Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique sur le bilan d'énergie de la construction en Algérie, des généralités sur les bétons de plâtre, les bétons légers et un aperçu sur les composites de plâtre légers. A la fin de ce chapitre, on trouvera une présentation sommaire des propriétés thermo-physiques d'un mur extérieur.
- ❖ Le deuxième chapitre comporte une caractérisation générale des matériaux de base utilisés dans les différentes compositions du béton étudié, ainsi qu'une description détaillée sur les différentes techniques expérimentales employées dans cette étude.
- ❖ Le troisième chapitre est consacré à une synthèse et une analyse des résultats expérimentaux ainsi obtenus. Il comprend, lui-même 2 parties : tout d'abord, l'étude de l'effet de l'allègement par l'ajout des billes de polystyrène expansé sur les propriétés physico-mécaniques du béton de plâtre et sur les propriétés thermiques ; puis une modélisation du comportement thermique par la méthode d'homogénéisation. La deuxième partie est consacrée à l'étude de la durabilité des composites élaborés par la vérification de leurs propriétés à long terme après leur exposition à un vieillissement par des cycles de séchage-humidification. On s'est également intéressé à l'examen de leur résistance aux sulfates et acides.
- ❖ Le quatrième chapitre est consacré à l'étude d'une simulation numérique qui permet d'évaluer le potentiel d'économie d'énergie du matériau, appliqué comme isolation thermique dans les façades d'une maison individuelle simplifiée de Laghouat.

Enfin, une conclusion générale est présentée, 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 :

### GÉNÉRALITÉS ET SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

#### INTRODUCTION

L'impact environnemental du secteur de la construction se distingue donc par la forte consommation d'énergie que supposent la demande de chauffage et de climatisation des bâtiments. Par ailleurs, la construction évolue de jour en jour, ce qui a rendu nécessaire la réflexion sur des nouveaux matériaux éco-efficaces minimisant l'exploitation des ressources naturelles, contribuant à réduire la quantité d'énergie consommée lors de la fabrication et de l'utilisation finale et générant moins de déchets.

#### I. CONTEXTE ENERGETIQUE DU SECTEUR DU BATIMENT EN ALGERIE

L'Algérie n'est qu'une partie de la réalité planétaire en matière de consommation d'énergie et des risques environnementaux. Le secteur du bâtiment est le premier consommateur d'énergie en Algérie [1]. La figure I.1 montre la part de chaque secteur d'activité dans la consommation globale en Algérie pour l'année 2017 et confirme que la consommation globale des ménages est évaluée à 19.8 Mtep (Million tonne équivalent pétrole, 1TEP = 42 GJoule = 11630KWh). En matière d'électricité, la consommation, dans le secteur résidentiel, atteint les 34% de la consommation globale ; pour le gaz naturel la consommation du secteur ménage et autres atteint 77% de la totalité consommée sur l'échelle nationale [2].

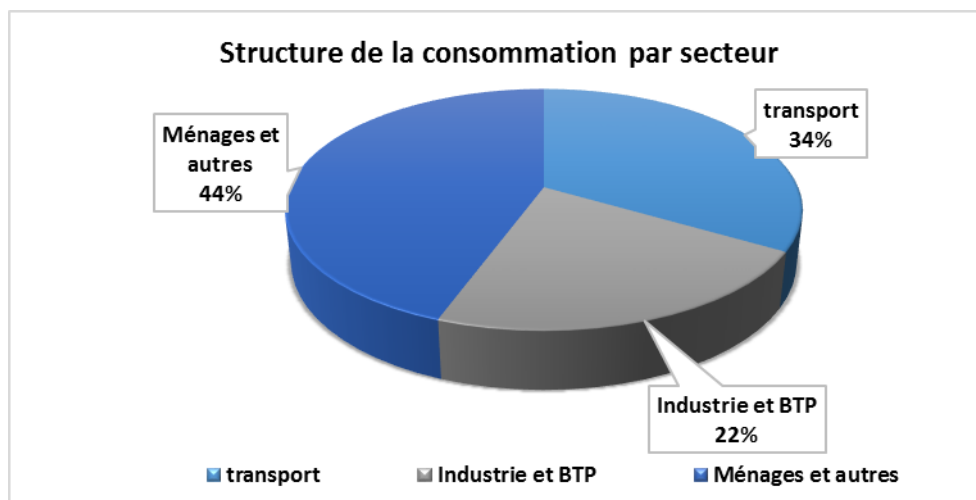


Fig. I. 1. Répartition de la consommation énergétique finale par secteur [2]

En ce qui concerne l'analyse de la consommation d'électricité par usage, l'éclairage et le froid totalisent 90% ; le chauffage et la cuisson représentent environ 60% de la consommation du gaz naturel [2]. Hacene et al. [3] ont évalué cette consommation à 40% de la totalité de

l'énergie en Algérie qui dépend des sources fossiles.

Par conséquent, l'impact environnemental du secteur est relativement grand. La part des émissions de gaz à effet de serre est estimée à 15 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> soit 35% des émissions [3]. D'autre part, la consommation des matériaux de construction a connu une hausse annuelle de 7.5 %. L'industrie cimentaire représente la première source des émissions avec un facteur d'émission de CO<sub>2</sub> relativement grand (0.5071 tonne de CO<sub>2</sub> par tonne de Clinker [4] et 0.3 kg SO<sub>2</sub> par tonne de ciment).

L'énergie nécessaire pour la production des matériaux de construction présente 40% du total consommé par le secteur industriel. Le transport des produits, qui se fait par voie routière, consomme environ 35% de l'énergie grises dans le secteur BTP [2].

Du point de vue technique, l'une des alternatives les plus remarquables est l'amélioration du comportement thermique de l'enceinte pour la réduction de la consommation de chauffage et de refroidissement. En fait, les réglementations nationales sont de plus en plus exigeantes à cet égard, ce qui se traduit généralement par une augmentation de la quantité de matériau d'isolation thermique ajoutée dans l'enveloppe des bâtiments.

### **I.1. ÉCONOMIE D'ÉNERGIE LORS DE LA PHASE D'UTILISATION DES BÂTIMENTS**

En général, les économies d'énergie lors de la phase d'utilisation des bâtiments reposent sur le contrôle de l'enveloppe du bâtiment au moyen des paramètres de confort de base, de la conception et du choix des matériaux les plus adaptés. Pour cela, il est essentiel que les matériaux soient conçus en prenant en compte principalement leur conductivité thermique. Selon différentes sources, telles que le rapport "Tackling Climate Change" [5], l'isolation thermique est la mesure des économies d'énergie qui présente le meilleur rapport coûts-avantages [6]. L'isolation thermique empêche le passage de la chaleur par conduction de l'intérieur vers l'extérieur pendant l'hiver et dans le sens inverse pendant l'été. Tous les matériaux résistent, plus ou moins, à la résistance thermique, cependant la résistance qu'un matériau offre au passage de la chaleur dépend de son épaisseur et de son coefficient de conductivité thermique. En ce sens, les matériaux d'isolation thermique ont un très faible coefficient de conductivité thermique, ce qui leur confère une grande résistance au passage de la chaleur et en fait la stratégie la plus durable pour le secteur résidentiel.

Par conséquent, les nouvelles exigences plus strictes de la réglementation, en matière de demande d'énergie des bâtiments, se traduisent généralement par une augmentation de l'épaisseur des matériaux d'isolation thermique.

Le développement de matériaux de construction adaptés peut être considéré comme l'une

des moyens à réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments. L'un de ces matériaux est le plâtre [7], qui est largement utilisé dans la construction, en raison de leur facilité de production, de leur disponibilité et de leur faible prix. Il convient de noter, enfin, que le plâtre est un matériau de construction fabriqué industriellement à partir de la matière première rocheuse qu'est le gypse.

## I.2. GYPSE

### 1) LA PIERRE A PLATRE

La pierre à plâtre est une roche sédimentaire de structure cristalline, qui se trouve dans la nature sous deux formes :

- L'anhydrite ou sulfate de calcium anhydre, assez rare, qui répond à la formule chimique  $\text{CaSO}_4$ .
- Le gypse ou sulfate de calcium à deux molécules d'eau déshydraté très abondant, qui répond à la formule chimique  $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$  correspondant à 79,07 % de sulfate de calcium associé à 20,93 % d'eau [8]. Cette formule s'applique aussi à la phase artificielle que constitue le gypse cuit et réhydraté [9]. Il peut provenir de gisements exploités sous forme de carrières, ou bien récupéré sous forme de sous-produit (phosphogypse).

La classification de la pierre à plâtre se fait selon sa composition minéralogique (teneur en gypse  $T_g$ ) et chimique (teneur en eau de cristallisation  $T_c$ ).

**TAB I. 1. CLASSIFICATION DE LA PIERRE A PLATRE [8].**

Classe	Composition minéralogique	Composition chimique
	$T_g$ : % en $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$	$T_c$ : % en eau de cristallisation
<b>I</b>	$T_g \geq 90$	$T_c \geq 18,83$
<b>II</b>	$80 \leq T_g \leq 90$	$16,74 \leq T_c \leq 18,83$
<b>III</b>	$70 \leq T_g \leq 75$	$14,65 \leq T_c \leq 16,74$
<b>IV</b>	$0 \leq T_g \leq 70$	$11,51 \leq T_c \leq 14,65$

Pour la production du plâtre, il est recommandé d'utiliser la pierre à plâtre dont la teneur en gypse est supérieure à 70 % (classe I, II et III). Le sulfate de calcium déshydraté ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ) cristallise dans le système monoclinique (Figure I.2)

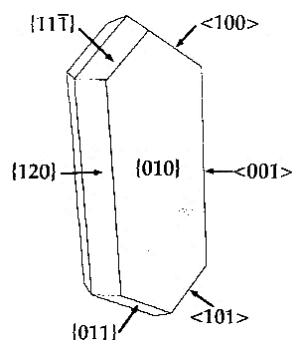


FIG. I. 2 Morphologie du cristal de gypse [9].

Sa structure révèle un édifice cristallin construit sur un empilement de deux types de feuillets qui s'alternent parallèlement au plan (010). Les doubles feuillets d'ions calcium  $\text{Ca}^{+2}$  et sulfate  $\text{SO}_4$  (tétraèdre avec un atome de soufre au centre des atomes d'oxygène) sont séparés par des doubles feuillets de molécules d'eau. Cet arrangement explique le clivage très aisé des cristaux de gypse d'orientation (010). Le gypse comporte des liaisons ioniques dans les feuillets ( $\text{Ca}^{+2}/\text{SO}_4$ ) dues aux différences de charges électriques, (liaisons fortes), et des liaisons hydrogènes entre les molécules d'eau et les atomes d'oxygène des ions sulfate, l'atome d'oxygène de la molécule d'eau étant relié à un ion calcium. Figure I.3 montre la structure cristalline du gypse. Morphologie du cristal de gypse

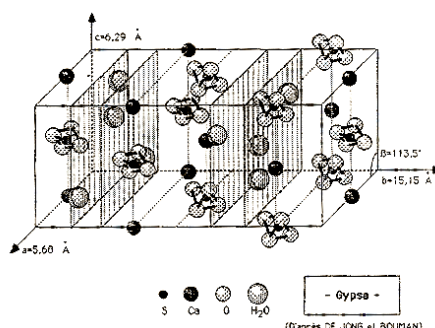


Fig. I. 3. Structure cristalline du gypse d'après De Jong et Bouman

## 2) GISEMENT DE GYPSE

L'Algérie est un pays à fort potentiel de production de gypse. Les grands gisements existent à Dahra (région du chlef), Djebel Chegga, Mostaganem, Arzew, Sidi Bel abbés, Habouch (montagnes mina) et les Babors. Le tableau I.2 donne quelque production de gypse à travers l'Algérie.

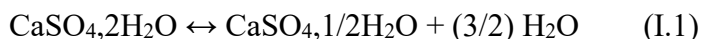
**Tab I. 2.** Quelques exploitations de gypse en Algérie [10].

Wilaya	Nom de l'exploitation
ALGER	SCAL SPA SOCIÉTÉ DES CIMENTS ALGÉROISE
	ZIDANE MARBRE
BATNA	CARRIÈRE DE PLÂTRE BOUCHARREB HEDDA EURL
	CARRIÈRE PLÂTRE BELLAHCÈNE MESSAOUD SARL
BÉJAÏA	BENAMARA EURL
BISKRA	ENTREPRISE DE PLÂTRE ET DÉRIVÉS SPA
	PLÂTERIE EL GHAZAL EURL
BOUIRA	ENFA PLÂTRE (GYPSE, PLÂTRE) SARL
	ERCC SPA
CONSTANTINE	SPDE SPA
GHARDAÏA	GHARDAÏA PLÂTRE SARL
	PLÂTRE DU SUD SPA
	SPDC SPA PLÂTRERIE DE GHARDAÏA FILIALE ERCC
GUELMA	GYPSE EN NADOR EURL
KHENCHELA	IKHLASSE SARL
MASCARA	E.MA.CO EPE (UNITÉ PLÂTRIÈRE D'OGGAZ)
	ERCO EPE/SPA
MILA	BOUSBAÂ ET AÏSSAOUI (GYPSE EL HASSI AÏSSAOUI ET ASSOCIÉS) SNC
	SO.PLAT SPASOCIÉTÉ DES PLÂTRES DE GRAREM GOUGA
M'SILA	CHALLA PRODUCTION DE PLÂTRE SARL
	EL DJABES (DOKMANE ABDELATIF) EURL
ORAN	ERCO PLÂTRE (SODEPAC) SPA
SÉTIF	GUELLAL PLÂTRE D'OR SARL
	GUESMIA D'EXTRACTION ET PRÉPARATION DE GYPSE EURL
TÉBESSA	CARRIÈRE DYR EURL
	MANDRA SOUTIRAGE ET PRÉPARATION DE SOL SARL
TISSEMSILT	PLÂTRIÈRE DE SIDI BOUTOUCHENT SARL

### I.3.PLATRE

Le terme « plâtre » est utilisé pour désigner un matériau solide que l'on appelle autrement plâtre, c'est aussi la poudre ou encore le semihydrate qui permet, après gâchage d'obtenir dit « matériau solide ». La fabrication de cette poudre consiste à éliminer partiellement de l'eau de constitution du gypse. Les phénomènes de cristallisation, qui ont lieu sont décrits, par plusieurs auteurs [9, 11-14] et peuvent se résumer comme suit : en procédant à la cuisson entre 100°C et 140°C, on obtient les semihydrates  $\alpha$  et  $\beta$  selon que celle-ci est effectuée sous vapeur d'eau ou à l'air.

La transformation s'effectue suivant l'équation :



Si on poursuit la cuisson vers 200°C, on a l’anhydrite III ou l’anhydrite soluble. Très instable, il se réhydrate assez rapidement en semihydrate au contact avec l’eau en phase vapeur. Sa structure cristalline est hexagonale. L’équation de la transformation est alors :



L’anhydrite III se transforme en anhydrite II, de structure cristalline orthorhombique, lorsqu’on est aux alentours de 250°C à partir du semihydrate  $\alpha$  et vers 400°C à partir du semihydrate  $\beta$  :



Dans le cas où on cuit au delà de 1200°C, on obtient l’anhydre I, sa structure cristalline est cubique à faces centrées, la réaction se produit conformément à l’équation :



Les semihydrates  $\alpha$  et  $\beta$  sont les principaux produits utilisés. Le taux de gâchage E/P varie fréquemment entre 0,5 et 1,2 dans le cas des semihydrates  $\beta$  pour des utilisations courantes comme matériau de construction et entre 0,3 et 0,5 dans le cas du type  $\alpha$  [15] utilisé dans la fabrication des céramiques ou bien dans l’industrie dentaire [10]. Sur une quantité d’eau utilisée pendant le gâchage, seule une faible fraction 18,6% [15] participe à la réaction chimique. La quantité d’eau en sus permet d’obtenir une bonne fluidité de la pâte. Elle détermine aussi la porosité du matériau après prise.

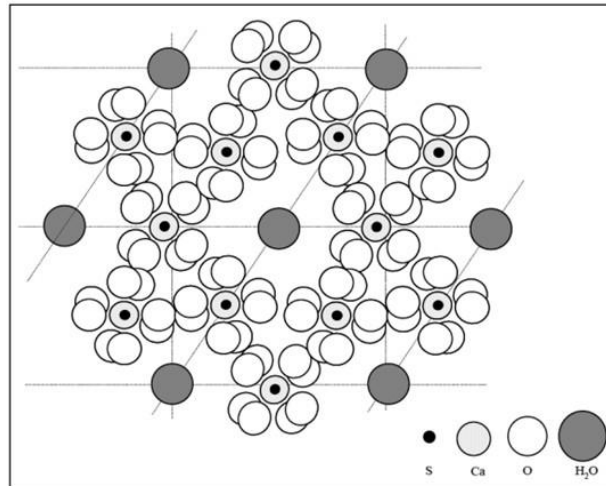
Le tableau I.3 ci-dessous dressé par EVE [15] en 2003 résume les principales caractéristiques du gypse et des produits ci-dessus décrits obtenus lors de sa cuisson. Ces informations sont aussi disponibles dans la référence [11].

**Tab I. 3.** Caractéristiques du système CaSO<sub>4</sub> et ses hydrates [11].

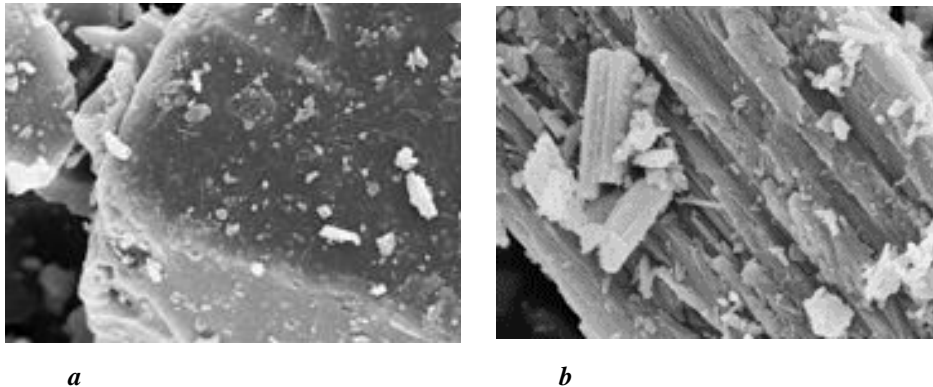
Phase	Gypse	Semihydrate $\alpha$	Semihydrate $\beta$	Anhydre III	Surcuit
Système cristallin	Monoclinique	Rhomboédrique		Hexagonal	Orthorhombique
Teneur en eau	20.93 %	6.21 %		$\varepsilon$ %	0
Masse moléculaire	172.17 g	145.15 g		136.14 g	136.14 g
Masse volumique	2.31 g/cm <sup>3</sup>	2.76 g/cm <sup>3</sup>	2.63 g/cm <sup>3</sup>	2.95 g/cm <sup>3</sup>	2.95 g/cm <sup>3</sup>
Solubilité à 25°C	2.4 g/l d’eau	6.5 g/l d’eau	9.0 g/l d’eau	9.9 g/l d’eau	2.7 g/l d’eau
Préparation		Voie humide	Voie sèche		
Chaleur d’hydratation		- 4100 cal/mol	- 4600 cal/mol		
Cristallisation		Compacte	Spongieuse		
Surface spécifique		Faible	Élevée		

### I.3.1. STRUCTURE CRISTALLINE DU SEMIHYDRATE

La structure cristallographique du semihydrate  $\alpha$  et  $\beta$  a été étudiée par plusieurs auteurs notamment Bershadskii F.G et Mchedlov-Petrosyan O.P. cités par S. EVE [15] ; elle est dite rhomboédrique (figure I.4) ; la différence est que le premier a une structure non poreuse alors que le second est poreux comme on peut l'observer sur les images MEB de la figure I.5. C'est ce qui justifie la différence dans leurs applications.



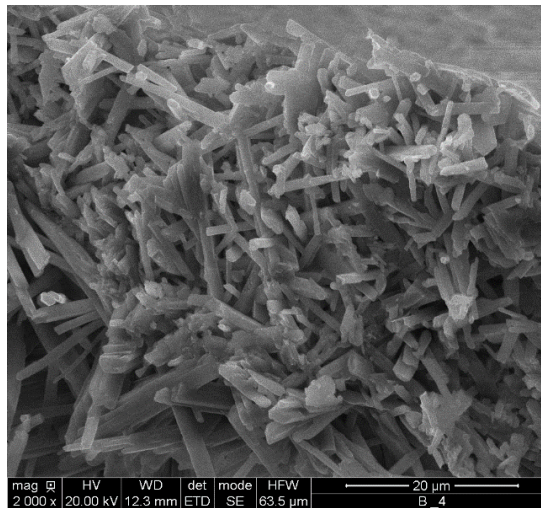
**Fig. I. 4** Structure atomique du semihydrate sur le plan (001) [15].



**Fig. I. 5.** Images MEB (5 $\mu$ ) des plâtres : a-semihydrate  $\alpha$  ; b-semihydrate  $\beta$  [9].

### I.3.2. MICROSTRUCTURE DU PLATRE

Très récemment, Sylvain MEILLE, Sophie EVE et Hamadou JAFFEL [9, 15-16] ont étudié la microstructure du plâtre. Ils trouvent qu'elle est très poreuse. Son taux de porosité est par exemple de 55% pour un taux de gâchage E/P égale à 0,8 ; sa microstructure est constituée de cristaux en forme d'aiguilles ou de plaquettes enchevêtrés. Leur liaison est de type feuilleté pour certains et de type tenon- mortaise pour d'autres. L'image MEB de la figure I.6 permet de visualiser cette présentation de la microstructure du plâtre.



**Fig. I. 6.** Enchevêtrement des cristaux du plâtre (image MEB - 20 $\mu$ m).

### **I.3.3. COMPORTEMENTS DU PLATRE**

#### **1) CINÉTIQUE D'HYDRATATION ET DE TEXTURATION DU PLÂTRE**

Lors du gâchage du plâtre, on peut observer une dissolution de la poudre dans l'eau obtenant un liquide blanc homogène ; par la suite, ce mélange commence à durcir renvoyant une quantité d'eau à la surface et un dégagement de chaleur s'en suit. Après un bout de temps, le mélange achève son durcissement : c'est la fin de la prise. Une fois séché, il devient solide mais fragile.

Depuis le 17<sup>e</sup> siècle, des chercheurs s'intéressent à expliquer ce mécanisme qui se produit pendant la prise du semihydrate. Des modèles sont alors proposés : certains se rassemblent autour de l'idée selon laquelle il s'agirait d'une cristallisation, d'autres parlent d'un phénomène colloïdal, de germination hétérogène ou topochimique. Les travaux de P. COQUARD en 1992, S. MEILLE en 2001, S. EVE en 2003 et H. JAFFEL en 2006 sont basés sur ces différentes idées [9,13, 15-16].

En 1988, AMATHIEU, partant de la théorie soutenue par Lavoisier en 1768 et LE CHATELIER au 19<sup>e</sup> siècle selon laquelle la prise du plâtre s'effectue selon le schéma suivant : dissolution - germination et croissance, montre qu'il y a dissolution et cristallisation simultanées et trouve que la dissolution s'effectue suivant une loi d'ordre 2 tenant compte de la surface présente à la dissolution. Après analyse, en 2006, H. JAFFEL [9] explique que les étapes de l'hydratation du plâtre (dissolution initiale, période de latence, accélération et fin du processus) ne s'expliquent pas par la seule théorie de LE CHATELIER parce que des techniques expérimentales notamment la conductimétrie, la calorimétrie, etc. montrent bien l'existence de ces trois étapes de l'hydratation. Il propose alors un nouvel éclairage sur ce processus d'hydratation en effectuant la mesure par relaxation magnétique du proton à bas

champ. Le résultat de son expérimentation est qu'il existe en permanence deux populations d'eau différentes tout au long de la réaction d'hydratation :

- la plus grande fraction servant à alimenter la réaction d'hydratation et à créer la porosité,
- la plus faible fraction amplifiée après la prise occupe les espaces poreux les plus confinés (eau dans les amas d'aiguilles, eau inter-cristalline, . . . ).

Au regard des investigations déjà effectuées sur le mécanisme d'hydratation du semi- hydrate et tenant compte des méthodes et techniques modernes mises en œuvre pour y apporter l'éclairage, l'explication de Hamouda JAFFEL compléterait bien la théorie de LE CHATELIER pour décrire le phénomène qui se produit pendant la prise du plâtre.

## **2) COMPORTEMENT MÉCANIQUE**

Le plâtre pris est considéré à l'état sec lorsqu'il a subi un séchage en étude à 45°C et environ 20% HR pendant plusieurs jours, jusqu'à obtenir un poids constant des éprouvettes. Il est très important de fixer un protocole de séchage car, comme, l'humidité influence très nettement les propriétés mécaniques.

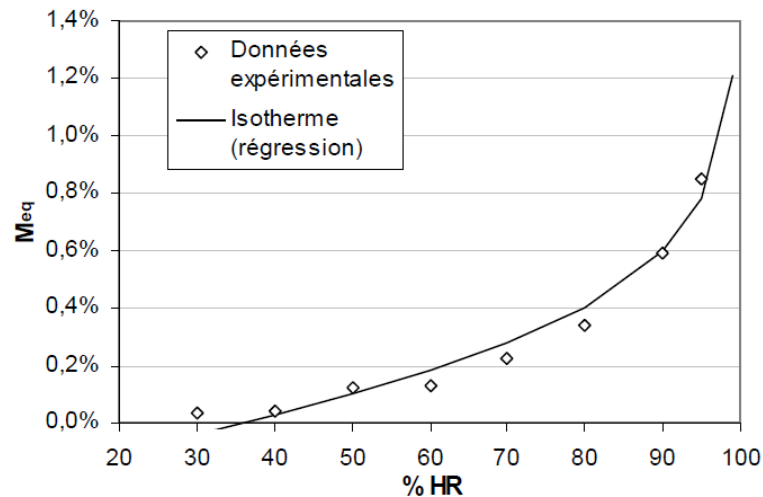
La loi de comportement du plâtre pris sec est traditionnellement enregistrée en flexion 3 ou 4 points. Le comportement obtenu est linéaire, avec une rupture brutale et fragile, quelle que soit la vitesse d'essai imposée. Les premières propriétés sont les plus facilement mesurables : dureté, module d'Young et contrainte à la rupture. Afin de les relier à la structure du matériau, le paramètre le plus simple et le plus couramment utilisé est la porosité totale. Elle est habituellement déterminée à partir des densités du gypse pur et du plâtre étudié ou en tenant compte de la masse minimale d'eau nécessaire à l'hydratation du semi hydrate. Une relation entre les propriétés mécaniques et la porosité totale est alors déterminée [16].

## **3) COMPORTEMENT HYGROMETRIQUE**

Le plâtre est très sensible à l'eau. L'intérêt de l'étude de son comportement hygrométrique se trouve dans l'examen de son influence sur les performances structurelles par exemple. Suite à l'affirmation de SATTLER [17-18], selon laquelle le plâtre pris mouillé est plastique, Philippe COQUARD [13] procède à une vérification en menant un essai de flexion sur une poutre de plâtre mouillée comparée à une poutre sèche et confirme cette affirmation. Il précise que cette plasticité s'explique par des glissements au niveau des interfaces inter cristallines et non au sens conventionnel du terme. M. Saâdaoui et autres [19] en 2004, montrent que l'accroissement du taux d'absorption de l'humidité augmente le glissement entre les cristaux justifiant le comportement viscoélastique du matériau mouillé. Trois ans

plus tôt, S. MEILLE [16] étudiait le comportement du plâtre pris humide et faisait le même constat.

En 2002, P. BOUSTINGORRY [12] établit l'isotherme de reprise d'humidité d'une poutre de plâtre de  $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$  à l'isotherme Nelson du gypse (figure I.7).



**Fig. I. 7.** Données expérimentales de reprise d'humidité d'une poutre de plâtre [12].

On en conclut que le plâtre absorbe davantage d'eau pour un taux d'humidité relative important. L'étude du plâtre en présence de l'eau est aussi justifiée pour comprendre son comportement vis-à-vis de l'humidité dans des applications fonctionnelles. Des essais de laboratoire [11] permettent de découvrir que ce matériau de construction contribue à amortir les variations hygroscopiques de l'environnement dans lequel il est utilisé.

#### **4) COMPORTEMENT THERMIQUE ET AU FEU**

Des études [11, 20-21] nous permettent à ce jour de montrer qu'il faudrait une énergie calorifique importante (environ 711 kJ par kg de plâtre) pour libérer les 20% en masse d'eau liées chimiquement ; pour faire évaporer cette eau par la suite, il faudrait encore dépenser 1255 kJ par kg de plâtre. Il est présentement connu que la température du plâtre reste inférieure à 140°C tant que toute l'eau n'est pas libérée et vaporisée, que sous l'action du feu sur le plâtre ne donne naissance à aucun gaz ou vapeur de caractère toxique, corrosif ou asphyxiant, aucune fumée ni de produit susceptible d'activer le feu. Il est donc classé comme coupe-feu selon le critère d'isolation I. La structure poreuse du plâtre qui résulte du départ d'eau lors du séchage et subsiste après déshydratation fait du plâtre un mauvais conducteur de la chaleur. Le tableau 1.4 donne les caractéristiques thermiques du plâtre. Le plâtre présente une faible conductivité thermique ; c'est un bon isolant thermique. Le pouvoir isolant thermique du plâtre est désormais connu : trois à quatre fois celui du béton et deux à trois fois celui de la terre cuite.

**Tab I. 4.** Caractéristiques thermiques du plâtre [11].

Matériau ou application	Masse volumique sèche $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité thermique utile $\lambda$ (W. m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )	Capacité thermique massique $C_p$ (J. kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )	Facteur de résistance à la vapeur d'eau $\mu$	
				Se	Humide
Plâtre	600	0,18	1 000	10	4
Plâtre	900	0,30	1 000	10	4
Plâtre	1 200	0,43	1 000	10	4
Plâtre	1 500	0,56	1 000	10	4
Plaque de plâtre	900	0,25	1 000	10	4
Enduit isolant au plâtre	600	0,18	1 000	10	6
Enduit plâtre	1 000	0,40	1 000	10	6
Enduit plâtre	1 300	0,57	1 000	10	6
<b>Plâtre et sable</b>	<b>1 600</b>	<b>0,80</b>	<b>1 000</b>	<b>10</b>	<b>6</b>

#### **I.4. MORTIER DE PLATRE**

Le mortier de plâtre résulte d'un mélange bien homogénéisé de plâtre, de sable et d'eau. Des études antérieures [8] imposent les limites des caractéristiques que doit avoir le sable utilisé, aussi bien dans le mortier que dans le béton de plâtre.

##### **I.4.1. MODE OPÉRATOIRE**

Le C.N.E.R.I.B [8] (Centre National d'Etudes et de Recherches Intégrées au Bâtiment) donne la méthode de composition du mortier de plâtre comme suit :

- Il faut ajouter le taux de mouillage du sable au taux de gâchage E/P relatif au plâtre pour obtenir un mortier maniable, c.-à-d. :
- détermination de la quantité d'eau de gâchage du mortier (eau nécessaire à la saturation augmentée de l'eau de mouillage du sable).

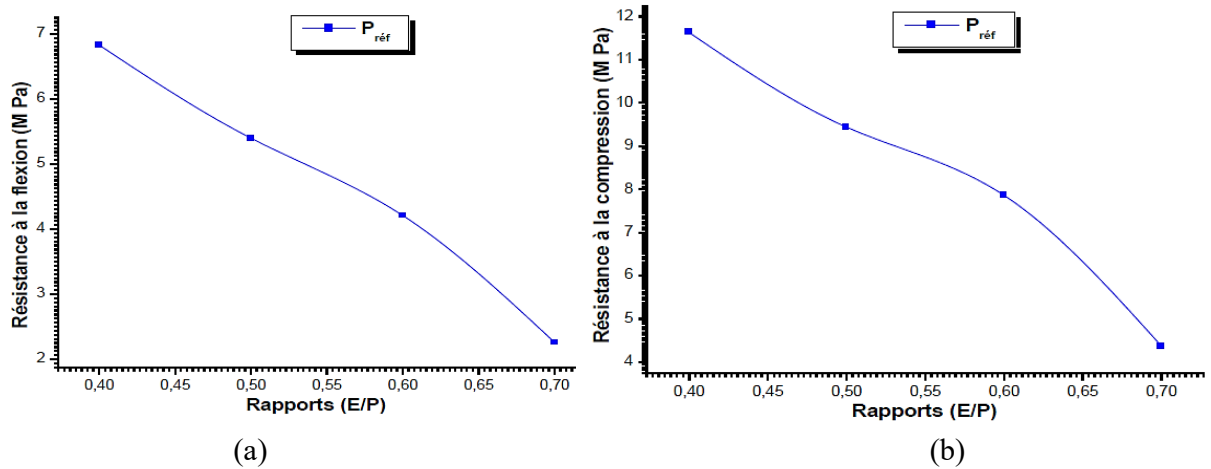
Pour la confection du mortier de plâtre, on recommande le mode opératoire suivant :

- mélanger à sec le plâtre et le sable ;
- éteindre complètement la chaux aérienne dans l'eau de gâchage ;
- ajouter progressivement cette lait de chaux aux matériaux avec malaxage.

##### **I.4.2. COMPORTEMENT MECANIQUES DU MORTIER DE PLATRE**

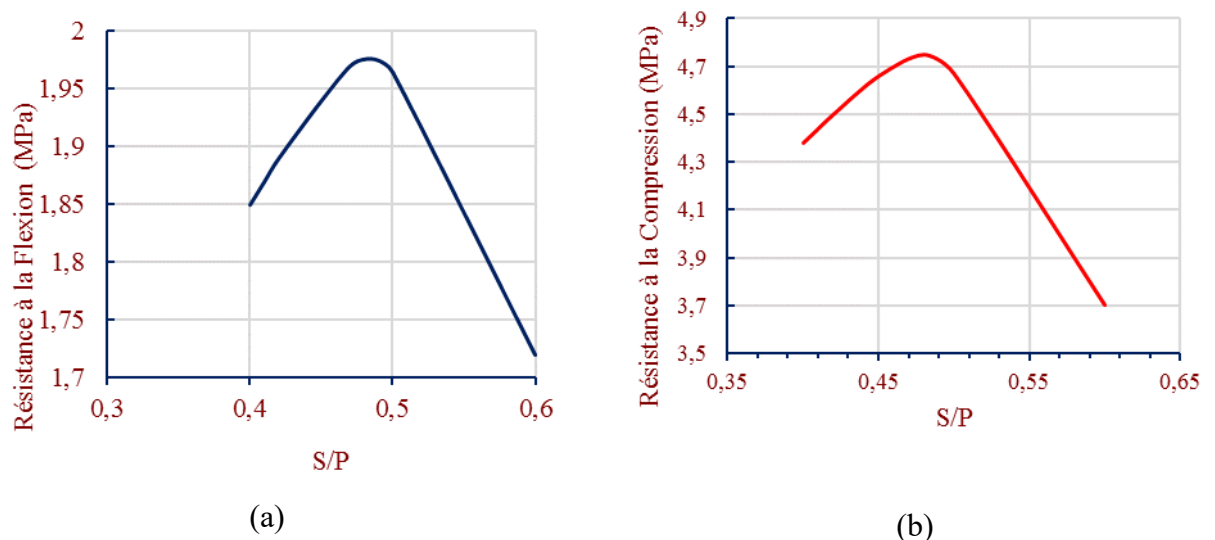
Des travaux ont visé à améliorer la connaissance du mortier de plâtre du point de vue de son élaboration, de son comportement face à des sollicitations. Ils ont aussi mis l'accent sur l'amélioration des ces caractéristiques. Une étude entreprise par le C.N.E.R.I.B [8] montre l'influence du rapport E/P (Eau/Plâtre) sur les résistances mécaniques du mortier de plâtre.

La courbe ci-dessous montre la variation de la résistance mécanique à 28 jours des mortiers en plâtre en fonction du rapport E/P et avec un rapport S/P = 0,5.



**Fig. I. 8.** Influence du rapport E/P sur les résistances mécaniques du mortier :(a) en flexion ; (b) en compression [8].

D'autres études antérieures [22] constatent que la résistance mécanique du mortier de plâtre augmente avec la proportion de sable ajoutée, puis décroît quand le rapport S/P (Sable/Plâtre) devient important (Fig. I.9).



**Fig. I. 9.** Influence du rapport S/P sur la résistance mécanique (a) en flexion ; (b) en compression [22]

Derbani et al. [23] ont étudié l'effet de compactage sur le comportement thermo-mécanique des mortiers de plâtre ; ils ont constaté que le compactage améliore les performances mécaniques du mortier ; ils ont pu atteindre plus de 7 MPa en flexion, ce qui représente une évolution entre 28% à 31% pour respectivement 1mn et 5 mn de compactage par rapport au même mortier coulé simplement. Pour la résistance à la compression, ils ont réussi à atteindre plus de 21 MPa, l'équivalent d'une progression entre 62% et 68% pour les mêmes temps de compactage suscités.

### I.4.3. LE COMPORTEMENT THERMIQUE DU MORTIER DE PLATRE

Abdelmoumen [24] constate que la conductivité thermique  $\lambda$  du mortier de plâtre augmente avec la proportion de sable ajoutée. La diffusivité thermique du plâtre augmente pour de faibles proportions de sable ajouté, puis décroît quand le taux S/P devient important. L'ajout de sable influe considérablement sur la masse volumique du mélange « plâtre-sable » et, donc, sur sa chaleur spécifique, il s'ensuit une augmentation de la diffusivité thermique.

Avec une mise en œuvre par le compactage [23], la conductivité thermique à différents dosages en sable subit une évolution plus importante, les valeurs sont presque doubles du même mortier coulé simplement. Cet accroissement est induit par l'augmentation de la densité qui a lieu suite à la réduction des volumes des vides causée par le compactage.

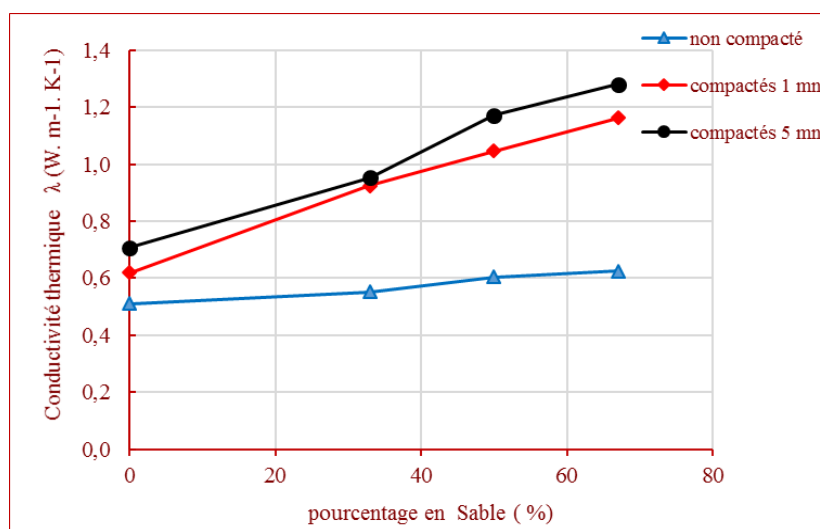


Fig. I. 10. Conductivité thermique des différents mortiers de plâtre à différents temps de compactage [23].

### I.5.BETON DE PLATRE

Il est Possible d'obtenir un matériau d'excellentes qualités en incorporant à un mortier de plâtre des agrégats ayant une granulométrie étudiée. La résistance d'un tel conglomérat dépasse habituellement la résistance du mortier de plâtre seul. Pour obtenir un béton de plâtre, il faut tout d'abord disposer d'un bon mortier de plâtre, c'est à dire d'un mortier ayant un facteur E/P réduit. Par ailleurs, la mise en œuvre du béton de plâtre par vibration permet d'améliorer les propriétés du béton en épaississant sa pâte.

#### I.5.1. METHODE DE COMPOSITION DU BETON DE PLATRE

La composition des bétons a pour but de déterminer les proportions des divers constituants (liant, sable, gravier et eau) conduisant à des bétons dont l'ouvrabilité est compatible avec les

moyens de mise en œuvre et qui possèdent après durcissement les meilleures caractéristiques (étanchéité, résistances mécaniques, etc.).

Les méthodes de composition du béton de ciment ne trouvent pas leur validité dans le cas du béton de plâtre. Pour cette raison, une combinaison des méthodes de Vallette et de Faurry a été proposée par le C.N.E.R.I.B [8].

- 01 sac de plâtre : 40 kg ;
- Gravier 5/15 : 60 – 80 kg ;
- Chaux éteinte : 01 à 1,5 kg ;
- Eau : 16 à 24 l.

### I.5.2. MODE OPERATOIRE

Après la détermination de la composition du béton de plâtre, on procède comme suit :

- mélanger mécaniquement, à sec le plâtre, le gravier et le sable ;
- faire éteindre complètement la chaux aérienne dans une partie de l'eau
- mélanger la chaux éteinte au reste de l'eau de gâchage ;
- ajouter progressivement ce mélange (eau + chaux) aux constituants (plâtre + gravier + sable) ;
- éviter un long malaxage, pour ne pas accélérer la prise.

Djoudi [25] montre que la maniabilité croît avec l'augmentation du rapport S/G (Sable/Gravier) et que la composition granulaire optimale pour le béton de plâtre témoin (qui donne une maniabilité maximale) correspond à un rapport S/G = 0,29.

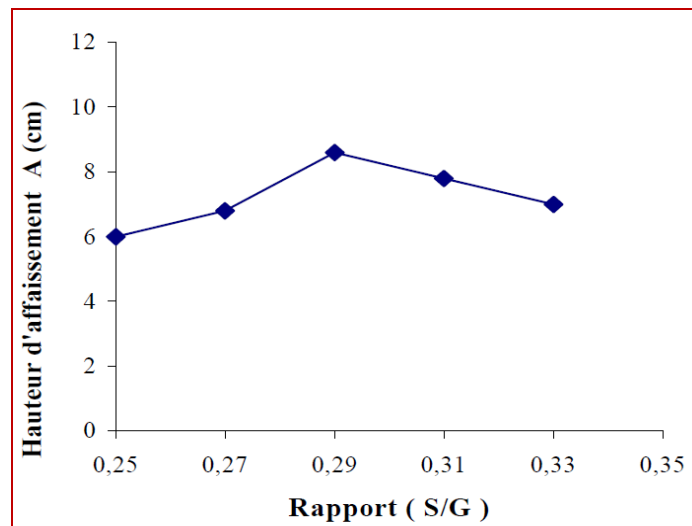


Fig. I. 11. Variation de la maniabilité en fonction du rapport S/G pour le béton [25].

### I.5.3. DURABILITE DES BETONS DE PLATRE

Parmi les variables influant sur la durée de vie des bâtiments, on peut compter, outre les conditions climatiques et l'entretien, la qualité de la construction et son mode d'utilisation.

Datant de plus d'un siècle, les toitures en formes de voutes et coupoles et des maçonneries réalisées en pierre de gypse hourdées au plâtre ont conservés leur forme initiale sans fissurations importantes. Mais les matériaux classiques (acier, béton, etc.) pour des raisons économiques et technologiques, ont progressivement remplacé l'utilisation des pierres et du plâtre.

Le deuxième point qui limite l'utilisation du plâtre en extérieur et à certains types d'ouvrages est sa faible résistance aux intempéries.

Dans le but de procurer une plus grande durabilité aux matériaux à base de plâtre, différentes études, dans ce sens, ont été élaborées. On peut citer :

- Pour modifier certaines caractéristiques du plâtre et utiliser des matériaux localement disponibles, DEBOUCI et al. [26] ont envisagé l'utilisation de la chaux compte tenu de son rôle dans les enduits. Il ressort des essais effectués que l'ajout de chaux au plâtre améliore sensiblement ses propriétés.
- D'autres études [27] préconisent, pour l'utilisation d'éléments à base de plâtre dans les murs extérieurs, d'adopter les proportions de chaux suivantes :
  - Pour la confection des blocs, on propose 4 à 8 % de chaux par rapport à la masse du plâtre. Cette proportion assure un temps de coulabilité suffisant et une bonne protection contre l'action de l'eau ;
  - Dans la composition des enduits, on propose 10 à 25 % de chaux. Cette composition assure une meilleure maniabilité, une bonne imperméabilité et une plus grande dureté.
- Des essais, effectués en Pologne [18], montrent qu'une chute de résistance à la compression entre 50 à 60 % est enregistrée pour des échantillons de béton de plâtre non imperméabilisés exposés aux conditions atmosphériques. Pour cela il est recommandé d'utiliser une lessive d'hyposulfite pour des teneurs de l'ordre de 2 à 3 %.
- D'autres études, réalisées en Australie sur des poutres en béton de plâtre armé, montrent que la résistance mécanique du béton de plâtre armé avec ou sans chaux diminue. L'addition de 10 % en poids de chaux au plâtre semble empêcher la réaction de corrosion entre l'acier et le plâtre [19].
- Lanzon et Garcia-Ruiz [27], ont étudié l'effet de l'acide citrique sur les propriétés mécaniques des enduits de construction en plâtre.
- Belayachi et al. [28] ont examiné les effets du cyclage séchage-humidification et du gel-dégel sur les propriétés physiques de nouveaux matériaux composites paille-plâtre proposées pour l'isolation de bâtiment. Ils concluent que le composite n'a pas été affecté par les cycles

gel-dégel, mais il y a un changement prépondérant sur les propriétés du composite dû au vieillissement causé par le 'mouillage-séchage'. La capacité plus élevée de la paille d'orge d'absorber l'humidité est l'inconvénient principal pour le composite final.

## **I.6. DOMAINE D'APPLICATION DES ELEMENTS A BASE DE PLATRE**

### **a) DANS LA CONSTRUCTION**

Le plâtre peut être utilisé comme éléments de mur ou de plancher :

- Les blocs pleins ou creux pour murs porteurs ou de remplissage.
- Les hourdis ou voûtains comme élément de plancher.

Soltane [29] présente le prototype réalisé à Biskra avec les éléments suivants :

- des blocs en béton de plâtre, pour les murs ;
- quant aux planchers, premier niveau et terrasse, ils sont constitués à base de poutrelles semi-préfabriquées en béton armé et d'une dalle de compression en béton coulé sur des voûtains en plâtre comme coffrage perdu. Les parties restantes ont été remplies de béton de plâtre.

Zuber [30], en vue de la recherche d'un procédé de construction destiné aux zones tropicales sèches, dont les composants sont en mortier de plâtre, a utilisé :

- un bloc creux  $20 \times 20 \times 40 \text{ cm}^3$  pour les murs ;
- une dalle  $60 \times 52 \times 8 \text{ cm}^3$  pour les planchers ;
- une pièce armé en U de  $20 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$ , utilisable soit en coffrage linteaux, soit en marche qui doit être couverte d'un revêtement anti-abrasion ;
- une poutrelle en plâtre armé de  $12 \times 14 \text{ cm}^2$ .

Aldeberet [31], pour la rénovation des salles d'exposition du grand Louvre, a choisi le plâtre sous multiples formes :

- des doublages thermiques et acoustiques en plâtre ;
- des plafonds de staff. Certains ont une surface de plusieurs dizaines de mètres carrés d'un seul tenant.

Le C.S.T.B. [32] montre que l'utilisation des plaques de plâtre permet de remettre à niveau des sols déformés. Lors de la réhabilitation des bâtiments ; cette technique de chape sèche apporte des performances d'isolation acoustique et thermique et ne demande pas le renforcement de la structure en raison de son faible poids.

Dernièrement au niveau du CNERIB, il a été réalisé un prototype, avec une grande performance énergétique (fig. I.12), des murs en béton de terre stabilisée, avec comme

élément de remplissage du plancher, des voutains en mortier de plâtre (Fig. I.13).



Fig. I. 12. Prototype avec mur en terre stabilisée et voutains en mortier de plâtre [33].



Fig. I. 13 .Voutains en mortier de plâtre [33].

La fig. I.14 montre les températures intérieures et extérieures du prototype



Fig. I. 14. Détection de la température à l'intérieur et à l'extérieur du prototype avec une grande efficacité énergétique [33].

### I.7.REGLEMENTATIONS DU PLATRE EN ALGERIE

Ces recommandations sont spécifiques à l'Algérie, elles viennent de compléter les règles et les usages du plâtre connus universellement

Tab I. 5. Normes Algériennes sur les plâtres [34].

Références	Intitulé
NA 524	Plâtre - conditions générales des essais.
NA 525	Plâtre - détermination de masse volumique en poudre.
NA 526	Plâtre - détermination des caractéristiques mécaniques.
NA 527	Plâtre - détermination de la finesse de mouture du produit en poudre.
NA 528	Plâtre - détermination de la teneur en eau de cristallisation.

### I.8. Coût

Dans la mesure où le plâtre entre en concurrence avec les matériaux et les procédés traditionnels, le coût de réalisation en plâtre (matériaux + transport et mise en œuvre) doit être nettement inférieur au coût de l'équivalent ciment pour atteindre une diffusion significative.

Sur la base de construction des logements en plâtre au Sénégal, Camara [35] montre que le coût de construction peut être baissé de plus de 20% par rapport à celui en ciment.

D'après les prototypes réalisés au sud Algérien, par rapport au béton de ciment, l'utilisation du béton de plâtre permet de réduire de 25 à 30 % la consommation du liant, tout en assurant, avec les mêmes proportions, une résistance supérieure pour le conglomerat [33].

### II. GENERALITES SUR LES BETONS LEGRS

Le béton léger fait partie de la gamme des bétons spéciaux développés par les ingénieurs. Ses caractéristiques spécifiques suggèrent de nouvelles applications architecturales. Ce qui le distingue du béton ordinaire est sa faible masse volumique. En effet, la masse volumique d'un béton de densité normale varie de 2200 à 2600 kg/m<sup>3</sup>, tandis que celle du béton léger varie entre 300 et 1850 kg/m<sup>3</sup>. La technologie de ces nouveaux bétons peut être profitable pour la construction, notamment dans les pays en voie de développement [36]. Son faible poids, sa résistance et ses autres propriétés le rendent pertinent à être utilisé dans des conditions de mise en chantier plus spécifiques. De plus, l'utilisation d'un béton de masse volumique faible peut permettre de construire sur un sol de faible capacité portante.

La masse volumique du béton léger est diminuée par la substitution d'une certaine partie solide du matériau par des poches d'air que nous appellerons vides. Nous distinguons 3 types de béton léger suivant la localisation de ces vides :

1. **Béton cellulaire** : lorsque l'air est incorporé dans la pâte d'un liant.
2. **Béton caverneux** : ou béton sans fines lorsque les granulats fins, se trouvant entre les gros granulats, sont remplacés par des gros granulats.
3. **Béton à granulats légers** : lorsque les granulats sont allégés, l'air se trouve dans les granulats eux-mêmes [37].

Une classification fonctionnelle est recommandée par RILEM [38], basée sur les travaux de Kass J.L. et Compbell D [39] qui ont dressé une classification selon l'utilisation des bétons légers d'après leurs propriétés physiques, mécaniques et thermiques (tab.I.6).

**Tab.6** classification fonctionnelle de RILEM [38]

Classe	I	II	III
Type de béton léger	De construction	De construction et d'isolation	D'isolation
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	< 1800	Non précisée	Non précisée
Résistance à la compression (MPa)	> 15	> 3.5	> 0.5
Conductivité thermique (W/m/K)	–	< 0.75	< 0.30

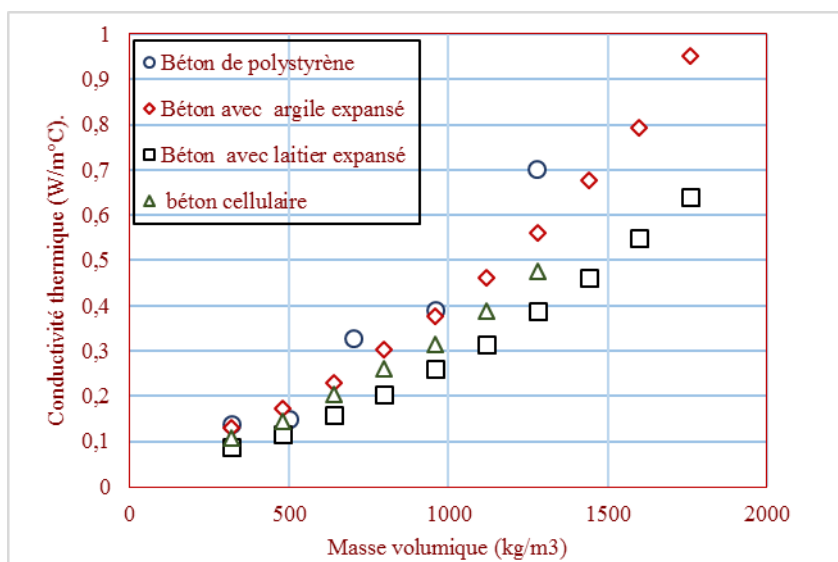
**II.1. PROPRIETES DES BETONS LEGRS**

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

**1) CONDUCTIVITE THERMIQUE :**

L'une des caractéristiques les plus importantes des bétons légers est leur pouvoir isolant. Cette propriété est caractérisée par des paramètres thermo physiques qui sont : la conductivité thermique ' $\lambda$ ', la chaleur spécifique ' $c$ ', la diffusivité thermique ' $a$ ' et l'effusivité thermique ' $b$ '.

Le pouvoir isolant est déterminé par la nature du matériau et celle du granulat. La figure 1.15 montre l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique des bétons légers ; il est bien clair que la valeur de  $\lambda$  augmente avec la masse volumique.



**Fig. I. 15.** Conductivité thermique pour quelques bétons de granulats légers [16].

**2) RESISTANCE MECANIQUE**

La résistance des bétons de granulats légers en compression est inférieure à celle des bétons classiques réalisés avec des granulats denses. Cette résistance décroît proportionnellement

avec la densité du béton. Cependant, avec de bons granulats et de bons sables naturels, ainsi qu'une augmentation du dosage en ciment, des résistances de même catégorie que celles des bétons ordinaires peuvent être atteintes. La résistance en traction est également plus faible.

### **3) OUVRABILITE**

L'ouvrabilité est également difficile à réaliser, toujours à cause des granulats qui absorbent de l'eau. Pour y remédier, on peut faire recours à certains adjuvants, comme les entraîneurs d'air ou les plastifiants.

## **II.2. LES BETONS DE POLYSTYRENE :**

Le béton de polystyrène est un béton qui appartient à la classe des bétons de granulats légers. Il est généralement constitué de billes de polystyrène mélangées à une matrice à base de pâte de ciment ou de plâtre, ou à base de mortier. Parfois, pour un critère d'allègement, le polystyrène est utilisé dans les bétons traditionnels en remplaçant une partie des granulats ordinaires par des billes de polystyrène.

Le béton de polystyrène est un matériau qui a été utilisé très récemment ; il présente beaucoup d'avantages, notamment sur le plan technique et économique tels que :

- il est ultra léger, sans doute parmi les bétons les plus légers ;
- il est reconnu par sa faible absorption d'eau ;
- il résiste aux agents agressifs ;
- il est très économique ;
- il est considéré parmi les matériaux qui possèdent les meilleures performances thermiques et phoniques [41].

En raison de ces performances physiques, le béton de polystyrène est largement utilisé dans le domaine de la construction, on le retrouve dans la fabrication des panneaux de revêtement, dans l'isolation des planchers et des blocs de béton porteurs, ainsi que dans d'autres applications spécialisées comme les pavés et les constructions marines flottantes et dans la protection de structures militaires enterrées.

### **II.2.1. BILLES DE POLYSTYRENE EXPANSE**

#### **a) Origine et composition chimique**

Le polystyrène expansé (PSE) est un matériau alvéolaire rigide, peu dense, dont les principales utilisations sont l'isolation thermique des bâtiments et emballage des produits industriels ou alimentaires [40]. D'autre part, le polystyrène est considéré comme matériau non biodégradables, ce qui lui confère une utilité, non seulement technique et économique, mais aussi environnementale. Le polystyrène est un thermoplastique dur, c'est un polymère

vinyle. Structurellement c'est une longue chaîne d'hydrocarbonés avec un groupe phényle attaché sur certains atomes de carbone [40]. Le polystyrène est fabriqué par polymérisation radicalaire à partir d'un monomère de styrène  $C_8H_8$ .

### **b) Fabrication du polystyrène expansé**

Le polystyrène brut est un matériau plus ou moins lourd qui se présente sous forme de perles. L'expansion de ces perles est réalisée par polymérisation du styrène (perles de polystyrène cristal) additionnée d'agent porogène (pentane,  $C_5H_{12}$ ) [40].

## **II.2.2. PROPRIETES DU POLYSTYRENE**

### **a) Densité**

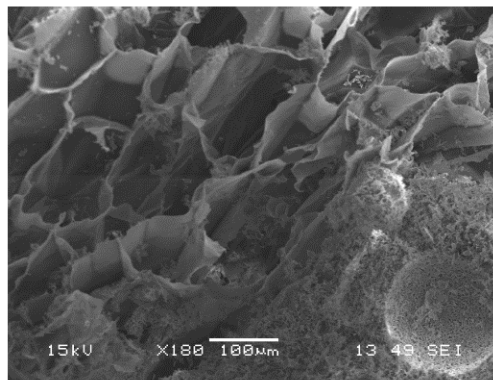
La densité du polystyrène, à l'état brut, voisine les  $1000 \text{ kg/m}^3$  [41]. Cette densité chute considérablement lorsque le polystyrène est expansé, elle sera alors comprise entre 8 et  $80 \text{ kg/m}^3$ . Il faut noter que cette différence remarquable est due à la présence de l'air dans le polystyrène expansé.

Dans un polystyrène expansé, le volume de polymère reste toujours très faible devant le volume d'air. Par exemple pour une densité de  $32 \text{ kg/m}^3$ , le polystyrène occupe 2.5% du volume total, mais représente 92% de la masse totale du polystyrène expansé [42].

Généralement, leur densité sèche est inférieure à  $50 \text{ kg/m}^3$ . En outre, pour les granulats expansés, la densité dépend de la taille de billes : plus les billes sont grosses, plus leur densité est faible. A titre d'exemple pour  $\varnothing = 1 \text{ mm}$  la densité est de  $33 \text{ kg/m}^3$ ,  $19 \text{ kg/m}^3$  pour  $\varnothing = 2,5 \text{ mm}$  et  $17 \text{ kg/m}^3$  Pour  $\varnothing = 6 \text{ mm}$  [43].

### **b) Propriétés morphologique**

Les billes de polystyrène sont parfaitement sphériques. Cela permet d'être en accord avec les modèles d'empilement classiques [44]. L'observation de la coupe d'une bille révèle une structure alvéolaire et une enveloppe constituée de deux membranes. Ceci explique, d'une part, son extrême légèreté, et d'autre part, sa totale imperméabilité à l'eau. En effet, des essais réalisés par Yamura et al. [44] ont montré que des billes de polystyrènes immergées dans l'eau pendant, un mois n'ont pas absorbé d'eau.



**Fig. I. 16 .** Image au MEB montrant les billes de polystyrène dans une matrice de plâtre (G=180x) Enfin, ces billes sont hydrophobes et présentent des charges électrostatiques en surface [44].

**b) Résistance à la chaleur**

Le polystyrène expansé connaît un début de ramollissement et de déformation à une température de 100°C.

**c) Résistance en compression**

La résistance à la compression du polystyrène dépend essentiellement de sa densité, plus il est dense, plus sa résistance est grande ; mais, à cause de sa flexibilité, le polystyrène se comporte d’une manière assez complexe [41].

Le tableau I.6 donne quelques valeurs de la résistance en compression du polystyrène expansé selon sa densité et pour une déformation de 10% selon la norme NF-T56-201 [41].

Tab I. 6. Valeurs de la résistance en compression du PSE en fonction de sa densité [41].

Référence	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	9	13	16	20	25
Contrainte (MPa)	0.03	0.6	0.9	0.12	0.15

**c) Conductivité thermique**

La conductivité thermique du polystyrène dépend de sa porosité, elle-même dépendante du procédé d’expansion. En général, elle varie entre 0.027 à 0.037 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>, ces valeurs leurs sont considérées parmi les valeurs les plus faibles de la conductivité thermique des matériaux.

**II.3. CARACTERISTIQUES PHYSICO-MECANQUES DES BETONS DE POLYSTYRENE :**

**a) Densité :** la densité des bétons de polystyrène varie selon le dosage en polystyrène, elle varie dans la gamme 300-2000 kg/m<sup>3</sup> [46].

**b) Résistance à la compression :** La résistance à la compression des bétons de polystyrène est fonction du dosage en granulats de polystyrène et de leurs tailles. Celle-ci peut être

améliorée par des ajouts, tels que la fumée de silice. Généralement, la résistance à la compression varie entre 0.2 et 23 MPa [46,47].

**c) Résistance à la traction :** elle varie entre 0.1 et 2.4MPa. Elle peut être améliorée par incorporation de fibres, telles que les fibres en acier [46,47].

**d) Retrait :** Variable en fonction du dosage en polystyrène, il peut atteindre une valeur maximale de 1.2mm/m [48].

**e) Conductivité thermique :** Les bétons de polystyrène sont caractérisés par leur pouvoir isolant. Leur faible conductivité thermique, qui est comprise entre 0.05 à 0.12 W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup> pour les bétons de construction, en témoignent cette propriété. Elle varie en fonction de la densité du béton. Le tableau I.7 donne quelques valeurs de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique sèche.

Tab I. 7. Conductivité thermique des bétons de polystyrène [44].

Masse volumique sèche $\rho_a$ (kg/m <sup>3</sup> )	300	500	700	900	1200	1500
Conductivité thermique $\lambda$ ( W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	0.065	0.14	0.15	0.33	0.39	0.7

**f) Résistance au feu :** Vu que le polystyrène fusionne à des températures assez basses, l'exposition du béton de polystyrène à des températures supérieures à 90°C engendre la fusion des granulats de polystyrène et par conséquent l'obtention d'un béton caverneux.

### **III. ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LES MATERIAUX COMPOSITES A BASE DE PLATRE**

L'état de l'art, qui a été menée dans ce sens, a été structuré dans les sous-sections suivantes :

- Études sur l'incorporation des additions dans les composites de plâtre.
- Etudes sur l'utilisation de polystyrène expansé dans les matériaux de construction.

#### **III.1. ÉTUDES SUR L'INCORPORATION DES ADDITIONS DANS DES COMPOSITES DE PLATRE**

Une grande partie des recherches sur le plâtre, en tant qu'un matériau composite, repose sur l'étude de la modification de ses propriétés par l'incorporation des additions. Par exemple, Jiang et Luan [49] incorporent de la poudre de sépiolite pour améliorer le comportement des composites de plâtre vis-à-vis de l'eau ; Huang et al. [50] incorporent du carbonate de calcium pour augmenter la résistance au feu des composites de plâtre avec du liège ; Ramezani et al. [51] incorporent de la sciure de bois pour améliorer le comportement acoustique ; quant à Hummel et al. [52], ces derniers incorporent de la zéolite au plâtre pour améliorer ces propriétés physico-mécaniques.

Cependant, la plupart des études sur l'incorporation des additions dans les composites de plâtre seul portent sur :

**a) L'augmentation de la résistance :**

Les principales additions utilisées comme renfort sont essentiellement des matériaux fibreux naturels, minéraux ou synthétiques. Parmi les études rencontrées, celles réalisées par :

- **Djoudi et al. [25]** ont essayé de résoudre des problèmes d'environnement en Algérie causés par l'abondance de fibres de palmier dattier ainsi que leur incinération ; ces auteurs ont entrepris d'utiliser ces fibres au renforcement du plâtre, afin de valoriser ces ressources biologiques. Les résultats rapportés révèlent un changement complet du comportement rhéologique du matériau, une augmentation considérable de sa résistance à la flexion et à la compression, avec une ductilité meilleure, tout en améliorant son seuil de fissuration.
- **Del Río Merino et Comino [53]** ont étudié l'influence du degré de dispersibilité de la fibre de verre E sur le comportement mécanique et la maniabilité du composite et sur son aptitude au façonnage.
- **Dalmay et al. [54]** ont étudié l'effet de l'incorporation des fibres de chanvre et des fibres de lin.
- **Zhang et al. [55]** ont analysé le renforcement des composites de plâtre avec des fibres de coton.
- **Mohandesi et al. [56]** ont étudié la résistance des composites de plâtre renforcés de fibres de polypropylène et de polyparaphénylène téréphtalamide (kevlar) répartis de manière aléatoire dans une matrice de plâtre.
- **Iucolano et al. [57]** ont étudié la résistance mécanique des composites de plâtre renforcés avec de la fibre d'abaca.
- **Lima et Faria [58]** ont analysé le renforcement des composites de plâtre avec des fibres d'avoine et de laine.
- **Leiva et al. [59]** ont étudié le comportement d'un composite avec des cendres d'enveloppe de riz en observant des résultats positifs en termes de la résistance à la compression et de la dureté de surface.

**b) L'amélioration du comportement thermique:**

Ces dernières années, de nombreuses études ont analysé l'amélioration du comportement thermique du plâtre, parmi lesquelles :

- Pichniarczyk et al. [60] ont étudié les propriétés d'un composite de plâtre sursaturé avec une solution d'acide sulfurique et de résines de silicone comme matériau de remplacement possible pour l'isolation thermique, présentant des caractéristiques similaires à celles de la laine minérale.
- Demir et Baspinar [61] ont analysé l'effet des additions de fumée de silice et de perlite sur le comportement thermique des composites de plâtre.
- Borreguero et al. [62] ont étudié l'amélioration du comportement thermique des blocs de plâtre en les ajoutant à des matériaux à changement de phase.
- Xi et al. [63] ont analysé l'amélioration des propriétés thermiques d'une plaque de plâtre additionnée de vermiculite.
- Baspinar et Kahraman [64] ont incorporé des granules de silice expansée en tant qu'agrégat d'allègement, obtenant ainsi de meilleures propriétés thermiques.
- Vimmrová et al. [65] ont étudié le comportement thermique de composites de plâtre allégés avec du sulfate d'aluminium et du carbonate de calcium, avec lesquels ils ont obtenu une réduction de densité de 70%, accompagnée de pertes de résistance mécanique de 93% en flexion et de 97% en compression, ou avec du sulfate d'aluminium et de l'acide citrique, avec lesquels ils ont obtenu une réduction de densité de 30%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique de 66% en flexion et de 77% en compression.
- Oliver [66] a conçu un panneau de plâtre doté de propriétés thermiques améliorées et incorporant des matériaux à changement de phase.
  - Cherki et al. [67] utilisaient des granulats de liège pour améliorer l'isolation thermique des panneaux de plâtre pour les faux plafonds.
  - Gencel et al. [68] ont analysé l'effet de la diatomite sur le comportement thermique des composites de plâtre.

### **b) La réduction de la densité**

La densité est un facteur qui a été étudié en profondeur pour ce matériau et même pour d'autres matériaux composites. Ce facteur est également lié au comportement thermique, après avoir trouvé trois méthodes différentes pour le réduire :

- ❖ l'introduction de trous ou d'alvéoles dans la géométrie du matériau ;
- ❖ l'occlusion de l'air dans la matrice de plâtre ;
- ❖ et l'ajout de granulats légers.

▪ **Introduction de vides ou d'alvéoles dans la géométrie du matériau**

L'une des principales applications des composites de plâtre est celle des produits préfabriqués. Vu que cette méthode ne nécessite pas l'addition d'additifs, ni des granulats, elle constitue l'un des systèmes les plus utilisés dans les éléments préfabriqués, principalement la céramique et le béton, pour obtenir des briques, voûtes, blocs, etc. En fait, de nombreux panneaux pour cloisons, comportant des trous ou des alvéoles dans leur matrice pour les alléger, ont été réalisés.

▪ **L'occlusion de l'air dans la matrice de plâtre**

La procédure la plus élémentaire pour introduire de l'air dans la matrice du composite de plâtre consiste à augmenter la quantité d'eau de mélange. Dans ce cadre, on ajoute généralement une teneur en eau plus élevée que nécessaire afin de réaliser un meilleur mélange et d'obtenir un produit plus plastique pouvant être moulé. Une fois que le plâtre est pris, l'excès d'eau s'évapore à travers la masse de plâtre, laissant une microporosité dans la matrice du composite. Cette porosité est d'autant plus grande que l'on ajoute plus d'eau que nécessaire.

Il existe plusieurs études, qui ont été menées dans ce sens, afin d'augmenter cette microporosité dans la matrice du composite ; différents additifs ont été utilisés par différents auteurs, parmi lesquels on cite :

Del Río Merino et Hernández Olivares [69] ont analysé l'effet des additifs entraînant l'air et des agents moussants commercialisés pour les mortiers et les bétons sur une matrice de plâtre et ont observé que, malgré la formation de microbulles, l'entraînant l'air ne permettent pas de réduire la densité, et avec l'utilisation de moussant, on peut réduire la densité de 7%, mais, malheureusement, cette réduction entraîne une perte importante de résistance mécanique qui est de 17% en flexion et de 52% en compression.

Vimmrová et al. [70] ont étudié le comportement thermique des composites de plâtre allégés avec du sulfate d'aluminium et du carbonate de calcium, avec lesquels ils ont obtenu une réduction de densité de 70%, accompagnée de pertes de résistance mécanique de 93% en flexion et de 97% en compression, ou avec du sulfate d'aluminium et de l'acide citrique, avec lesquels ils ont obtenu une réduction de densité de 30%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique de 66% en flexion et de 77% en compression.

Huang et al. [71] utilisaient du dioxyde de manganèse pour catalyser le peroxyde d'hydrogène en l'utilisant comme agent moussant dans les composites de plâtre.

▪ **Ajout de granulats légers**

Les granulats légers, également appelés charges légères ou granulats légers, ont été utilisés pour alléger les matériaux depuis l'Antiquité. Les granulats légers actuellement utilisés peuvent être des matières premières ou des déchets et peuvent être classés en :

**a) Minéraux naturels** : proviennent de la désintégration naturelle ou artificielle de roches telles que la ponce, les pouzzolanes ou les tufs volcaniques, ou d'un processus industriel par lequel le minerai est chauffé pour se dilater. Certains exemples de ceux-ci sont la perlite, la vermiculite ou l'argile expansée.

Il existe de nombreuses études sur l'incorporation de ces granulats légers dans les composites de plâtre, parmi lesquelles celles réalisées par :

Del Río Merino et al. [72] comparent l'effet de différents granulats légers utilisés dans les composites de plâtre pour leur application dans les éléments préfabriqués, y compris la perlite, avec lesquels ils ont obtenu une réduction de densité de 23%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique de 38% en flexion et de 14% en compression, la vermiculite exfoliée, avec laquelle ils ont réussi à réduire la densité de 13%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique de 25% en flexion et de 34% en compression et d'argile expansée, avec laquelle ils ont réussi à réduire la densité de 20%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique de 45%.

Gmouh et al. [73] et Vimmrová [70] ont analysé le comportement mécanique d'un composite de plâtre allégé à la perlite et ont observé que l'utilisation de ce granulat permettait de réduire la densité de 42%, diminuant également la résistance mécanique de 64% en flexion et de 83% en compression.

Yong et al. [74] ont étudié les propriétés d'un panneau de plâtre allégé avec de la vermiculite.

**b) Les produits organiques naturels** : tels que le liège, les cosses de céréales ou les copeaux de bois, qui sont généralement des déchets agro-alimentaires ou végétaux. Il existe plusieurs études sur l'incorporation de ces granulats légers dans les composites de plâtre, parmi lesquelles, celles réalisées par :

- Hernández Olivares et al. [75] qui ont conçu une plaque de plâtre avec des granulés de liège allégés jusqu'à 43%, avec une perte de résistance de 57% en flexion et de 76% en compression.

- Zhou et al. [76] ont étudié des composites allégés à la sciure de bois et renforcés au latex.

- Leiva Aguilera et Del Río Merino [77] ont analysé les propriétés des composites de plâtre avec différents pourcentages d'enveloppe de riz, réduisant la densité d'environ 4%, accompagnée d'une perte de résistance de 37% en flexion et de 60% en compression.

**c) Artificielles** : qui sont constitués de sous-produits industriels, tels que les scories de l'industrie sidérurgique et les cendres volantes provenant de la combustion de charbon pulvérisé dans des centrales thermiques, de sous-produits transformés, tels que les scories expansées, ou de matériaux organiques transformés, tels que certains polymères synthétiques. Dans ce dernier groupe, il existe de nombreuses études, principalement sur l'incorporation de matières organiques élaborées, parmi lesquelles on peut souligner celles réalisées par :

- González Madariaga [78] a conçu une plaque de plâtre stratifiée allégée avec un résidu de polystyrène expansé, réduisant sa densité de 56%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique en flexion et en compression de 83%.
- Karaman et al. [79] ont analysé les propriétés physiques et mécaniques des composites de plâtre contenant des résidus de bouteilles en plastique PET (polyéthylène téréphtalate) et leur éventuelle application dans les constructions agricoles et ont observé qu'avec cet agrégat, il était possible de réduire la densité et d'améliorer le comportement thermique, mais la résistance mécanique a été réduite.
- García Santos [80] a étudié les composites de plâtre allégés avec des billes de polystyrène, réduisant leur densité de 39%, accompagnés d'une réduction de la résistance mécanique de 45% en flexion et 76% en compression.
- Gutiérrez González et al. [81] ont étudié la compatibilité entre les résidus de plâtre et de polyamide afin d'obtenir un matériau léger aux propriétés thermiques améliorées, permettant une réduction de la densité de 13%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique de 59% en flexion et de 61% à la compression.
- Gutiérrez González et al. [82] qui ont incorporé des résidus de polyuréthane aux composites de plâtre, obtenant un allègement de 46%, perdant à leur tour une partie de leur résistance mécanique : 81% en flexion et une 77% en compression.
- Khalil et al. [83] qui ont étudié les propriétés des composites de plâtre avec de la fumée de silice et du gel de silice et ont observé qu'avec ces additifs, il était possible d'alléger ces composites.
- Herrero et al. [84] ont analysé l'influence de la proportion et de la granulométrie des ajouts de déchets de pneumatiques dans les composites de plâtre, en réduisant sa densité de 37%, accompagnée d'une perte de résistance mécanique : 86% en flexion et 96% en compression.

- Jiménez Rivero et al. [85] ont analysé les propriétés des composites de plâtre contenant des résidus de caoutchouc provenant des enveloppes d'isolation de tuyaux, en réduisant la densité de 24%, accompagnées d'une perte de résistance mécanique de 54% en flexion et de 67% en compression.

### III.2. ÉTUDES SUR L'UTILISATION DE POLYSTYRÈNE EXPANSÉ DANS DES COMPOSÉS DE PLÂTRE

Actuellement, le polystyrène est utilisé dans le secteur de la construction, principalement comme matériau d'isolation thermique, bien qu'il s'agisse d'un polymère sur lequel des recherches approfondies ont été menées en le combinant avec d'autres matériaux, notamment dans le cas du polystyrène expansé, en mettant en évidence les études suivantes :

- Plâtre allégé de billes de polystyrène expansé et renforcé de fibres de verre [72 ;82] ou de déchets de polystyrène expansé [86].
- Briques allégées avec du polystyrène expansé [87].
- Panneaux de contreplaqué en polystyrène et fibre de palme [88].
- Mortier renforcé avec une microfibre de carbone et avec des microsphères de polystyrène pour empêcher les microfissures [89].
- Béton cellulaire fabriqué avec du polystyrène expansé [91-94] ou avec des déchets de polystyrène expansé [95].
- Composite polymère de déchets de polystyrène expansé avec des résidus de poudre de ciment [96].
- Ciment contenant du polystyrène résistant aux chocs en remplacement du sable [97].
- Ciment aux propriétés isolantes incorporant du polystyrène expansé et des additifs pour améliorer l'adhésion [98].
- Blocs de béton cellulaire constitués de polystyrène expansé et de pierre ponce [99] ou avec des déchets de polystyrène expansé [100].

Comme synthèse des recherches approfondies ont été menées sur les résultats des travaux d'autres chercheurs ont réalisés avec des composites de plâtre allégés avec différents granulats légers. Le tableau 8 répertorie les études pour lesquelles des données suffisantes ont été trouvées. Comme on peut le voir, 9 références des granulats légers qui ne sont pas des déchets et 6 références de déchets ont été trouvées. Dans tous les résultats, les déchets de polystyrène expansé est celui avec la plus grande réduction de densité, suivi du résidu de polyamide et du déchet de caoutchouc.

**TAB I. 8** Résultats obtenus dans différentes études de recherche sur les composites de plâtre allégés.

Granulats légers	Résultats	Densité		Dureté du surface		Résistance à la flexion		Résistance à la compression		Capacité thermique	
		g/cm <sup>3</sup>	%Δ	Shore C	%Δ	N/mm <sup>2</sup>	%Δ	N/mm <sup>2</sup>	%Δ	W/m.K	%Δ
<b>Diatomite</b> (Gencel, et al., 2016)	REF	1.00				0.80		1.10		0.494	
	c. allégé	0.92	-8%			0.80	0%	1.60	45%	0.390	-21%
<b>Sable (&lt;90 μm)</b> (Khalil, et al., 2013)	REF	1.16						12.00			
	c. allégé	1.01	-13%					9.00	-25%		
<b>Vermiculite</b> (Del Río Merino, et al., 1998)	REF	0.95		68		3.23		5.68			
	c. allégé	0.82	-14%	50	-26%	2.40	-26%	3.70	-35%		
<b>Fumée de silice</b> (Khalil, et al., 2013)	REF	1.16						12.00			
	c. allégé	1.00	-14%					7.00	-42%		
<b>Gel de silice</b> (Khalil, et al., 2013)	REF	1.16						12.00			
	c. allégé	0.94	-19%					8.00	-33%		
<b>Argile expansée</b> (Del Río Merino, et al., 1998)	REF	0.95				3.23					
	c. allégé	0.76	-20%			1.75	-46%				
<b>Résidu de polyuréthane</b> (Gutiérrez-González,	REF	1.71		93		5.92		15.49		0.306	
	c. allégé	1.07	-37%	10	-89%	0.50	-92%	1.10	-93%	0.101	-67%
<b>PSE</b> (García Santos, 2009)	REF	1.14				3.11		12.37			
	c. allégé	0.69	-40%			1.71	-45%	2.87	-77%		
<b>Perlite</b> (Vimmrová, et al., 2011)	REF	0.95				4.00		12.00		0.390	
	c. allégé	0.55	-42%			1.44	-64%	2.00	-83%	0.120	-69%
<b>Déchets de liège</b> (Hernández-Olivares, et	REF	1.13				5.11		9.65			
	c. allégé	0.64	-43%			2.19	-57%	2.29	-76%		
<b>Déchets de pneus</b> (Herrero, et al., 2013)	REF	1.22		91		7.50		23.53		0.250	
	c. allégé	0.65	-46%	14	-85%	0.78	-90%	0.55	-98%	0.178	-29%
<b>Résidu de polyamide</b> (Gutiérrez-González, et al., 2012)	REF	1.48		93		5.92		15.49		0.306	
	c. allégé	0.75	-49%	65	-30%	0.33	-94%	1.32	-91%	0.161	-47%
Déchets de caoutchouc (Jiménez Rivero, et al., 2014)	REF	1.09		89		5.97		13.36			
	c. allégé	0.56	-49%	58	-35%	1.42	-76%	1.04	-92%		
<b>Déchets de polystyrène</b> (González Madariaga, 2005)	REF	0.95				1.85		4.30			
	c. allégé	0.41	-57%			0.10	-95%	0.70	-84%		
<b>Perlite</b> (Del Río Merino, et al., 1998)	REF	0.95		68		3.23		5.68	-14%		
	c. allégé	0.73	-23%	70	4%	1.99	-38%	4.86			

### **III.3. NECESSITE D'OPTIMISER LE PLATRE EN TANT QUE MATERIAU DE CONSTRUCTION**

#### **ACTUEL**

Le secteur de la construction en Algérie est l'un des activités qui a le moins évolué ces dernières années. Les matériaux les plus traditionnels sont toujours les plus utilisés et, dans certains cas, leur utilisation entraîne un impact important sur l'environnement, qui n'est pas pris en compte, mais qui a un impact important à long terme.

Le plâtre, bien qu'il soit un matériau utilisé depuis l'Antiquité, n'a toujours pas évolué. Bien que de plâtre soit mentionnée et que des additions soient utilisées pour améliorer ses propriétés, il n'est toujours pas fait mention d'un plâtre de nouvelle génération, un plâtre adapté à la société actuelle dans lequel le souci de l'environnement déjà fait partie de notre mode de vie.

Il ressort de l'analyse effectuée à la fois dans l'introduction et dans l'état de l'art que l'une des stratégies possibles pour économiser la consommation de plâtre dans le secteur de la construction et améliorer son comportement thermique consiste à le remplacer partiellement par des granulats légers, tels que des billes de polystyrène expansé et sable de dunes.

### **IV. BILAN THERMIQUE DU BÂTIMENT**

L'enveloppe joue un rôle de filtre thermique qui permet de créer un microclimat à l'intérieur du bâtiment indépendamment des fluctuations météorologiques extérieures [86]. La composition de l'enveloppe est un élément déterminant des caractéristiques de ce filtre. En fonction des propriétés des matériaux et de la structure qui compose l'enveloppe, le bâtiment échange, avec l'extérieur, de la chaleur de façon permanente. Il existe deux types de déperdition : par transmission ou par ventilation [101].

#### **IV.1. STRATEGIE BIOCLIMATIQUE DANS LES MILIEUX ARIDES**

L'un des climats qui caractérisent l'Algérie est le climat aride qui se distingue par un excès de chaleur et de sécheresse avec des précipitations rares et irrégulières. Les principales caractéristiques des milieux arides sont :

- hautes intensités des radiations solaires (longue durée de rayonnement) ;
- température sol-air diurne très élevée, un écart important entre la température diurne et nocturne et une faible humidité relative spécialement en été ;
- les vents chauds et secs [101].

Dans la zone aride désertique où le confort thermique recherché est celui du confort d'été, l'homme a adopté plusieurs techniques visant à contrôler les échanges thermiques par le

choix de bons matériaux et stratégies permettant ainsi la minimisation et la bonne gestion thermique. Bencheikh H. [102] a regroupé les techniques d'adaptation passives dans les zones arides et les classes en deux grandes familles ; les techniques urbanistiques, qui sont le choix du site d'implantation et les tissus compacts, et les techniques architecturales, qui sont les techniques de mouvement de l'air, les protections solaires, la ventilation, l'utilisation de la végétation, les techniques d'humidification et d'évaporation, la masse thermique (inertie), etc. Dans notre cas, et comme on s'intéresse au choix et à l'adaptation des matériaux dans les zones arides, on s'intéresse à l'exploitation de l'inertie de l'enveloppe.

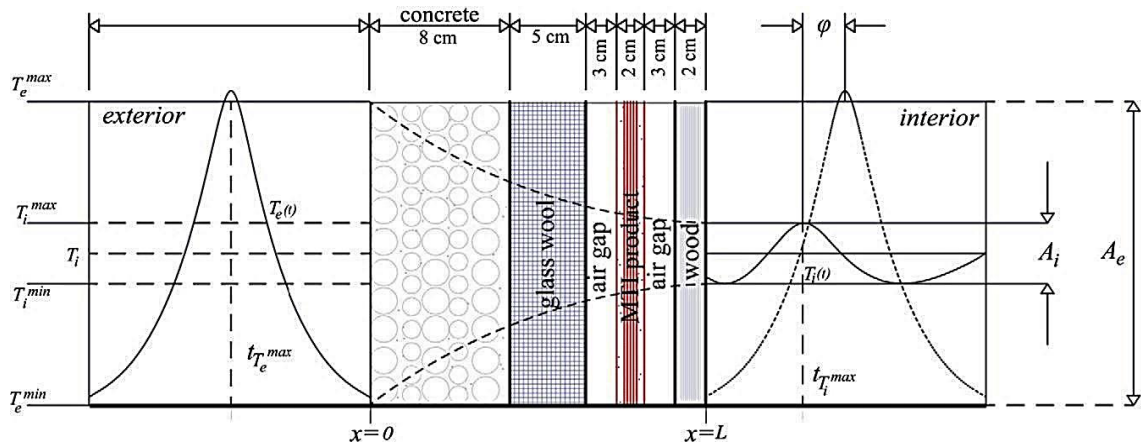
Plusieurs travaux ont montré que la conception de l'habitat traditionnel dans les climats chauds et secs est adaptée aux conditions climatiques du site et est plus confortable que l'habitat moderne. En général, la stratégie de l'architecture traditionnelle vise à avoir un long temps de retard de transfert de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur avec une enveloppe à haute inertie thermique [103].

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 ( $\Phi$ ) ou déphasage et le facteur d'amortissement ( $f$ ) [104], autrement dit, deux paramètres de l'inertie thermique [105]. 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 [106,107]. 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 [108,109].

La représentation schématique du temps de retard et du facteur d'amortissement est montrée sur la Fig. I. 18. Le temps de retard ( $\Phi$ ) 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  $A_e$  [104].



**Fig. I. 17.** Représentation schématique du temps de retard et du facteur d'amortissement [110]

### IV.3. METHODES D'ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE THERMIQUE DU BATIE

Il y a plusieurs méthodes d'évaluation de la performance thermique du bâtiment, à savoir, les méthodes de simulations numériques, telle que le logiciel EnergyPlus qui est utilisé par plusieurs chercheurs à cause de son efficacité [111-112], le logiciel TRNSYS [113-114], la méthode numérique [106] et enfin la méthode in situ qui consiste à placer des sondes à l'intérieur du mur [115]. 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 thermiques, etc. [104].

### CONCLUSION

Il ressort, de l'étude bibliographique de cette partie, que malgré la diversité des actions de recherche dans la filière plâtre dans le monde, il n'existe pas encore des méthodes connues universellement à adapter pour la formulation et la caractérisation des bétons de plâtre. Donc les recommandations de construction avec le plâtre en Algérie sont venues combler un vide existant dans ce domaine. Elles ont été élaborées sur la base des travaux entrepris par le C.N.E.R.I.B (essais en labo, prototypes, etc.).

L'un des buts de développement durable est la rationalisation de l'utilisation de l'énergie. L'efficacité énergétique dans le bâtiment est un volet d'action de plusieurs intervenants, les normes visant la rationalisation de la consommation énergétique jouent un rôle important dans le maintien de ce concept. C'est avec l'optimisation de l'aspect technique et normatif que les bâtiments à grande efficacité énergétique, soit généralisée et non seulement des prototypes servant dans le discours politique.

Nous avons également essayé de recueillir le maximum des études effectués par quelques auteurs sur les propriétés physico-chimiques et minéralogique des composites en plâtre qui contribuent à la valorisation et au développement des ressources naturelles et locales.

Le plâtre permet de plus, en association avec des matériaux isolants minéraux ou de synthèse ayant des conductivités thermiques très faibles, qui sont des matériaux spécifiques de l'isolation, mais qui ne constituent pas comme lui des matériaux de construction, de réaliser des systèmes d'isolation efficaces.

Les adjuvants améliorent la résistance et augmente la durée de prise du plâtre comme la chaux éteinte avec une faible teneur de 6% à 10%.

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 :** **MATÉRIAUX UTILISÉS ET TECHNIQUES EXPÉRIMENTALES**

### **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 composites étudiés, alors que la deuxième partie est réservée à la description des techniques expérimentales utilisées.

### **I. MATIERES PREMIERES**

Les composants essentiels de notre béton sont le plâtre, les billes de polystyrènes, le sable de dune et l'eau de gâchage ainsi que la chaux comme retardateur de prise.

#### **I.1. PLATRE**

Le plâtre utilisé est commercialisé par l'usine « SPA Oasis Plâtre-Ghardaïa- » de la zone industrielle de Bounoura wilaya de Ghardaïa, il est disponible dans le marché dans des sacs de 40kg.

##### **I.1.1. CARACTERISTIQUES CHIMIQUES ET MINERALOGIQUES**

Les résultats de l'analyse chimique du plâtre utilisé sont présentés par la figure II.1 et le tableau II.1. Les résultats ainsi obtenus montrent que le plâtre utilisé contient environ 96% de sulfate de calcium dihydraté ( $\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$ ), soit plus de 90%, ce qui permet de le classer en classe I [8].

Il est clair d'après le tableau II.1, que les deux espèces les plus prédominantes sont le  $\text{SO}_2$  et le  $\text{CaO}$ , ce qui confirme que le sulfate de calcium est le constituant principal du plâtre utilisé [116]. Même l'analyse chimique menée par diffraction des rayons X (Fig. II.1) conduit à la même conclusion.

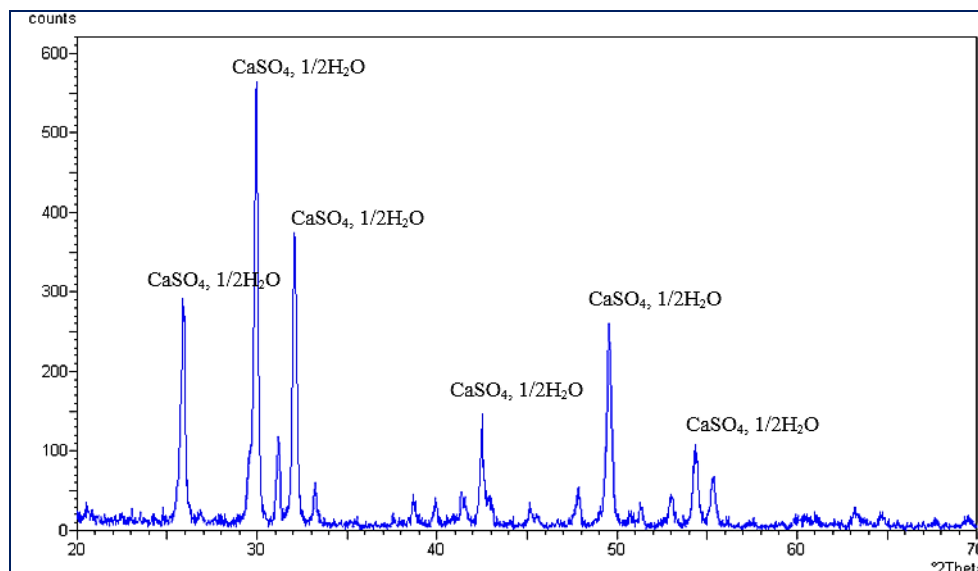


Fig II. 1. Diffractogramme de la poudre du plâtre utilisé.

Tab II. 1. Analyse chimique du plâtre utilisé.

	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	KO	CL	Autres	Perte au feu
Pourcentage (%)	3.70	0.10	0.08	36.15	0.53	52.95	0.09	0.03	0.002	0.978	5.39

### I.1.2. PROPRIETES PHYSIQUES

Les résultats des propriétés physiques de ce plâtre sont donnés dans le tableau II.2.

Tab II. 2. Propriétés physiques du plâtre utilisé [102].

Caractéristiques physiques	Masse volumique apparente (kg/m <sup>3</sup> )	823	
	Masse volumique absolue (kg/m <sup>3</sup> )	2521	
	Compacité (%)	32	
	Porosité (%)	68	
	Surface spécifique cm <sup>2</sup> /g.	2533.27	
Caractéristiques de la pâte pure du Plâtre utilisé	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	1280	(E/P=0.60)
	Résistance à la flexion (MPa)	2.5	
	Résistance à la compression (MPa)	6.0	
	Conductivité thermique (W. m <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> )	0.5	

### I.1.3. FINESSE DE MOUTURE

La norme NFB 12-301 distingue les plâtres de construction selon la finesse par tamisage, le contrôle des plâtres est souvent effectué en usine à l'aide des tamis d'ouverture 0,8, 0,4 ou 0,2

mm [117]. La finesse par tamisage sur un échantillon de 100 g de plâtre de construction est comme dans le tableau suivant :

**Tab II. 3.** Finesse des plâtres de construction

Tamis		Refus r (en %) de la masse initiale	
Ouverture (mm)	Module	PGC	PFC
0.8	30	$5 \leq r < 20$	$r \leq 2$
0.4	27	$20 \leq r < 40$	$r \leq 15$
0.2	24	$\leq 40$	$r \leq 35$

**PGC** : Plâtre Gros de Construction, à prise rapide

**PFC** : plâtre fin de construction

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau II.4

**Tab II. 4.** Finesse de mouture du plâtre.

Tamis		Refus (r %) de la masse initiale	
Ouverture (mm)	Module	1	2
0.8	30	6.9	5.2
0.4	27	12.2	4.5
0,2	24	15,2	20,3

D'après les résultats obtenus qui sont montrés dans le tableau II.4, on peut remarquer que pour le tamis 0,8 mm,  $5 < r = 6,9 < 20$  et  $5 < r = 5,2 < 20$ , alors le plâtre utilisé est un plâtre gros de construction [117].

#### **I.1.4. TEMPS DE PRISE ET TAUX DE GACHAGE A SATURATION DU PLATRE**

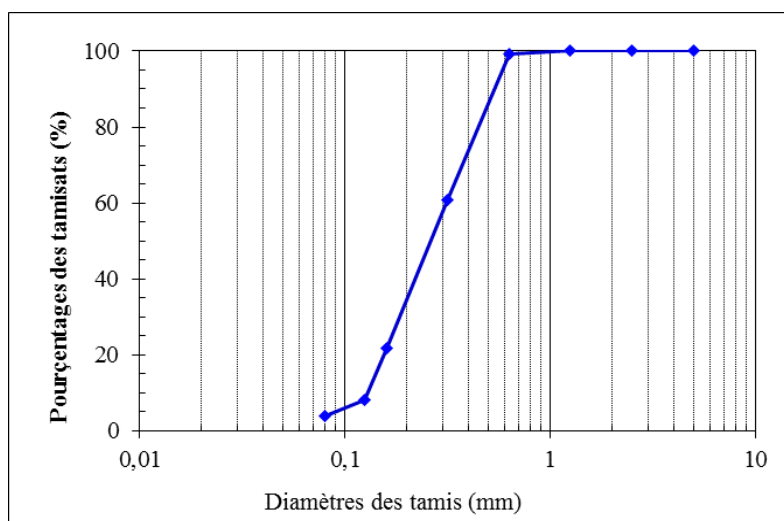
Les temps du début et de la fin de prise, sont mesurés à l'aide d'un appareil analogue à l'aiguille de VICAT (utilisée pour les ciments). On a enregistré un temps très court de 7 minutes, d'où la nécessité d'un retardateur de prise. On a utilisé la chaux aérienne comme retardateur de prise, car elle diminue la solubilité de ce dernier et permet d'augmenter son temps d'emploi. En plus elle n'affecte pas ses propriétés mécaniques. La quantité de gâchage à saturation est la quantité de plâtre en grammes, humidifiée lors de son versement dans 100 g d'eau. Cette valeur est déterminée selon la norme NFB 12- 401. Pour le plâtre utilisé, on a trouvé une valeur  $P / E = 1.67$ , d'où un rapport  $E/ P = 0.60$  et qui est recommandé par le C.N.E.R.I.B [8].

## I.2. SABLE DE DUNE

Les régions du sud disposent de grands gisements de sable de dune ; ce sable est non ou peu exploité. Afin de valoriser ces richesses naturelles et du point de vue environnemental, on a choisi le sable de dune dans la présente étude ; ce sable provient de la région d'oasis nord de la ville de Laghouat.

### I.2.1. PROPRIÉTÉS PHYSIQUES

Les résultats de l'analyse granulométrique, illustrés par la Figure II.2, montrent que ce sable est de classe granulaire 0/0.63mm présentant une granulométrie continue et serrée. La valeur de l'équivalent de sable montre qu'il est très propre et exempts de matières gypseuses et de matières organiques. Ce sable est fortement recommandé pour la production des bétons et mortier de plâtre de bonnes qualités [8]. Ses propriétés physiques sont présentées dans le tableau II.5.



**Fig II. 2.** Analyse granulométrique du sable de dune utilisé.

**Tab II. 5.** Propriétés physiques de sable de dune

Caractéristiques	$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\gamma_s$ (kg/m <sup>3</sup> )	$M_f$	$C_A$ (%)	P (%)	$ES_v$	$ES_p$
Sable 0 /0.63 mm	1428	2596	1.18	55	45	78	86

### II.2.2. ANALYSE MINÉRALOGIQUE ET CHIMIQUE

Les résultats obtenus de la DRX affirment que le sable utilisé est un sable purement siliceux (Figure II.3), d'où la vérification de la première condition imposée par les recommandations [8].

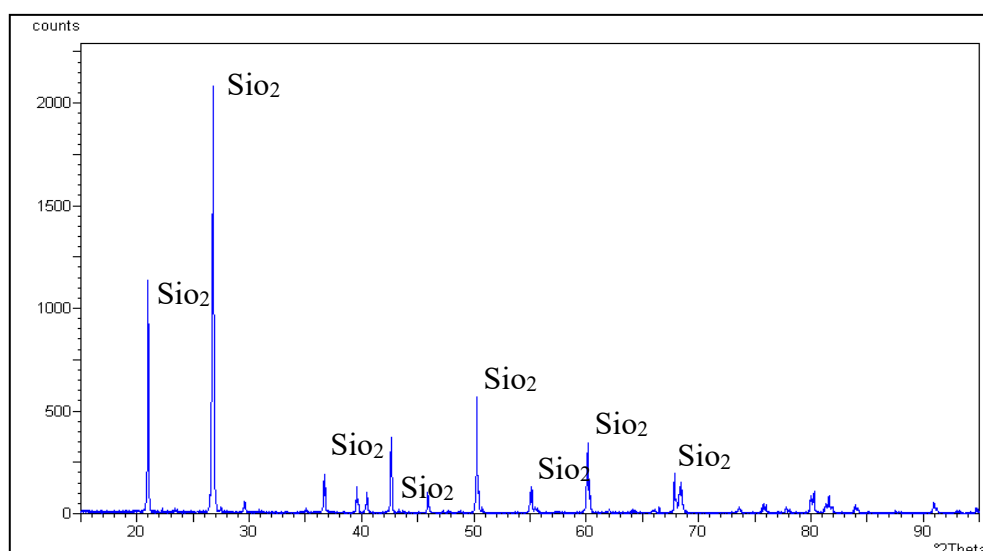


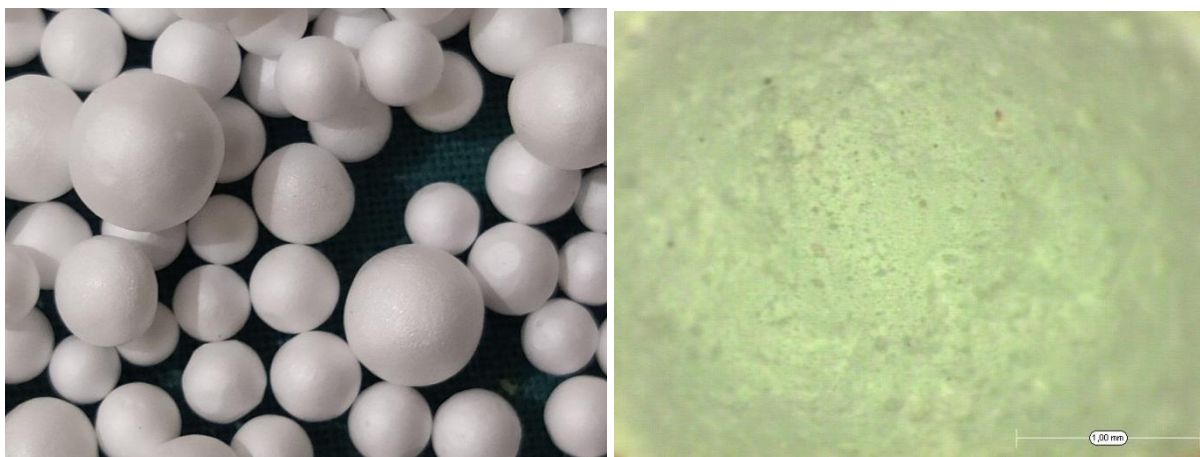
Fig II. 3. Diffratogramme aux rayons X du sable de dune.

### I.3. GRANULATS DE POLYSTYRENE EXPANSE

Les billes de polystyrènes expansés utilisées ont été ramenées de la société Algérienne de polystyrène (Fabrication de panneaux, plaques et emballage en polystyrène), zone industrielle de Aïn Oussara, Djelfa.

Ce sont des granulats organiques artificiels ; les échantillons se présentent sous forme de billes parfaitement sphériques ; l'enveloppe extérieure de ces perles est lisse et d'un aspect serré, ce qui les rend hydrophobes (figure II.4) ; elles demeurent donc imperméables, même sous forte pression d'eau [63].

Le polystyrène expansé est très bien connu pour ses performances thermiques et largement utilisé dans l'isolation thermique des bâtiments sous la forme de panneaux de 5 cm d'épaisseur placés entre deux cloisons en matériau. En effet, on va étudier, dans ce travail, l'influence de la grosseur des granulats sur les caractéristiques physico- mécaniques et thermiques des bétons de plâtre légers à base de granulats de polystyrène expansé. Trois classes granulaires sont utilisées : 3.15 ,4 et 5-7 mm. Les principales caractéristiques physiques des polystyrènes utilisés, qui semblent correspondre à celles de la littérature, sont énumérées dans le tableau II.6.



a) Aspect normal

b) Vue au microscope optique : G=175

**Fig II. 4.** Aspect général d'une bille de polystyrène expansé.

### **I.3.1. MASSES VOLUMIQUES**

- La masse volumique absolue est généralement déterminée à l'aide d'un pycnomètre (Figure II.5). Cet essai est régi par la norme NF P-18.309.
- La masse volumique apparente est déterminée à l'aide d'un récipient selon la norme NFP 18-555. D'après les résultats obtenus, les masses volumiques des granulats de polystyrène expansé sont accord avec la littérature [21,66].



**Fig II. 5.** Pycnomètre rempli d'eau + échantillon.

### **I.3.2. CONDUCTIVITE THERMIQUE DE POLYSTYRENE**

L'isolation thermique des constructions est généralement réalisée sous forme de panneaux de 5cm entreposés entre deux cloisons. La conductivité thermique du polystyrène dépend de sa porosité, elle-même dépendante du procédé d'expansion. En générale elle varie entre 0.027 à 0.037 W.m<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup> [66]. Ces valeurs sont considérées parmi les valeurs les plus faibles de la

conductivité thermique des matériaux. La Figure II. 6 montre le dispositif utilisé pour la détermination des caractéristiques thermo-physique du polystyrène. D'après le tableau II.6, les résultats ainsi obtenus sont en accord avec ceux de la littérature ( $0.028 \text{ W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  est incluse dans l'intervalle  $0.027$  à  $0.037 \text{ W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ).



Fig II. 6.Schéma de la sonde TPS (mesure caractéristiques thermiques du polystyrène).

Tab II. 6. Propriétés physiques des granulats de polystyrène.

Diamètre des billes de polystyrène	3.15 mm	4 mm	5-7 mm
Masse vol. apparente ( $\text{kg/m}^3$ )	22	19	12.13
Compacité (%)	61	65.5	65.57
Porosité (%)	39	35.5	34.43
Conductivité thermique « $\lambda$ » ( $\text{W. m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	0.028	0.028	0.028
Diffusivité thermique « $a$ » ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )	1.23	1.23	1.23
Chaleur spécifique « $c$ » ( $\text{MJ. m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$ )	0.022	0.022	0.022

#### I.4. CHAUX

La chaux utilisée dans cette étude est un produit de l'usine de fabrication de chaux de la région de Saïda. L'analyse chimique réalisée au laboratoire de l'unité de fabrication de la chaux de Saïda a donné les résultats récapitulés dans le tableau II.7.

Tab II. 7.Analyse minéralogique et chimique de la chaux utilisée [120].

Composition chimique	Pourcentage
Humidité	/
CaO	67.4%-73.25%
MgO	<0.4%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<2%
AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	<1%
SiO <sub>2</sub>	<2.2%
SO <sub>3</sub>	<1%
K <sub>2</sub> O+NaO	<0.4%
CO <sub>2</sub>	<5%
CaCO <sub>3</sub>	<10%
Ca(OH) <sub>2</sub>	<80%
Constance volumique	Bonne
Insoluble	<0.35%

On constate que la chaux éteinte utilisée possède une faible concentration en éléments oxydes, comme les silicates  $\text{SiO}_2$ , et aluminates  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et une forte concentration en chaux libre  $\text{CaO}$ . L'analyse chimique par rayons X (Diffractométrie) de la chaux hydraulique a montré l'existence des composés suivants : Carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) et Hydroxyde de calcium ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), comme le montre la Figure II. 7.

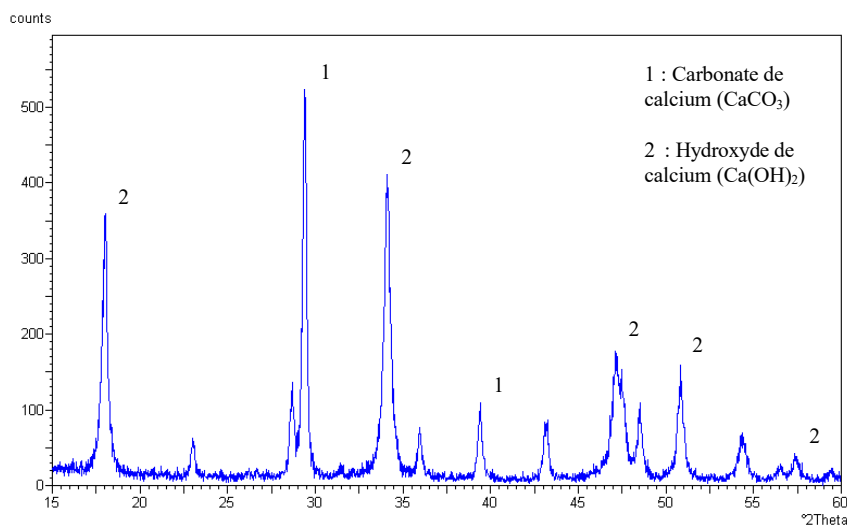


Fig II. 7. Analyse chimique par DRX de la chaux hydraulique.

Le tableau II.8 résume quelques propriétés physiques de la chaux utilisée.

Tab II. 8. Propriétés de la chaux utilisée

Masse volumique absolue ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Masse volumique apparente ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )	Surface spécifique ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )	Temps début de prise (jour)	Temps fin de la prise (jour)
$2750 \pm 23$	$666 \pm 8$	$650 \pm 16$	1	3

Les travaux de Djoudi [114] montrent que le temps de prise du plâtre utilisé évolue avec le pourcentage de la chaux ajoutée jusqu'à la valeur de 6 %; au-delà de cette dernière, le temps de prise décroît (Figure. II.8).

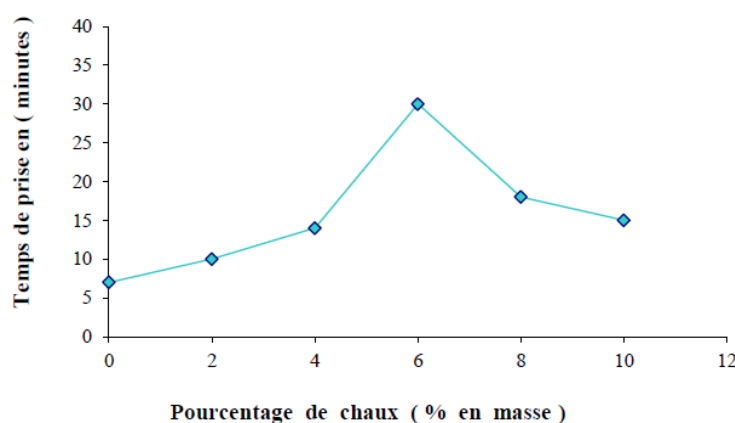


Fig.II. 8. Influence du pourcentage de la chaux sur le temps de prise du plâtre utilisé [114].

#### **I. 4. EAU DE GACHAGE**

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, 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 [121-122], de plus, elle ne nécessite aucun essai (NFEN 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. Une analyse physico-chimique a été faite au laboratoire de l'EPDEMI 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 composite.

#### **II. TECHNIQUES DE MESURE EXPERIMENTALES**

La plupart des chercheurs considèrent l'étude de la densité comme une analyse physique importante, car la densité est le facteur le plus déterminant dans les composés allégés. Par conséquent, la porosité est également un facteur déterminant, car une grande partie des propriétés des matériaux composites dépendent de l'indice de porosité. [Par exemple, Khalil et al. ont étudié la densité, la porosité et la résistance à la compression de leur composite [83] et Gencel et al. ont analysé la densité, la porosité, la résistance à la flexion et la résistance à la compression ] [68]]. En outre, certains chercheurs jugent essentiel d'intégrer davantage une étude microstructurale, comme Gutiérrez-González et al. par exemple, qui ont analysé la microstructure d'un composite de plâtre avec des résidus de polyamide au microscope électronique à balayage [82].

Par ailleurs, d'autres chercheurs effectuent d'autres types de tests pour étudier d'autres propriétés comme Jiménez Rivero et al. qui analysent le comportement contre l'humidité à l'aide du l'essais d'absorption d'eau par capillarité [85], Del Río Merino qui analyse le comportement acoustique [92], et Herrero et al. (et même d'autres) qui analysent le comportement thermique à partir de l'étude de la conductivité thermique [84].

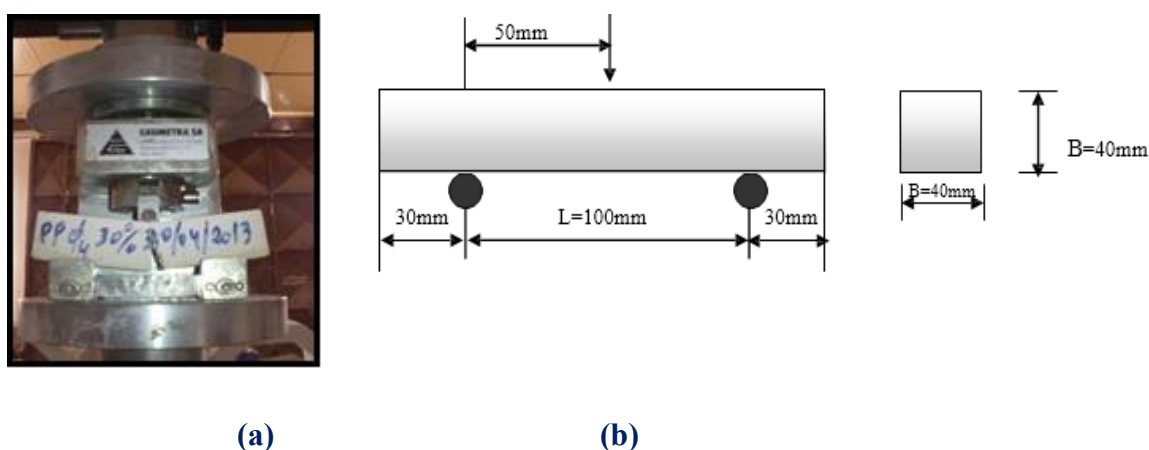
Pour en faire la même chose et afin de bien apprécier le comportement des composites étudiés, les matières premières et les composites ainsi formulés sont expérimentalement caractérisés selon des normes appropriées. Pour les matières de bases, les caractéristiques physicochimiques ont été déterminés, et pour les composites, les comportements physique,

mécanique, thermique et enfin la durabilité vis-à-vis des milieux hygrométriques et des milieux chimiques agressives ont été analysés.

## II. 1. 1. PROPRIETES MECANIQUES DES COMPOSITES

### II. 1. 1.1. TRACTION 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 a été réalisé comme montré par la Figure II. 9a. 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 (4x4x16 cm<sup>3</sup>) à raison de trois à quatre éprouvettes pour chaque composition. Plus de détails sur cet essai sont montrés sur la Fig. II. 9b.



**Fig II. 9.** Dispositif de l'essai de Traction par Flexion.

### II. 1. 1. 2. ESSAI DE 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 résultant de l'essai de flexion, entre les plateaux de la presse sous des sections de 40x40 mm<sup>2</sup> (Fig.II.10). 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.

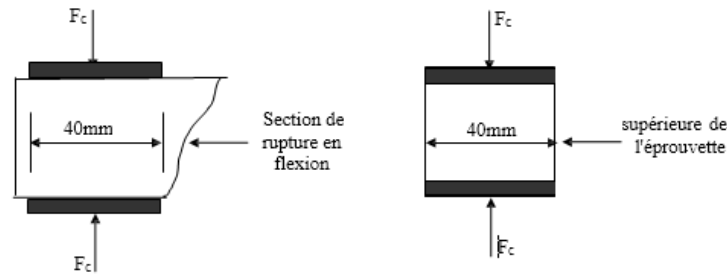


Fig II. 10. Détail de l'essai de compression.

**II.2. POROSITE :**

Pour un matériau de construction, la porosité est une caractéristique très importante, car elle influe directement sur les caractéristiques physico-mécaniques des bétons et mortiers ainsi formulés, comme la masse volumique, la résistance à la compression, le module d'élasticité, la conductivité thermique, etc. Plus la porosité est faible, plus le béton est dense et plus sa résistance est grande, par contre son pouvoir isolant est médiocre.

La porosité du béton provient de celle de la matrice et celle des granulats. Elle est exprimée en pourcentage et représente la fraction du volume des vides dans le matériau par rapport au volume total du composite ; elle est donnée par la relation :

$$n = \frac{V_v}{V_T} = n_g + n_m \dots\dots\dots (II.1)$$

- $V_v$  : volume des vides ;
- $V_T$  : volume total ;
- $n_g$  : porosité des granulats,
- $n_m$  : porosité de la matrice.

Pour la présente étude, la procédure suivante a été utilisée pour la détermination de la porosité des bétons élaborés :

Si on prend une éprouvette 4x4x16 cm<sup>3</sup>, on désigne par  $V_m$  le volume de la matrice et par  $V_g$  le volume des granulats. Le volume total de l'éprouvette est donc :

$$V_T = V_m + V_g \dots\dots\dots (II.2)$$

Si  $n_m$  et  $n_g$  désignent respectivement les porosités de la matrice et des granulats alors la porosité totale sera :

$$n_T = n_m + n_g \dots\dots\dots (II.3)$$

Soit :

$$n_T = \frac{V_v}{V_T} = \frac{V_{vm} + V_{vg}}{V_T} \dots\dots\dots(\text{II.4})$$

$$n_T = \frac{n_m \times V_m + n_g \times V_g}{V_T} \dots\dots\dots(\text{II.5})$$

Ou encore :  $n_T = n_m \times \frac{V_m}{V_T} + n_g \times \frac{V_g}{V_T} \dots\dots\dots(\text{II.6})$

Et puisque :  $V_m = V_T - V_g$  alors on peut écrire la relation II-6 de la manière suivante :

$$n_T = n_m \varepsilon_m + n_g \times \varepsilon_g \dots\dots\dots(\text{II.7}).$$

$\varepsilon_m = \frac{V_m}{V_T}$ : Étant la proportion volumique de la matrice relativement au volume total de l'échantillon.

$\varepsilon_g = \frac{V_g}{V_T}$ : Étant la proportion volumique des granulats relativement au volume total de l'échantillon. Celle-ci est variable selon le dosage en granulats. Cette proportion se calcule théoriquement par :

$$\varepsilon_g = \frac{V_g}{V_T} = 1 - \frac{V_m}{V_T} \dots\dots\dots(\text{II.8})$$

Si  $\rho_a = \frac{M_T}{V_T}$  et  $\rho_m = \frac{M_m}{V_m}$  sont respectivement les masses volumiques apparentes de

l'échantillon de béton et de la matrice de référence ( $\frac{V_g}{V_T} = 0$ ). Alors l'équation II.8 devient

après simplification :

$$\varepsilon_g = \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m - \rho_g} \dots\dots\dots(\text{II.9})$$

D'autre part, la proportion volumique de la matrice dans l'échantillon de béton, notée  $\varepsilon_m$  est donnée par :

$$\varepsilon_m = \frac{V_m}{V_t} = 1 - \varepsilon_g = \frac{\rho_a - \rho_g}{\rho_m - \rho_g} \dots\dots\dots(\text{II.10})$$

En remplaçant les expressions de  $\varepsilon_g$  et  $\varepsilon_m$  dans l'équation II.7, on obtient :

$$n_T = n_m \left( \frac{\rho_a - \rho_g}{\rho_m - \rho_g} \right) + n_g \left( \frac{\rho_m - \rho_a}{\rho_m - \rho_g} \right) \dots\dots\dots \text{(II.11)}$$

Où :

$\rho_g$  est la masse volumique apparente de la matière première des granulats ;

$n_g$  est la porosité des granulats :  $n_g = 1 - \frac{\rho_g}{(\rho_g)_s}$

$(\rho_g)_s$  : La masse volumique absolue ou de la matière solide des granulats.

$n_m$  est la porosité de la matrice :  $n_m = 1 - \frac{\rho_m}{(\rho_m)_s}$

$(\rho_m)_s$  : la masse volumique absolue de la matrice (kg/m<sup>3</sup>) ; elle est déterminée par le densimètre ‘Le Chatelier’, après broyage d’une fraction de la matrice, jusqu’à une finesse limite, à l’aide d’un broyeur à jarre [115].

**II. 3. CARACTERISATION THERMO-PHYSIQUES**

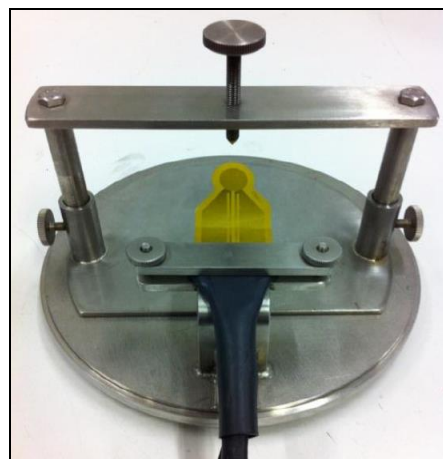
La conductivité thermique, la diffusivité et la chaleur spécifique sont les propriétés thermiques étudiées. Elles sont mesurées sur des échantillons découpés et taillés à partir des éprouvettes de dimensions 4 x 4 x 16 cm<sup>3</sup>, âgées de 28 jours. Les échantillons obtenus sont de forme prismatique 4 x 4 x 2 cm<sup>3</sup> (Figure II.11a). Le dispositif de mesure utilisé est un Hot-Disk TPS 500 de Thermo-concept fonctionnant sur le principe de source plane transitoire TPS. Le principe du système est de fournir au matériau une puissance constante pendant un temps défini pour générer une augmentation de température. Le dispositif est composé d’une centrale d’acquisition des données, une sonde et un ordinateur (Figure II.11a, c). La sonde choisie, de rayon 3,189 mm et de type kapton consiste en une double spirale de nickel très fine (épaisseur 10 µm). Elle est à la fois la source de chaleur et la sonde de température.

Avant toute mesure, le système de mesure doit être vérifié avec des disques étalon. La sonde est ensuite placée en sandwich entre deux échantillons (Figure II.11.a). Les résistances de contact liées aux couches d’air entre le matériau et la sonde sont réduites au maximum. Pour obtenir une bonne planéité des surfaces en contact avec la sonde, les échantillons sont convenablement poncés. Au cours de l’impulsion de chaleur, la résistance thermique de la sonde est mesurée. Cette résistance thermique permet de déterminer l’augmentation de température de la sonde qui est liée à la conductivité thermique, la capacité thermique et la

diffusivité thermique de l'échantillon. Les valeurs de ces derniers sont fournies par le logiciel d'acquisition et de traitement des données.



a) Système d'acquisition connecté à la sonde



b) Sonde et système de serrage



c) L'ensemble sonde – système d'acquisition - ordinateur

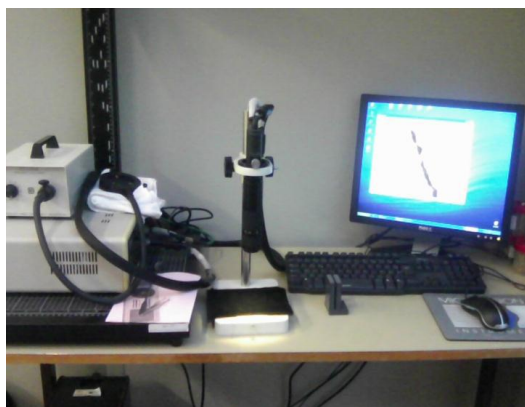
**Fig II. 11.** Instrument de mesure des propriétés thermo-physiques « Hot Disk TPS 500 » et la sonde.

## **II. 4. ANALYSE DE LA MICROSTRUCTURE**

### **II.4.1. IMAGERIE OPTIQUE**

La structure, à grande échelle, des composites de plâtre allégés est appréciée par imagerie optique (Fig. II. 12(a)). L'équipement utilisé est lié à un ordinateur qui consiste à observer le matériau à l'aide d'un vidéo microscope (Controlab), avec des grossissements allant jusqu'à 300x, soient 25x-175x et 150x-300x. Il est relié à 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 un microscope optique en réflexion de type : « LEICA DMLM » avec des grossissements allant jusqu'à 50x (voir Fig. II. 12).



a) Imagerie optique



b) loupe binoculaire

**Fig II. 12.** Imagerie optique et loupe binoculaire.

#### **II.4.2. ANALYSE PAR MICROSCOPE ELECTRONIQUE A BALAYAGE ET PAR SPECTROSCOPIE A RAYONS X A DISPERSION D'ENERGIE**

La microscopie électronique à balayage est une technique basée sur le principe des interactions électrons-matière. Elle est capable de produire des images de la surface d'un échantillon avec une haute résolution pouvant atteindre quelques nanomètres et avec une très grande profondeur de champ. Le couplage du MEB avec un détecteur EDX permet également une microanalyse chimique élémentaire de la surface, voire une analyse quantitative. L'analyse EDX permet d'identifier par dispersion d'énergie des photons X la composition chimique des zones définies au MEB. A cet effet, nous avons réalisé, pour chaque zone analysée, un spectre global qui montre les éléments chimiques présents. Les images ont été obtenues par Microscope Électronique à Balayage (MEB), à haute résolution, de type Environnemental Quanta 200 FEG (société FEI Compagny), équipé d'une platine Peltier permettant l'observation de tout type d'échantillon (hydraté ou non, conducteur ou non). Il est équipé d'une microanalyse X INCA OXFORD de type SDD 80 mm<sup>2</sup>. Les échantillons sont préalablement séchés puis recouverts d'une couche fine d'or vaporisée.

#### **II.5. FORMULATION DES BETONS DE PLATRE ALLEGE PAR DES GRANULATS DE POLYSTYRENE EXPANSE**

Des recherches approfondies ont été menées sur la base des travaux d'autres chercheurs afin de connaître à la fois les pourcentages d'addition d'agrégats légers et le rapport eau / plâtre le plus courant dans des études menées sur les composites de plâtre allégés par ajout de granulats légers. Les résultats les plus représentatifs tirés de l'étude de ces travaux antérieurs sont présentés dans le tableau 9. A partir de ces résultats, on peut observer comment le plâtre de type A ou le type B1 est utilisé de manière interchangeable. Dans notre étude, on a sélectionné le plâtre de type B1. Pour sa disponibilité au marché algérien, sachant que les

plâtres utilisés en Algérie sont des plâtres gros de construction. Il faut bien noter que les plâtres gros de construction (B1) sont les plâtres recommandés par le CNERIB pour la construction en plâtre.

**Tab II. 9.** Principaux paramètres des composés de plâtre allégé obtenus à partir de la recherche documentaire.

Auteur	Type de plâtre	Rapport E/C	Granulat léger	Taille de granulat	% D'addition
DJOUDI Amina	B1	0.6	Gravier et Sable S/G=0.31 Fibre de palmier dattier	S :0-0.63 mm G :0-8mm FPD .L :10-40 mm	S/G :0.5-0.33% FPD :0.5-2%
Gencel et al. [68]	B1	0.8-1	Diatomite	<149 µm	10, 20%
Khalil et al. [83]	B1	0.6 et 0.8	Sable	<90 µm	0.2-10%
Del Río et al. [53]	A	0.6 et 0.8	Vermiculite	8 mm	20%
Khalil et al. [83]	B1	0.6 et 0.8	Fumée de silice		
Khalil et al. [83]	B1	0.6 et 0.8	Gel de silice		
Del Río et al.[72]	A	0.8	Argile expansée	3-8 mm	20, 40, 50, 60%
Del Río et al.[72]	A	0.8	Perlite	1.5, 3, 5 mm	10, 20%
Gutiérrez-González et al. [82]	B1	0.46- 1.45	Résidus de polyuréthane	0.1-1.75 mm	50, 100, 200, 300, 400%
García Santos [80]	A	0,7	<b>PSE</b>	5 mm	0-2%
Del Río et al. [53]	A	0,6	<b>PSE</b>	4-8 mm	3%
Del Río et al.[123]	B1, A	0.6 et 0.8	Résidus de liège		20%
Herrero et al. [84]	A	0.76-0.93	Déchets pneumatiques	0-0.6, 0.5-2.5, 2.5-4.0 mm	30, 40, 50, 60%
Gutiérrez-González et al. [82]	B1	0.43- 0.50	Résidu de polyamide	0.05-0.1 mm	50, 100, 200, 300, 400%
Jiménez Rivero et al. [85]	A	0.70 0.76	Déchets de caoutchouc	1-2, 2-4, 4-6, 20-25 mm	1.25, 2.50, 5, 7.5%
González Madariaga [86]	B1, A	0.8 et 1.25	<b>Résidus De PSE</b>	0.4 y 0.6 mm	1.6, 2, 3%

**A** : plâtres pour agglomères ;

**B1** : plâtre gros de construction.

En fait, l'analyse des différents rapports « Eau / Plâtre » de type plâtre B1, on a trouvé qu'à partir de 0.8, le mélange ne satisfaisait plus aux exigences mécaniques minimales spécifiées dans la norme UNE-EN 13279-1 établie (au moins  $1 \text{ N} / \text{mm}^2$  à la flexion et  $2 \text{ N} / \text{mm}^2$  à la compression) [124]. Par conséquent, le rapport « Eau / Plâtre » à utiliser dans la phase de caractérisation est le rapport **0.6**. Il faut bien noter que ce rapport est recommandé par le CNERIB pour la confection des bétons de plâtre.

En ce qui concerne les pourcentages d'addition, en général, dans les études de recherche analysées, des pourcentages élevés ont été utilisés : par exemple pour la perlite et la vermiculite, on a utilisé des pourcentages de 10 et 20% [92], pour le résidu de pneu, Herrero et al. ont utilisé des pourcentages de 30 à 60% [84], cependant, les chercheurs qui ont étudié le polystyrène expansé, comme García Santos [80] ou González Madariaga [86], ont utilisé de faibles pourcentages allant de 1 à 3%. Par conséquent, et étant donné la faible densité de polystyrène expansé, la quantité maximale de granulats de polystyrène expansé acceptée par le composé de plâtre sera analysée. Pour cela, les pourcentages adoptés pour cette étude vont de 25% à 60% (par substitution volumique de la matrice (plâtre+sable)), avec un pas de 5 %. Ces proportions représentent des fractions massiques par rapport au plâtre d'environ 1 %'à 2 %.

L'absence d'une méthode universelle pour la formulation des bétons de plâtre, nous a conduits à suivre les recommandations pour la construction en plâtre donnée par CNERIB [8].

- Tout d'abord, on fixe le rapport  $E/P = 0.60$  qui équivaut au taux de gâchage à saturation.
- Pour le sable, on prend un rapport  $S/P = 0.50$  en poids qu'a été également limité par le CNERIB, car, selon leur guide, un excès de sable diminue les propriétés mécaniques des matériaux à base de plâtre [8].
- Concernant les granulats légers, on a essayé d'incorporer les billes de polystyrène dans la matrice du mortier de plâtre (plâtre + sable). Le pourcentage de polystyrène utilisé varie de 0,25 à 60 % avec un pas de 5 % (comme indiqué précédemment) ; trois diamètres ont été parallèlement étudiés, soient : 3.15, 4 et 5-7 mm.
- Afin d'éviter le problème de ségrégation en raison de la légèreté des granulats, l'ordre d'introduction des différents constituants du béton dans le malaxeur, en marche, était le suivant :
  - introduction de la moitié de l'eau ;
  - introduction du plâtre, billes de polystyrène et sable dunaire pendant 30 s ;
  - ajouter l'eau restante ;
  - malaxer l'ensemble à vitesse rapide pendant 30s ;

- arrêter le malaxeur et enlever au moyen d'une raclette tout le plâtre adhérent aux parois et au fond du récipient en le repoussant vers le milieu de celui-ci ;
- reprendre, ensuite, le malaxeur jusqu'au moment où le composite devient un mélange homogène, sans dépasser 2 min.

Pour la caractérisation physicomécanique des bétons élaborés dans ce travail, on a choisi les éprouvettes de 4x4x16 cm<sup>3</sup>.

La mise en moule est faite, sans vibration, à raison de 3 couches piquées à la truelle chacune pour éviter tout problème de ségrégation pouvant affecter l'homogénéisation des échantillons. Après la mise en moule, les éprouvettes sont conservées à l'air libre du laboratoire en les couvrant d'une toile en plastique. Après 24 heures, les échantillons de composite de plâtre ont été démoulés et conservés dans les conditions du laboratoire pendant 28 jours afin d'obtenir la résistance caractéristique.

❖ On a veillé à ce que les échantillons de conservation soient comme suit :

- Température (C°) :  $20^{\circ} \pm 5^{\circ}$
- Humidité (%) :  $45\% \pm 5\%$

### III. CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la présentation des essais de caractérisation des matériaux étudiés et du matériel ainsi utilisé. Dans la première partie, 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 les priver, par conséquent, d'une éventuelle utilisation comme matériaux de construction. Toutes les caractéristiques physiques et chimiques sont bonnes ou acceptables. Les caractéristiques obtenues dans cette partie d'étude vont sûrement nous aider à interpréter les résultats expérimentaux qu'on va trouver pour le composite envisagé. En deuxième partie de ce chapitre, les techniques expérimentales, qui ont été utilisées pour la détermination des différents paramètres étudiés, ont été présentées. Un aperçu global sur la formulation sur le composite de plâtre et les pourcentages d'addition de polystyrène expansé ont été inspirés de la littérature et présentés à la fin de cette partie d'étude.

# TROISIEME CHAPITRE

Résultats expérimentaux et analyse

## **CHAPITRE III :** **RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX ET ANALYSE**

### **INTRODUCTION**

L'objet de ce chapitre est d'étudier les propriétés physico-mécaniques d'un matériau de construction léger à base de plâtre comme liant et de sable de dunes et de billes de polystyrène expansé comme granulats. Par rapport aux travaux précédents, la nouveauté de ce travail est l'utilisation de polystyrène et de sable de dunes tous ensemble dans une pâte à base de plâtre pour former un nouveau béton/mortier léger qui est très économique et qui résoudra le problème de l'isolation thermique dans les zones arides.

La première partie étudie le comportement thermo-physique des composites étudiés ; en outre, une étude de modélisation par la méthode d'homogénéisation auto cohérente a été menée.

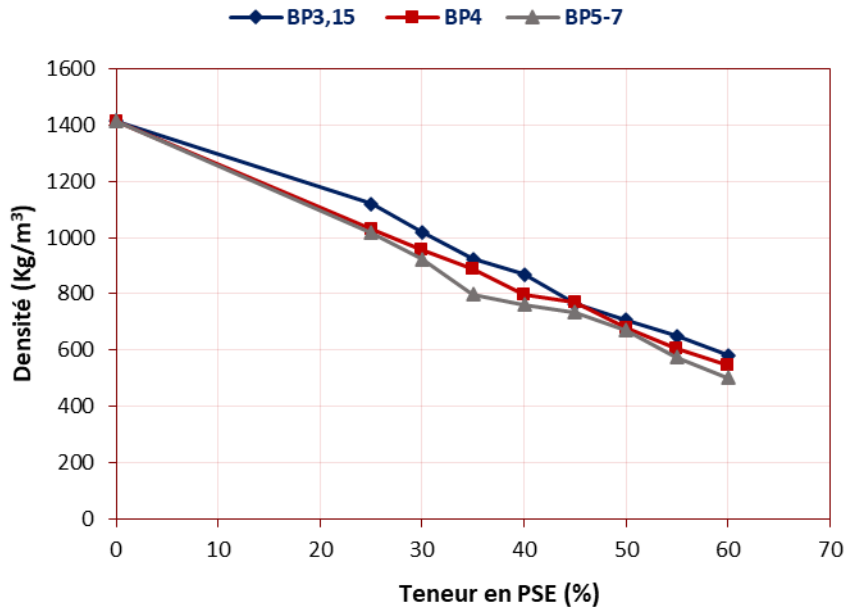
La deuxième partie de ce chapitre étudie la durabilité des composites élaborés par la vérification de leurs propriétés à long terme après leur exposition à un vieillissement par des cycles de séchage - humidification. On s'est également intéressé à l'examen de leur résistance aux milieux chimiquement agressifs, en particulier, aux sulfates et aux acides.

### **I. RESULTATS EXPERIMENTAUX ET ANALYSE**

L'interprétation des résultats est axée sur l'étude de l'effet de l'incorporation des granulats de polystyrène expansé (PSE) sur les propriétés du composite à base de plâtre.

#### **I.1. DENSITE**

Il est bien connu que la densité est le premier indicateur à déterminer pour connaître si le matériau peut être considéré comme un matériau léger ou non. Dans notre cas, on a remarqué que la valeur de la densité des bétons de plâtre à base de billes de polystyrène expansé, ainsi préparés, s'est stabilisée à l'âge de 14 jours. Les valeurs de la densité mesurées à 28 jours sont illustrées par la Figure III.1.



**Fig. III. 1.** Variation de la densité des composites étudiés en fonction de la teneur et du diamètre des billes en PSE.

Il est clair que la densité apparente du mélange de référence (0% de polystyrène), qui est d'environ  $1414 \text{ kg/m}^3$ , est beaucoup plus faible que celle du béton de ciment qui est d'environ  $2300 \text{ kg/m}^3$  [65]. Donc, même sans polystyrène, un béton de plâtre est beaucoup plus léger que le béton de ciment. En augmentant la quantité des granulats de polystyrène, la densité du béton a diminué. C'est tout à fait normal, puisque la densité de ce type de granulat est plus faible qu'un granulat minéral. En effet, cette réduction de densité est due à la substitution partielle du sable de dune et le plâtre par des granulats légers.

Même l'effet du diamètre des granulats de polystyrène est observé sur la densité des composites. On constate que la densité est diminuée lorsqu'on augmente le diamètre des billes utilisées.

Par rapport au béton de contrôle (0% de billes de polystyrène), une réduction de la densité d'environ 20 à 67% était obtenue par l'introduction de 25 à 60 % de billes de polystyrène respectivement.

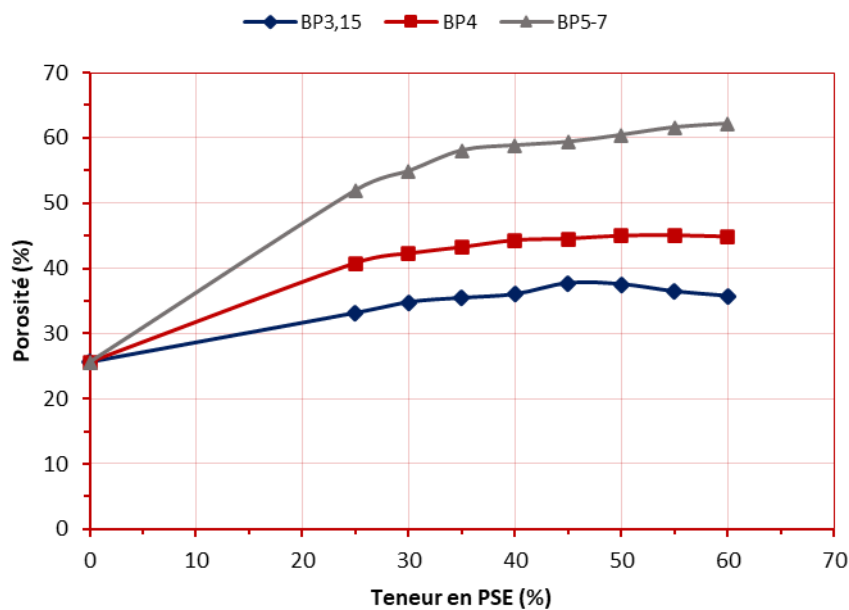
Notons que ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus avec d'autres travaux de littérature sur l'introduction des granulats de polystyrène dans des matrices de plâtre. San-Antonio-Gonzalez et al. ont étudié un composite léger à base de plâtre en utilisant différentes proportions de déchets de polystyrène. Ils ont montré que l'augmentation de la proportion de polystyrène a réduit la densité du composite [126]. Même avec l'introduction des granulats de liège, qui ont un aspect similaire au polystyrène [127], dans une matrice cimentaire, Ziregue et al. ont

constaté que la densité du béton léger a diminué avec l'augmentation de la quantité des granulats de liège introduite [119].

### I.2. POROSITE

Les bétons de plâtre allégés par les granulats de polystyrène expansé présentent une structure complexe dépendant, à la fois, de la matrice et des billes de polystyrène incorporées. Ces dernières présentent des morphologies différentes. Elles se caractérisent par une macroporosité très élevée. La matrice, elle-même, se caractérise également par une porosité notable, mais moins élevée. Par conséquent, le composite présente une double porosité : la porosité de la matrice et celle induite par l'ajout des billes de polystyrène.

La porosité est calculée par la méthode décrite au deuxième chapitre (section II.2) et les résultats sont illustrés sur les courbes ci-dessous (Figure III.2).



**Fig. III. 2.** Variation de Porosité des composites étudiés en fonction de la teneur et du diamètre des billes de PSE.

En général, il est bien connu que l'augmentation de la porosité d'un matériau de construction diminue considérablement sa densité.

Le plâtre est un matériau présentant une porosité importante ; pour notre cas, elle est de l'ordre de 49%, d'après la figure III. 2 ; lorsqu'on introduit du sable de dune et de la chaux, la porosité diminue et cela est dû au remplissage des pores par les ces derniers. Par contre lorsqu'on ajoute les billes de polystyrène expansé, la porosité du béton de plâtre témoin augmente et cela est dû

au fait que les billes de polystyrène créent une porosité microscopique supplémentaire dans le composite.

Il est clair que la porosité augmente avec l'augmentation du contenu des billes de polystyrène. Avec une teneur en polystyrène de 60 %, la porosité est de l'ordre de 35,7 %, 44,8 % et 62,2 % pour les BP3.15, BP4 et BP5-7 respectivement. Le taux de cette augmentation significative de la porosité a atteint 143 %, dans le cas du composite BP5-7 avec un pourcentage de 60 % polystyrène (par rapport à composite de référence.).

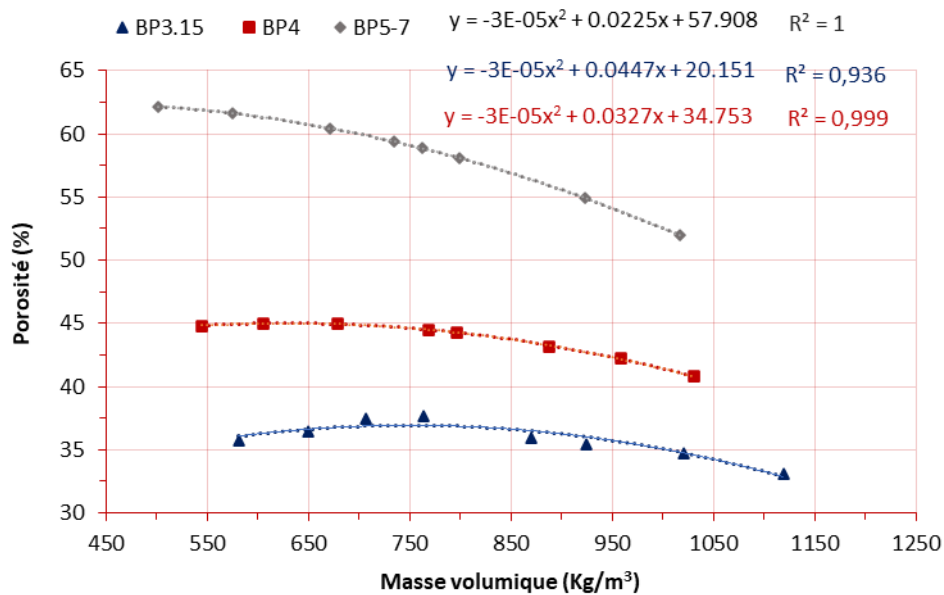


Fig. III. 3. Relation masse volumique sèche et la porosité des composites étudiées.

L'étude de la relation entre la masse volumique sèche et la porosité a montré l'existence d'une relation suivant une tendance polynomiale négative avec un coefficient de corrélation  $R = 1$ , 0.999 et 0.936, dans le cas des composites BP3.15, BP4 et BP5-7 respectivement, comme le montre la figure III. 3. Les résultats ainsi obtenus sont cohérents avec ceux de la littérature [44,104 ,118].

### I.3. RÉSISTANCE MÉCANIQUE

#### I.3.1. RÉSISTANCE A LA FLEXION ET LA COMPRESSION

Les variations des résistances de flexion et de compression à 28 jours du béton de plâtre étudié en fonction de la proportion de billes de polystyrène expansé sont représentées respectivement sur les figures III.4 et III.5.

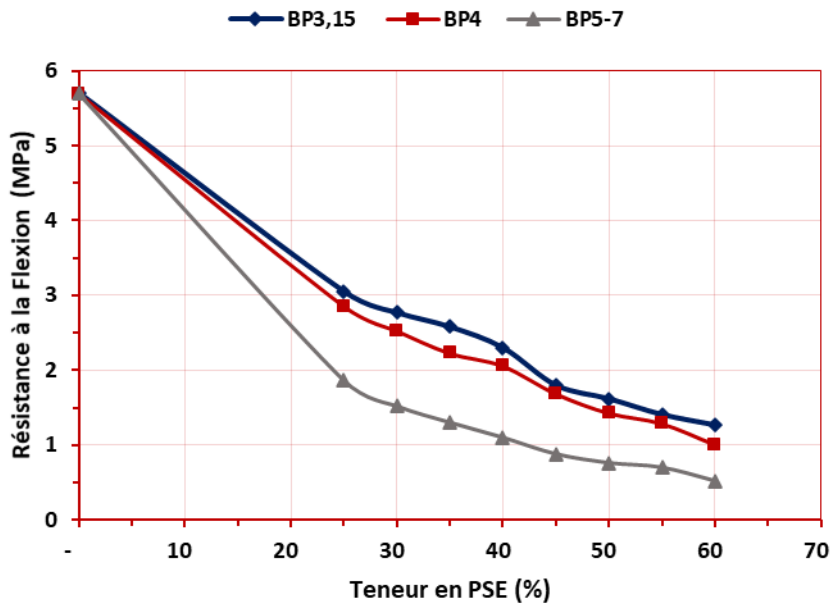
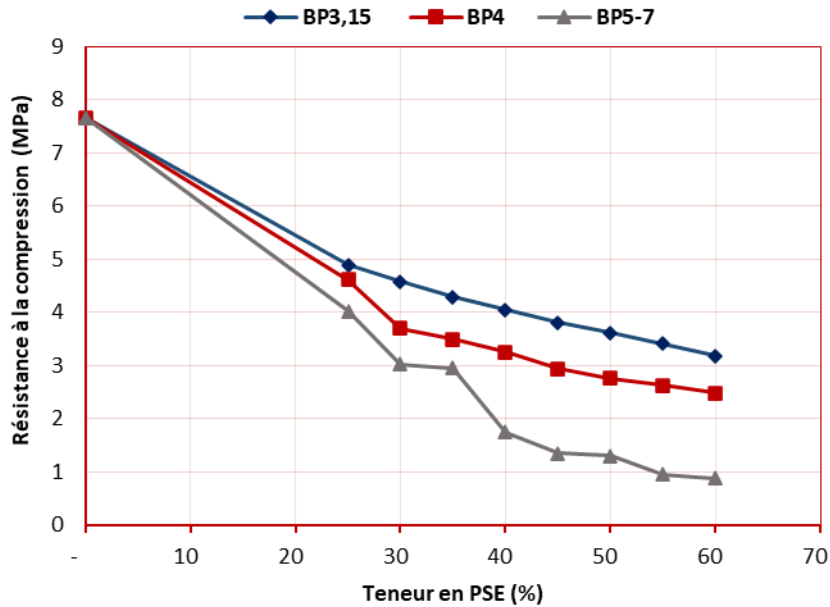


Fig. III. 4. Variation de résistance à la flexion des composites étudiés en fonction de la teneur et du diamètre des billes en PSE.

Il est clair que la résistance mécanique (en compression et en flexion) diminue avec l'augmentation du contenu des billes de polystyrène. Avec une teneur en polystyrène de 60 %, la résistance à la flexion varie de 5,7 à 0,32 MPa et la résistance à la compression diminue de 7,7 à 0,88 MPa. Ces valeurs correspondent à des densités situées entre 1380 et 502 kg / m<sup>3</sup>. La même observation est également faite lors de la diminution de la taille du PSE. Cependant, avec des pourcentages plus élevés de PSE, les échantillons avec 60% de PSE ont montré une diminution significative de la résistance allant jusqu'à 62%. En général, il est bien connu que la diminution de la densité d'un matériau de construction diminue considérablement sa résistance mécanique. Dans cette étude ; il est également clair que la résistance mécanique du béton de plâtre étudié diminue avec la diminution de sa densité. Cette réduction de la résistance mécanique est due au fait que les grains de sable et de plâtre (dur et plus résistant) sont partiellement remplacés par des billes de polystyrène (souples et moins résistantes). Dans le cas de la compression, cette réduction est due en premier lieu à la faiblesse des billes de polystyrène expansées en compression et leur grande flexibilité par rapport à celle de la matrice et d'autre part au fait que le polystyrène ne réagit pas chimiquement avec le mélange pour contribuer à la résistance du composite. Cependant, dans les cas de flexion, cela peut être dû à une faible adhérence entre la pâte de plâtre et les billes de polystyrène par rapport à celle entre la pâte de plâtre et le sable de dune. En effet, si l'adhérence « matrice -polystyrène » était meilleure, il devrait être possible d'obtenir de meilleures résistances à la flexion grâce à la grande flexibilité du polystyrène.



**Fig. III. 5.** Variation de résistance à la compression des composites étudiés en fonction de la teneur et du diamètre des billes en PSE.

En outre, il convient de noter que, dans le cas des granulats de polystyrène, le mode de rupture des échantillons soumis à une charge de compression / flexion ne s'est pas présentée comme rupture fragile typique comme dans le cas des granulats minéraux. Avec les billes de polystyrène, la rupture semble être plus progressive et compressible, ce qui montre la bonne capacité d'absorption d'énergie du composite de polystyrène expansé étudié. Ce résultat est conforme aux résultats obtenus par Alécia, Ferrandiz et Bing Chen et al. [43,124-125].

Il convient de noter également que les valeurs obtenues sont en accord avec les normes requises par la classification fonctionnelle de RILEM [38] pour un matériau de construction isolant. Ces valeurs sont également compatibles avec les normes requises par l'ACI 213R-87 [128] pour un béton léger à faible résistance (une densité  $\rho = 300-800 \text{ kg/m}^3$  et une résistance à la compression  $R_c < 7 \text{ MPa}$ ). De plus, la plupart des valeurs satisfont à la norme européenne EN13279-1 qui exigent une résistance minimale de 2 MPa pour la compression et 1 MPa pour résistance à la flexion [124]. Sauf pour les composites BP5-7 qui contiennent des proportions élevées de polystyrène.

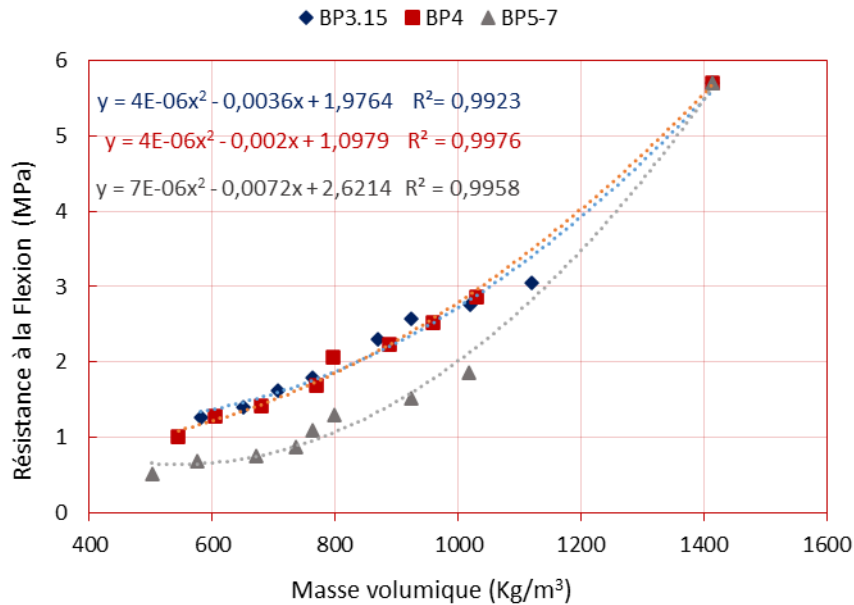


Fig. III. 6.Variation de résistance à la compression des composites étudiés en fonction de la densité.

Par ailleurs, la Figure III.6 montre que la résistance à la compression des composites diminue lorsque la densité diminue. Une chute très rapide de la résistance est constatée en passant du béton témoin au béton le plus allégé. Cette décroissance est de plus en plus faible en augmentant le dosage en granulats plastiques. La relation entre eux suit une fonction polynomiale avec un coefficient de corrélation très proche de 1.

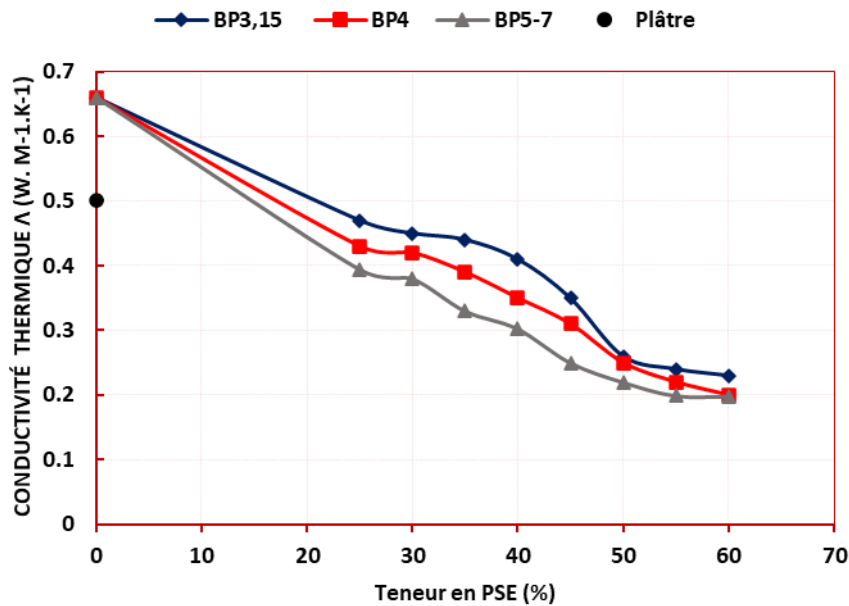
#### I.4. ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS THERMIQUE

Les propriétés de transferts thermiques sont directement liées aux constituants, à la morphologie du milieu (matrice solide et réseau poreux) et aux interactions entre les différents types de transferts existants dans le matériau. Les propriétés isolantes des matériaux de construction se quantifient essentiellement au travers de deux paramètres usuels : la conductivité thermique «  $\lambda$  » et la diffusivité «  $a$  ». Ceux-ci dépendent des caractéristiques intrinsèques des constituants et de la microstructure du matériau.

Cette partie vise, dans un premier temps, à décrire le comportement thermique du béton de plâtre allégé par les billes de polystyrène expansé à partir de l'étude de la conductivité, la diffusivité, la chaleur spécifique puis l'effusivité thermique. Elle confronte les résultats de la campagne de mesures expérimentales à ceux d'une modélisation par homogénéisation auto-cohérente (HAC). Cette dernière phase conduit à un modèle prédictif fiable de la conductivité thermique sèche du matériau en fonction de sa formulation et de sa densité.

**I.4.1. CONDUCTIVITE THERMIQUE**

Les valeurs de la conductivité thermique des bétons étudiés sont illustrées dans la figure III.7.



**Fig. III. 7.** Variation de conductivités thermiques λ en fonction du teneur et du diamètre des billes de polystyrène.

Selon la figure III.7, on constate que la conductivité thermique diminue au fur et à mesure que le pourcentage de polystyrène expansé augmente. La conductivité thermique la plus basse, qui est de 0,198 W.m<sup>-1</sup>.k<sup>-1</sup>, est obtenue avec une addition de 60 % de billes de polystyrène expansé ; cela représente une diminution d'environ 70 % par rapport au béton témoin, qui semble tout à fait normal, puisque des granulats minéraux (sable de dune) et le plâtre ont été remplacés par des billes de polystyrène caractérisées par une plus faible conductivité thermique. Les valeurs obtenues sont cohérentes avec celles de la littérature. Ayse Bicer et al. [129] ainsi que Alicia et autres [86-100,126] ont fait la même observation dans le cas de l'addition de polystyrène expansé ou de polystyrène extrudé dans un composite de plâtre seul ; et même avec des composites à base de plâtre et granulats de caoutchouc ou de liège [84-85, 127].

En outre, la conductivité thermique obtenue avec le béton de contrôle (sans polystyrène) est conforme aux recommandations de RILEM qui préconise, pour un béton léger de construction et d'isolation (classe II). Cette constatation est en accord avec de nombreuses études réalisées sur des composites de plâtre ou de ciment basés sur les granulats de polystyrène expansé [21, 24] et même avec des composites à base de chaux et de « pierre d'olive » [25].

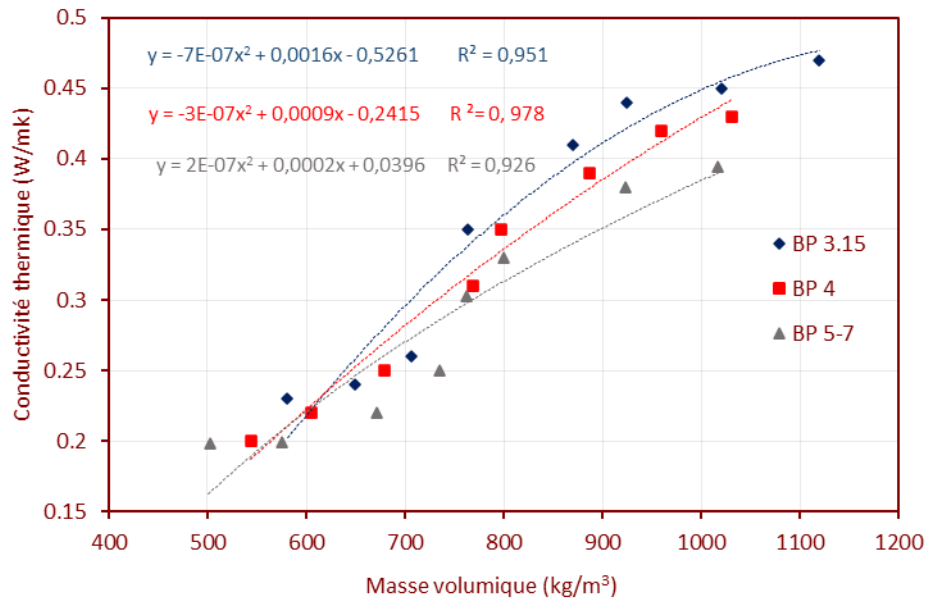


Fig. III. 8. Relation entre la conductivité et la densité des composites étudiés.

Par conséquent, on peut déduire que l'addition des billes de polystyrène expansé joue un rôle important dans l'allégement du béton et la réduction de sa conductivité thermique ( $\lambda$ ). Pour notre étude et d'après la figure III. 8. La variation de la conductivité thermique en fonction de la densité suit une fonction polynomiale avec un coefficient de corrélation proche de 1. Selon les résultats obtenus, la densité du matériau diminue de  $1440 \text{ kg / m}^3$  à  $502 \text{ kg / m}^3$ , lorsque la teneur en billes de polystyrène expansé augmente de 0 à 60 %, la conductivité thermique diminue de 0.66. à 0.198 W/m.K., soit une amélioration de 70.% .

#### I.4.2. DIFFUSIVITE THERMIQUE

La variation de la diffusivité thermique des composites étudiés en fonction des pourcentages de polystyrène pour différentes classes est représentée sur la figure III.9.

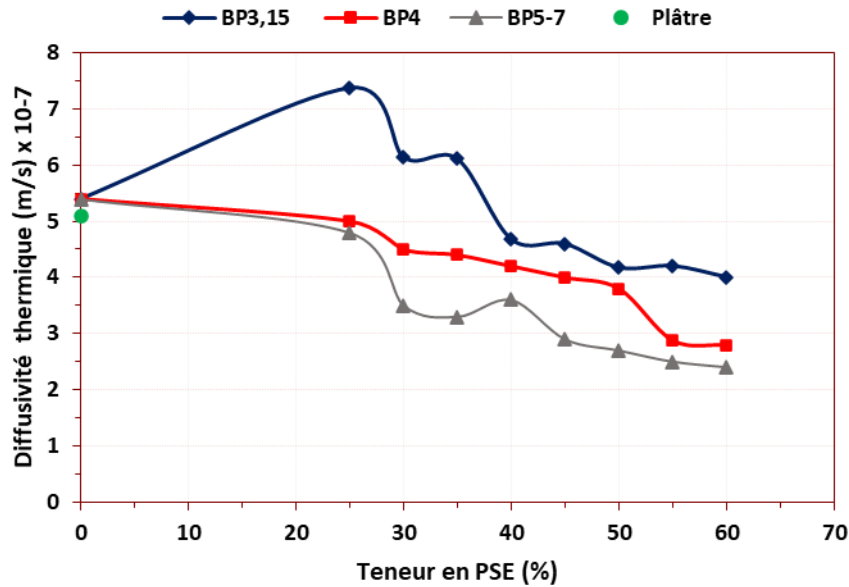


Fig. III. 9.Variation de diffusivité thermiques a en fonction du pourcentage et du diamètre des billes de polystyrène.

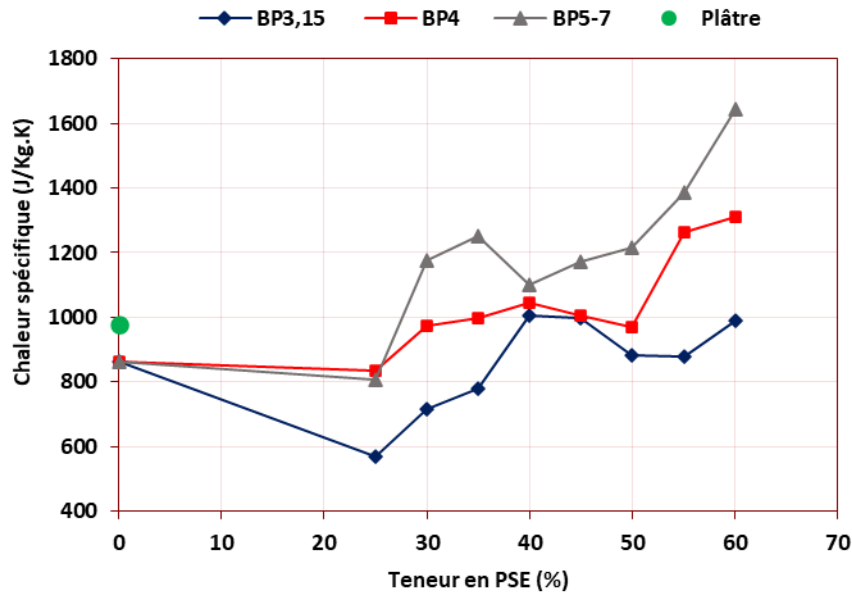
Les courbes, pour différents dosages en polystyrène, présentent une tendance générale identique avec une diminution très nette de la diffusivité lorsque la teneur en polystyrène augmente ; cette diminution peut être attribuée à la texture des granulats utilisés, étant le polystyrène expansé qui améliore la conductivité thermique globale du composite, donc la vitesse, avec laquelle la chaleur se propage par conduction dans les composites, est diminuée en fonction du polystyrène expansé incorporé.

La diffusivité thermique obtenue est de l'ordre de 0,40 mm<sup>2</sup>/s pour un pourcentage de polystyrène 60% avec des granulats de 3.15 mm et on peut aller jusqu'à 0.28 mm<sup>2</sup>/s pour le composite contenant des granulats de 5-7 mm ; on a enregistré des réductions de 39.39%, 28,57 et 50 % par rapport au béton témoin, pour les composites contenant 60 % de polystyrène avec des diamètres 3.15 mm 4 mm et 5.7 mm respectivement.

Il faut bien noter que plus la valeur de la diffusivité thermique est faible, plus le flux de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau, et donc, plus le temps entre le moment où la chaleur est arrivée sur une face d'un mur et le moment où elle atteindra l'autre face est important. C'est une grandeur de l'inertie thermique.

#### I.4.3. CHALEUR SPECIFIQUE

La première remarque qu'on peut faire en examinant la figure III.10, est que l'ajout des granulats minéraux (sable dunaire) au plâtre a fait diminuer légèrement sa chaleur spécifique.



**Fig. III. 10.** Variation de chaleur spécifique des composites étudiés en fonction de la teneur et du diamètre des billes en PSE.

Par contre, l'ajout des granulats de polystyrène au béton de plâtre a augmenté sa chaleur spécifique. Nos résultats sont accord avec ceux de la littérature. L'ajout des granulats de déchets de caoutchouc ou billes de polystyrène expansé [84,126] augmente la chaleur spécifique du composite à base de plâtre seul. En effet, on constate que les capacités calorifiques sont d'autant plus grandes que le pourcentage en polystyrène est grand ; ceci peut être attribué à la chaleur massique de polystyrène : on a pu obtenir, avec l'incorporation de 60% de polystyrène de diamètre 5-7 mm, une augmentation de l'ordre de 90 %.

#### **I.4.4. EFFUSIVITE THERMIQUE**

La variation de l'effusivité thermique des composites étudiés en fonction des pourcentages de polystyrène pour différentes classes est représentée sur la figure III.11.

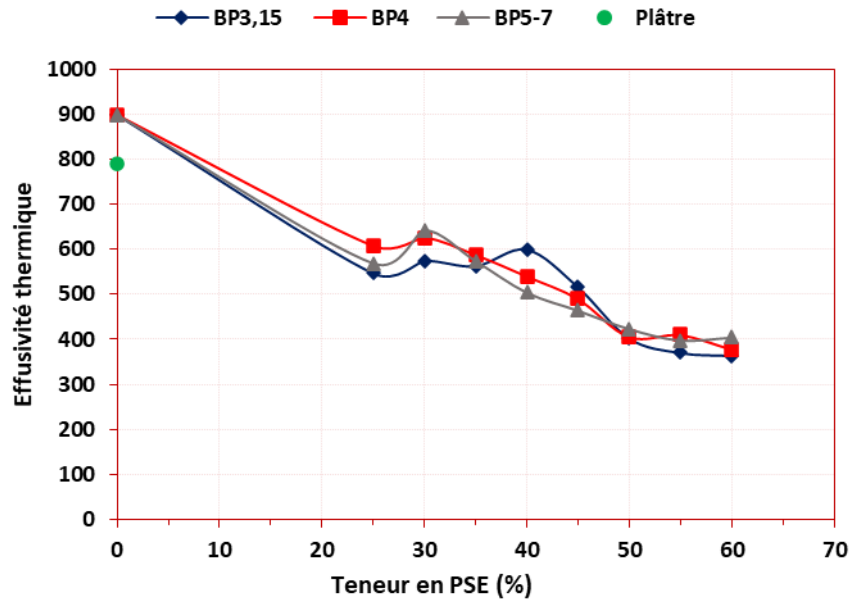


Fig. III. 11. Variation de l'effusivité thermique des composites étudiés en fonction de la teneur et du diamètre des billes en PSE.

On remarque une diminution de l'effusivité avec l'accroissement du dosage en polystyrène expansé ; les valeurs moyennes des effusivités thermiques évoluent d'une manière semblable pour tous les diamètres des granulats.

### I.5. MODELISATION DE LA CONDUCTIVITE THERMIQUE DES COMPOSITES ETUDIES

L'objectif de la modélisation thermo-mécanique des matériaux hétérogènes est de déterminer les propriétés macroscopiques du matériau connaissant sa microstructure et les propriétés de ses différents constituants.

La modélisation de la conductivité thermique des bétons contenant des granulats légers a fait l'objet de nombreux travaux de recherche [130-135]. Cette modélisation est effectuée à l'aide des approches d'homogénéisation analytique et/ou des résolutions numériques. Les résultats dépendent de l'état de saturation du béton.

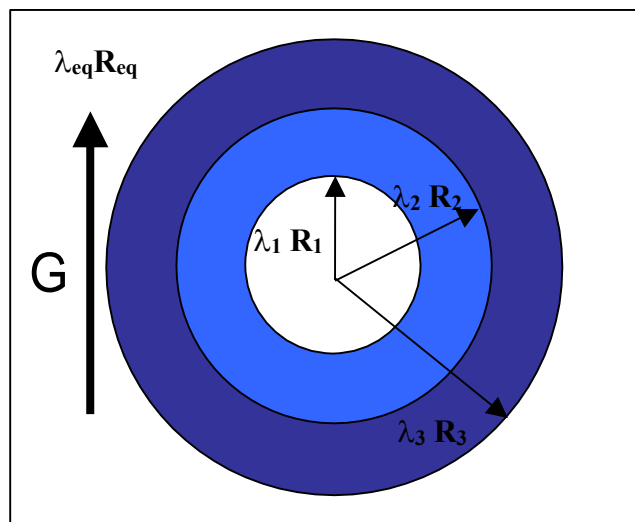
Pour le béton sec, les modèles utilisant des approches analytiques sont suffisants dans le cas d'un matériau non compacté contenant des particules aléatoirement orientées. Si le béton est compacté, le recours aux résolutions numériques, permettant de prendre en compte l'anisotropie des particules, est nécessaire. Grâce à ces méthodes numériques, le comportement effectif anisotrope du matériau peut être retrouvé [132].

**I.5.1. MODELES PAR HOMOGENEISATION AUTO-COHERENTE (HAC)**

Le principe de HAC est d'assimiler un matériau hétérogène à un matériau homogène équivalent dont on doit déterminer les caractéristiques. On réalise ainsi un passage de l'échelle microscopique (les constituants) à l'échelle macroscopique (le matériau), en exprimant la conductivité thermique globale du matériau comme une fonction des caractéristiques de chaque constituant (conductivité, concentration volumique).

La mise en œuvre de la HAC nécessite deux conditions, la séparation d'échelle et l'existence d'un motif générique. A ces deux conditions s'ajoute la conservation de l'énergie entre le milieu hétérogène réel et le milieu homogène fictif, dont les propriétés sont à définir [132].

Dans le cadre de cette étude, le motif générique est constitué d'inclusions tri-composite (Figure III.12). On considère donc un constituant (1) (l'air) modélisé par une sphère de rayon  $R_1$ , de conductivité  $\lambda_1$  et de masse volumique  $\rho_1$ , entouré d'un constituant (2) de caractéristiques  $R_2$ ,  $\lambda_2$  et  $\rho_2$ . Et le troisième constituant, entourant le constituant (2), représentant la matrice solide de propriétés  $R_3$ ,  $\lambda_3$  et  $\rho_3$ . Cette inclusion bi-composite est entourée d'une matrice de matériau homogène équivalent de caractéristiques  $\lambda_{eq}$  et  $\rho_{eq}$ . On définit les paramètres  $\theta$  et  $\delta$  et qui permettent de caractériser les concentrations volumiques :



**Fig. III. 12.** Inclusion sphérique tri-composite représentant le béton de plâtre allégé par le polystyrène expansé.

Le milieu est soumis à un gradient de température uniforme unitaire  $G$  à l'infini. Le champ de température solution est de la forme (eq. III.1). L'équation de la chaleur est résolue pour cette inclusion composite en respectant les conditions aux limites, c'est-à-dire, la continuité des flux et des températures aux deux interfaces [132].

$$T_i = \left( A_i r + \frac{B_i}{r^2} \right) \cos \theta \quad \text{Avec } i=1,2,3, \quad (\text{III.1.})$$

Les conditions aux limites imposent que :

$$\text{En } r = 0 \quad T_1 \text{ est finie donc } B_1 = 1$$

$$\text{En } r \rightarrow \infty, \quad (\text{grad } T)_{\text{eq}} = 1 \text{ soit } A_{\text{eq}} = 1$$

$$\text{En } r=R_1 \quad T \text{ est continue donc } A_1 R_1 = \frac{B_2}{R_1^2} + A_2 R_1 \quad (\text{III.2})$$

$$\text{En } r=R_1, \text{ le flux est continu, donc } \lambda_1 A_1 = \lambda_2 \left( \lambda_2 - \frac{2B_2}{R_1^3} \right) \quad (\text{III.3})$$

$$\text{En } r=R_2, \quad T \text{ est continue donc } A_2 R_2 + \frac{B_2}{R_2^2} = A_3 R_2 + \frac{B_3}{R_2^2} \quad (\text{III.4})$$

$$\text{En } r=R_2, \text{ le flux est continu, donc } \lambda_2 \left( A_2 - \frac{2B_2}{R_2^3} \right) = \lambda_3 \left( A_2 - \frac{2B_2}{R_2^3} \right) \quad (\text{III.5})$$

$$\text{En } r=R_3, \quad T \text{ est continue donc } A_3 R_3 + \frac{B_3}{R_3^2} = R_3 + \frac{B_{\text{eq}}}{R_3^2} \quad (\text{III.6})$$

$$\text{En } r=R_3, \text{ le flux est continu, donc } \lambda_3 \left( A_3 - \frac{2B_3}{R_3^3} \right) = \lambda_{\text{eq}} \left( 1 - \frac{2B_{\text{eq}}}{R_3^3} \right) \quad (\text{III.7})$$

L'égalité des gradients de température dans le milieu homogène équivalent et le composite impose  $B_{\text{eq}}=0$ . Ce système de six équations à cinq inconnues est résolu par Boutin [136], en considérant son déterminant nul ; l'expression de la conductivité thermique du béton de plâtre allégé par les granulats de polystyrène expansé devient donc :

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_m \left[ 1 + \frac{\theta}{\frac{1-\theta}{3} + \frac{1 + \frac{\delta}{3} \left( \frac{\lambda_a}{\lambda_{ps}} - 1 \right)}{\frac{\lambda_a}{\lambda_m} - 1 - \frac{\delta}{3} \left( \frac{\lambda_a}{\lambda_{ps}} - 1 \right) \left( \frac{2\lambda_{ps}}{\lambda_m} + 1 \right)}} \right] \quad (\text{III.8.})$$

- $\rho_m$  : masse volumique de la matrice
- $\lambda_m$  : conductivité de la matrice mesurée par la sonde TPS
- $\rho_{ps}$  : masse volumique de la bille de polystyrène
- $\lambda_{ps}$  : conductivité de la bille de polystyrène
- $\lambda_a$  : conductivité de l'air ambiant à 20°C

$$\text{Avec } \theta = \left( \frac{R_{ps}}{R_l} \right)^3 \quad \delta = 1 - \left( \frac{R_a}{R_{ps}} \right)^3 \quad (\text{III.9-10})$$

$$\text{On pose } m_{ps} = K. m_m$$

Avec  $m_{ps}$  : masse des billes de polystyrène dans la formulation

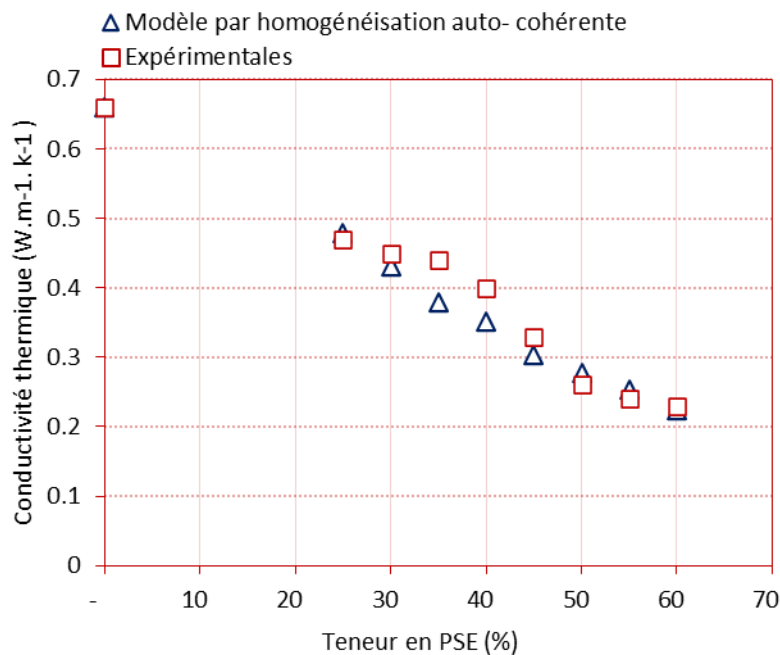
$m_m$  : masse de la matrice en poudre dans la formulation de béton

On en déduit :

$$\theta = 1 - \frac{1}{k+1} \frac{\rho}{\rho_m} \quad (\text{III. 11})$$

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_{ps}} \frac{k}{(k+1)} \frac{1}{1 - \frac{\rho}{\rho_l} \frac{1}{k+1}} \quad (\text{III. 12})$$

Cette définition de k est basée sur l’hypothèse que les variations de propriétés entre le liant en poudre et le liant hydraté sec n’entraînent pas de variation notable de la conductivité thermique du béton. Ceci a été vérifié par Cordier [137] sur 6 formulations différentes (utilisant deux liants distincts) pour lesquelles la variation de  $\lambda$  n’excédait pas 2 % entre les deux approches. Les résultats obtenus par la modélisation auto-cohérente, pour les composites étudiés, sont donnés et confrontés aux résultats expérimentaux sur les figures III.13, III. 14 et III.15.



**Fig. III. 13.** Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités estimées par le modèle d’homogénéisation auto-cohérente pour composites BP3.15.

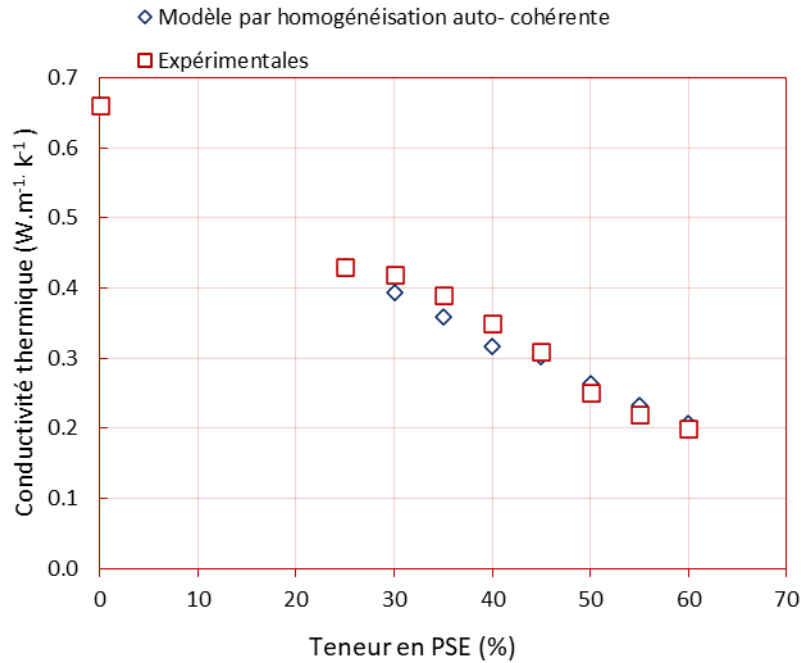


Fig.III.14. Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités estimées par le modèle d'homogénéisation auto-cohérente pour les composites BP4.

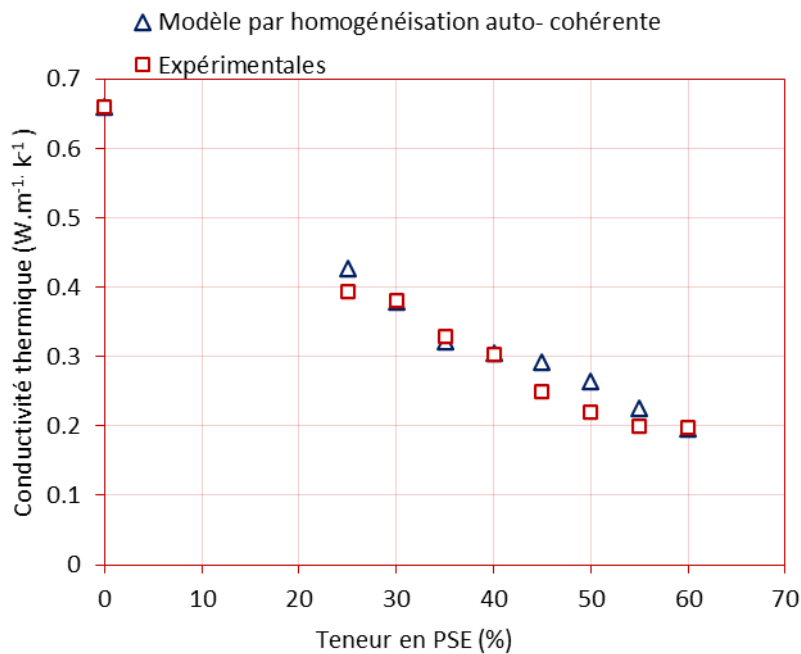


Fig. III.15. Confrontation des conductivités thermiques mesurées aux conductivités estimées par le modèle d'homogénéisation auto-cohérente pour les composites BP5-7.

**I.5.2. COMPARAISON ENTRE LES MESURES EXPERIMENTALES ET LES MESURES PREDITES PAR L'APPROCHE HAC**

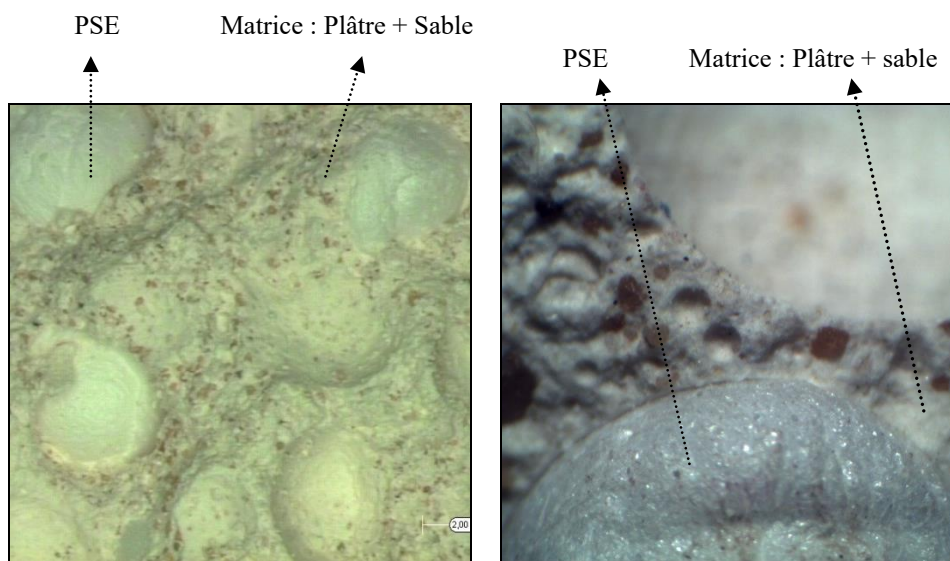
La modélisation par HAC permet d'exprimer la conductivité du béton de polystyrène en fonction des caractéristiques et des concentrations volumiques des constituants pour une inclusion tri-composite. Ce choix d'inclusions sphériques imbriquées les unes dans les autres

permet d'imposer la continuité de la matrice de liant, qui est l'élément conducteur prépondérant dans le béton de plâtre allégé par les granulats de polystyrène expansé.

Les valeurs théoriques sont très cohérentes avec les différentes mesures expérimentales effectuées au laboratoire. Un écart inférieur à  $\pm 7\%$  est observé entre la théorie et l'expérience. Cet écart peut s'expliquer par des imprécisions expérimentales. En premier lieu, la répartition des granulats de polystyrène dans les échantillons choisis pour les mesures de la conductivité n'exprime pas exactement le dosage défini dans la formulation. Or, celui-ci est obtenu par calage expérimental et en considérant qu'il est indépendant de la température d'essais, ce qui n'est pas tout à fait exact.

### I.6. ASPECT ET STRUCTURE GENERALE

En ce qui concerne l'aspect de la structure du composite étudié, la figure III.16 montre, qu'en général, le composite présente une texture relativement homogène. Les particules de PSE et les grains de sable adhèrent bien à la pâte de plâtre (Figure 16a, b) et sont bien répartis dans la pâte de plâtre, ce qui signifie qu'il n'y a pas de ségrégation lors de la coulée du béton dans les moules (Figure 16c). Comme dans le cas des composites avec des granulats minéraux, De plus, on peut remarquer que dans l'essai de flexion, les billes de polystyrène expansé ne se brisent pas et que la fissure se propage à travers l'interface PSE / matrice (Figure 16b, c).



(a) G=25

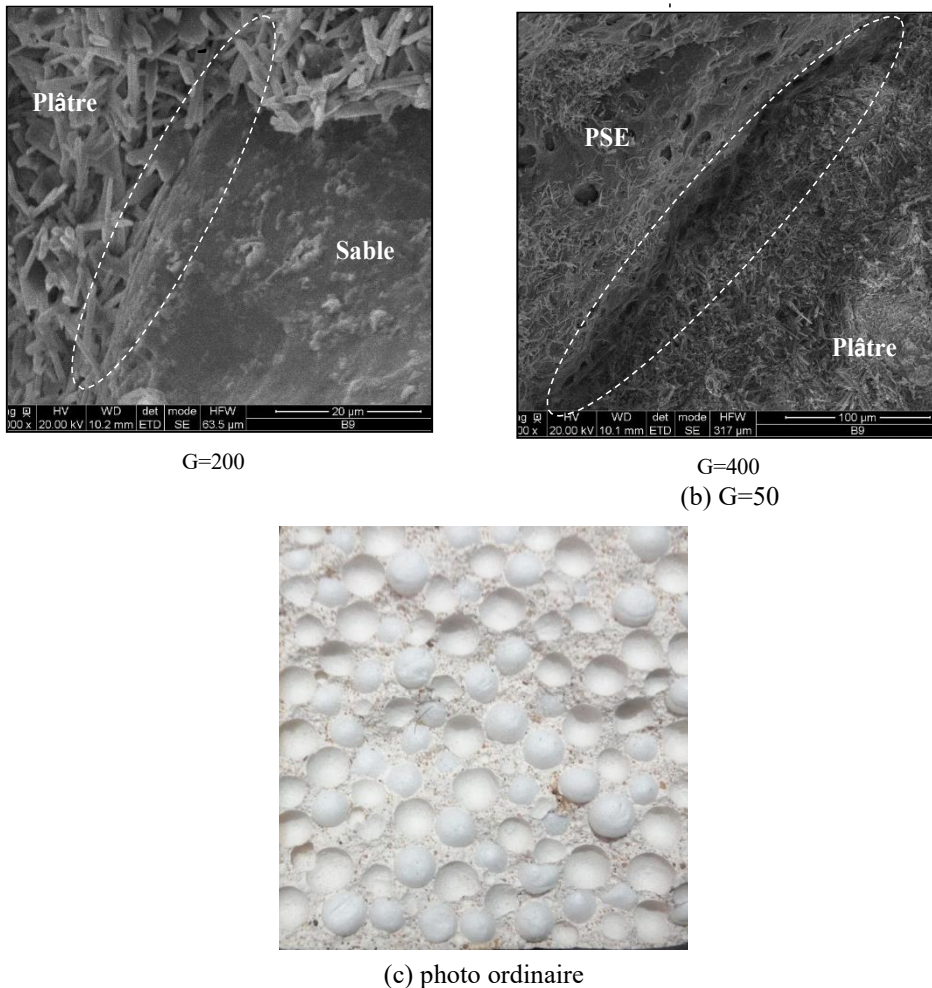


Fig. III.16. Aspect et structure du composite de plâtre.

## II. ETUDE DE LA DURABILITE DES BETONS DE PLATRE ALLEGES PAR LES GRANULATS DE POLYSTYRENE EXPANSE

Par définition, le béton est un matériau évolutif qui, tout au long de son existence, est le siège de réactions physico-chimiques, certes de plus en plus lentes : hydratation des composés anhydres résiduels, échanges ioniques entre phases solides et liquides, phénomènes de dissolution et recristallisation, migration d'ions, etc. Dans les conditions normales de température et d'humidité, ces transformations n'ont aucun caractère nocif et contribuent plutôt à la pérennité du matériau.

Dans toutes les réactions de dégradation, l'eau joue un rôle primordial. Indépendamment de l'eau normalement contenue dans le béton (solution interstitielle en équilibre chimique avec les hydrates), un apport d'eau extérieur est nécessaire (eau liquide ou humidité atmosphérique). D'une part, l'eau est le vecteur des ions agressifs ; d'autre part, elle est à l'origine du renouvellement de la solution interstitielle qui permet aux phénomènes de dissolution/précipitation de se produire. Par ailleurs, on sait que l'agressivité des gaz dépend de

l'humidité relative du milieu ambiant et que celle des sols est directement en relation avec la percolation d'eau qui permet d'en dissoudre les éléments nocifs (sols gypseux, par exemple).

Le transport des ions agressifs se fait principalement par perméation des gaz et des liquides et par diffusion ionique à travers la veine liquide [138].

Cette étude s'appuie sur des travaux qui ont été menés sur la durabilité des bétons de plâtre renforcés par des fibres végétales du palmier dattier [33].

On a essayé dans cette étude d'examiner le comportement, dans le temps dans **trois** milieux hygroscopiques, des mortiers de plâtre et ceux allégés par les granulats de polystyrène avec le diamètre et le pourcentage optimaux qui ont donné les meilleures propriétés mécaniques du point de vue résistance à la flexion : soit  $D = 3.15$  mm avec une fraction volumique de granulats de 25 %. Cette partie est également consacrée à une étude de durabilité vis-à-vis de l'attaque du composite par des acides et les sulfates.

### **II.1. INFLUENCE DES DIFFÉRENTS MILIEUX HYGROMÉTRIQUES SUR LES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES BÉTONS DE PLÂTRE LÉGER EN FONCTION DU TEMPS**

Les éprouvettes ont été conditionnées à l'air ambiant du laboratoire jusqu'à l'âge de 28 jours, afin d'atteindre leurs résistances caractéristiques, après elles ont été conservées dans :

- les conditions du laboratoire ( $T=20\pm 2^\circ\text{C}$ ,  $HR = 65\pm 5\%$ ), durant 360 jours ;
- une enceinte sous les conditions climatiques ( $T=20\pm 2^\circ\text{C}$ ,  $HR = 95\%$ ), durant 360 jours.
- Pour des cycles de séchage-humidification : conservation pendant 24 heures dans une enceinte ( $T=20\pm 2^\circ\text{C}$ ,  $HR = 95\%$ ) et 24 heures dans une étuve à une température de  $70^\circ\text{C}$ , durant 180 jours (soient 90 cycles).

#### **III.1.1. RÉSISTANCE A LA COMPRESSION**

D'après les figures III.17a, b, on remarque que la résistance à la compression du mortier de plâtre témoin et le mortier allégé croît au fil du temps pour les éprouvettes conservées à l'air ambiant du labo. Cela est dû à la carbonatation lente du mortier et l'effet d'ajout de la chaux comme retardateur de prise. Une diminution a été enregistrée entre 28 et 158 jours (après 60 cycles de séchage – humidification). On peut attribuer cette diminution de la résistance de manière concomitante au plâtre qui a subi des variations dimensionnelles lors du processus de séchage- humidification et que le retrait se produit lorsqu'on élimine le dernier pourcentage d'humidité résiduelle. De plus l'amplitude du retrait ne dépendrait pas du mode de séchage, lent ou rapide à séchage équivalent [139], la baisse de la résistance peut être justifiée aussi par l'altération de la matrice par le gradient thermique. Nos résultats sont en accord avec ceux des travaux antérieurs [33. 139]. On a enregistré aussi une légère diminution de la résistance à l'état humide et une augmentation de la résistance à l'air ambiant du laboratoire, qui est due toujours

à l'évolution de la réaction d'hydratation et l'effet de la carbonatation lente qui stabilise le pH du milieu dans le temps [140].

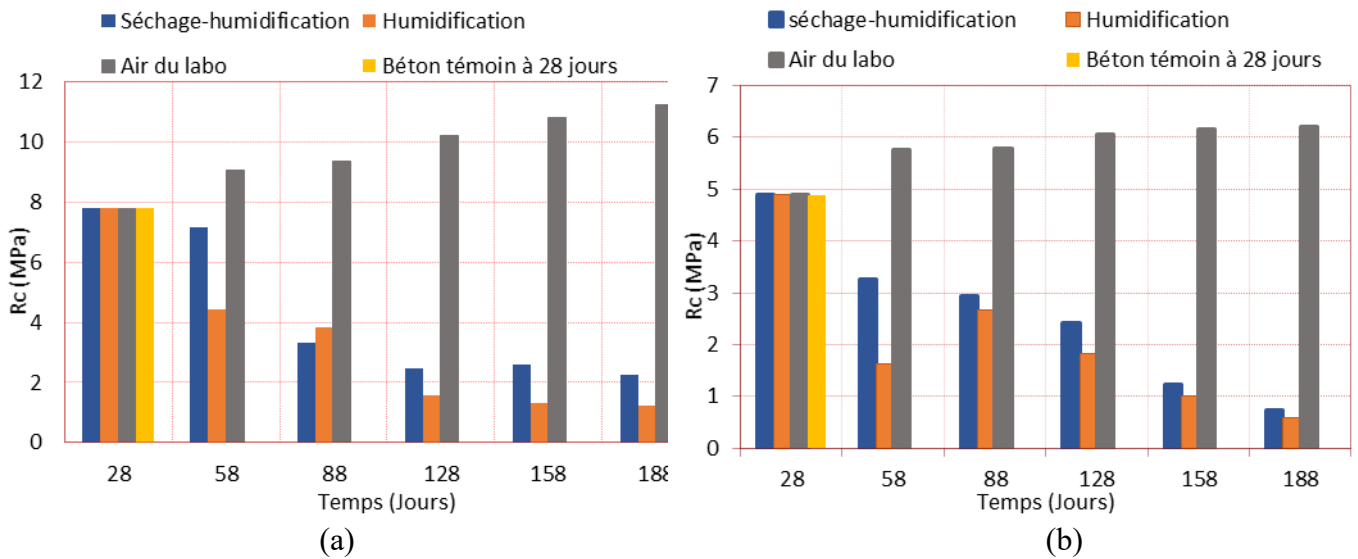


Fig. III. 17. Variation de la résistance à la compression dans le temps et dans différents milieux hygroscopiques : (a) mortier de plâtre seul - (b) mortier de plâtre-polystyrène.

Concernant la résistance des éprouvettes conservées continuellement dans l'humidité, elle varie sensiblement dans le temps, cette variation peut être due au fait que la tenue du plâtre à l'état saturé est mauvaise ; la quantité d'eau absorbée joue un rôle sur la diminution de la résistance [16]. Meille a montré qu'un pourcentage de 5 % d'eau adsorbée (% en masse rapportée à la masse du plâtre sec) est suffisant pour abaisser la résistance [16].

### II.1.2. RÉSISTANCE A LA TRACTION PAR FLEXION

La figure III.18 montre que la résistance à la flexion des éprouvettes du mortier de plâtre (allégé et non allégés) conservées à l'air ambiant du laboratoire croît considérablement dans le temps. Ceci est dû à l'effet bénéfique de l'ajout de la chaux aérienne comme retardateur de prise, tandis que pour les éprouvettes conservées dans une ambiance humide, la résistance à la flexion décroît dans le temps et cela peut être expliqué, d'après la littérature, par la quantité de l'eau adsorbée qui est un paramètre important pour repérer les modes d'actions de l'eau sur le comportement mécanique [139,141]. Les toutes premières quantités d'eau adsorbées agissent très défavorablement sur les propriétés mécaniques, une reprise d'eau de 2% en masse est considérée comme valeur limite au-delà de laquelle les propriétés sont stabilisées [141]

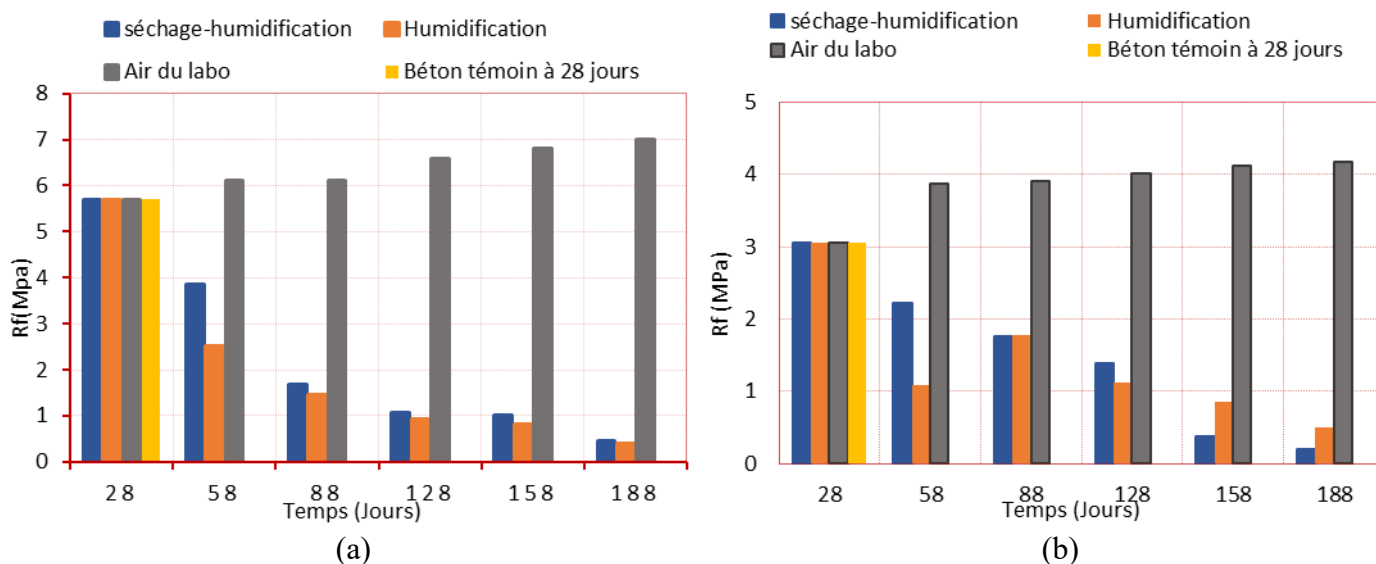


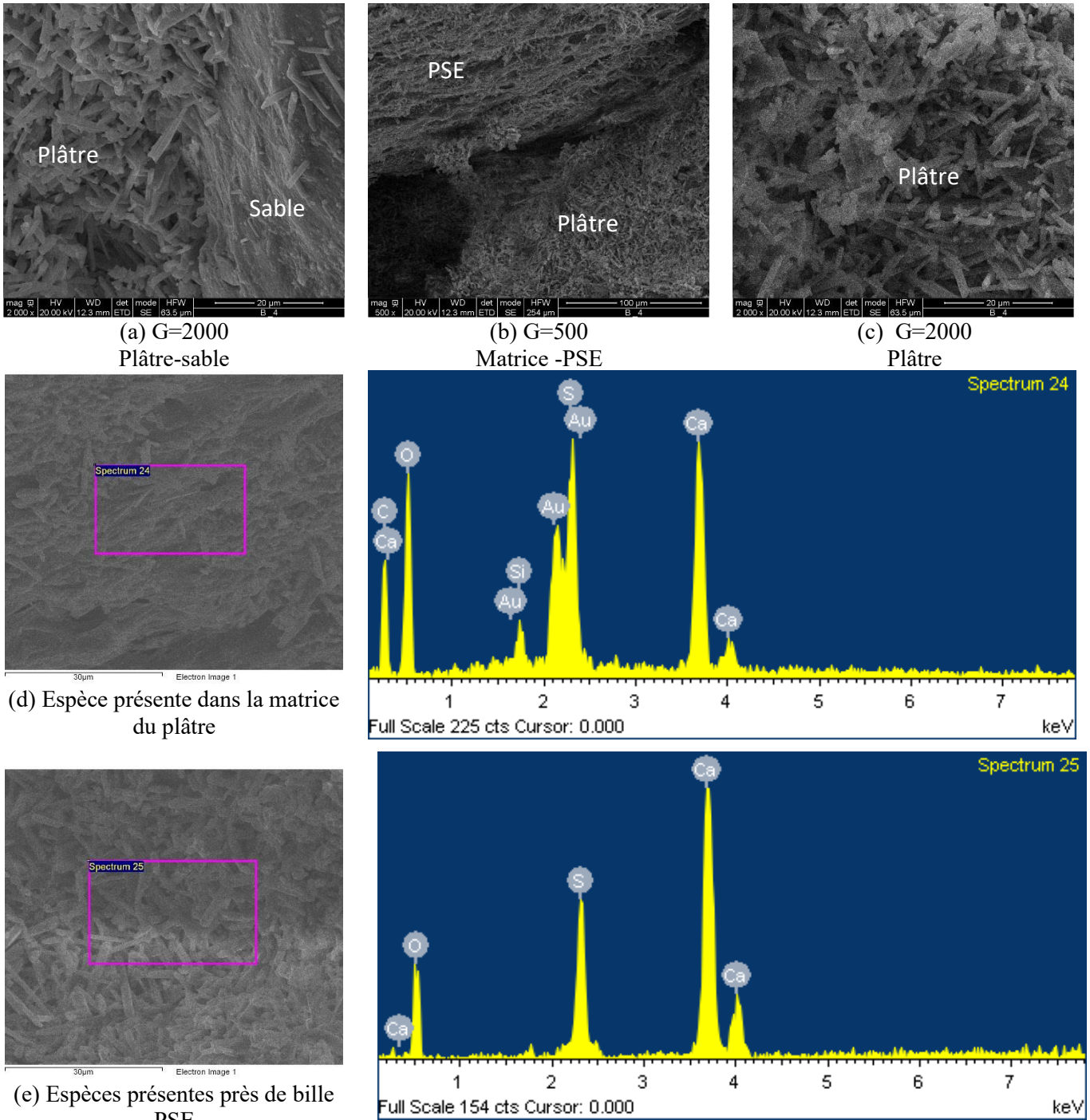
Fig. III.18. Variation de la résistance à la flexion dans le temps et dans différents milieux hygroscopiques : (a) mortier de plâtre, (b) mortier de plâtre allégé MP3.15.

Pour les éprouvettes soumises aux cycles de séchage- humidification, la résistance à la flexion diminue et cela peut être attribué au phénomène de dissolution – recristallisation du gypse dû aux variations dimensionnelles du matériau causées par le gradient thermique des deux matériaux, qui ne sont pas compatibles mécaniquement. Nos résultats sont en accord avec ceux de la littérature. Djoudi a également étudié l'influence de l'humidité et les cycles séchage - humidification sur les propriétés mécaniques d'un béton de plâtre renforcé par les fibres de palmier dattier ; ses résultats relèvent une diminution de la résistance mécanique dans les différents milieux étudiés [33].

### II.1.3. ANALYSE PAR MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE

#### II.1.3.1. MORTIER DE PLATRE CONSERVE DANS L'HUMIDITE

Des analyses au MEB ont été réalisées sur différents points du composite conservé 180 jours dans l'humidité. L'analyse de l'interface "sable-plâtre" a montré une bonne adhérence entre les grains de sable et la pâte de plâtre. En effet, aucun écart n'a été observé entre ces deux composants (Figure 9a). Par contre, l'analyse de l'interface de PSE / matrice a montré une mal adhérence entre les billes de polystyrène et la matrice de plâtre, où un écart est observé. Cet écart est d'environ 5 µm (Figure III.19b). Cela pourrait expliquer la diminution de la résistance mécanique précédemment observée.



**Fig. III. 19.** Mortier de plâtre : conservé 58 jours (28 jours à l'air au labo et 30 jours dans l'humidité).

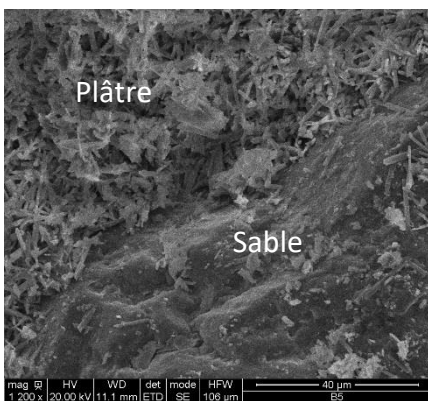
D'autre part, les analyses EDX de la matrice en plâtre montrent que les espèces principales présentes sont le soufre « S » et le calcium « Ca » avec un rapport Ca / S de 2,3 (Figure III.19d). L'interface "PSE-Matrice" a également été analysée par EDX. Cette teneur en calcite est grande, ce qui confirme que la réaction de la carbonatation a été favorisée par l'humidité. Il a été constaté que les principales espèces présentes à proximité des billes de PSE sont également « S » et « Ca » et le rapport « Ca / S » est de 1,06. Il est clair que « Ca » et « S »

provenaient du plâtre (Figure III.19e.). Notons que la Figure II.1 montre également que le sulfate de calcium est le composant principal du plâtre utilisé. L'hydratation du plâtre conduit alors à la formation des cristaux de gypse. Selon la figure III.19c, il est clair que seules des formes d'aiguilles sont présentes dans la matrice. Ces aiguilles semblent mal enchevêtrées et mal interférées. On a observé la taille des cristaux se diffère avec dégradation du gypse et cela est dû au phénomène de recristallisation ; on observe le gypse qui se dissout et se recristallise. Cela pourrait expliquer la diminution de la résistance mécanique observée.

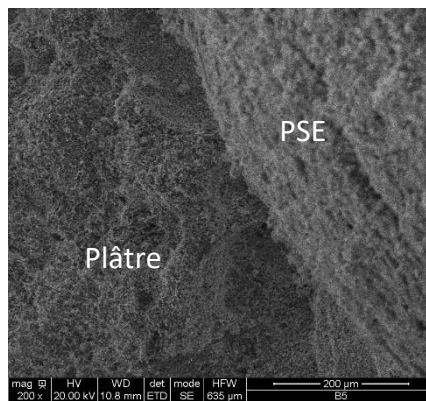
Les grains de sable et les particules de PSE semblent être très résistants à l'effet de l'humidité puisqu'aucune dégradation n'a été enregistrée sur ces deux matériaux après les avoir conservés dans l'humidité.

**II.1.3. 2. MORTIER DE PLATRE APRES -SECHAGE-HUMIDIFICATION-**

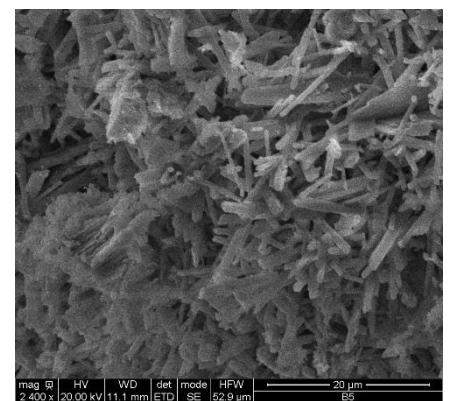
L'analyse au MEB a également été menée sur différents points du composite étudié après 15 cycles « séchage-humidification ». Les résultats de l'observation sont presque les mêmes : bonne adhérence entre les grains de sable et la pâte de plâtre, pas d'espace entre ces deux matériaux (Figure II.20a). De plus, l'analyse de l'interface PSE / matrice a montré une bonne adhérence entre les billes de polystyrène et la matrice de plâtre ; aucun espace n'a été observé entre ces deux matériaux (Figure 20b).



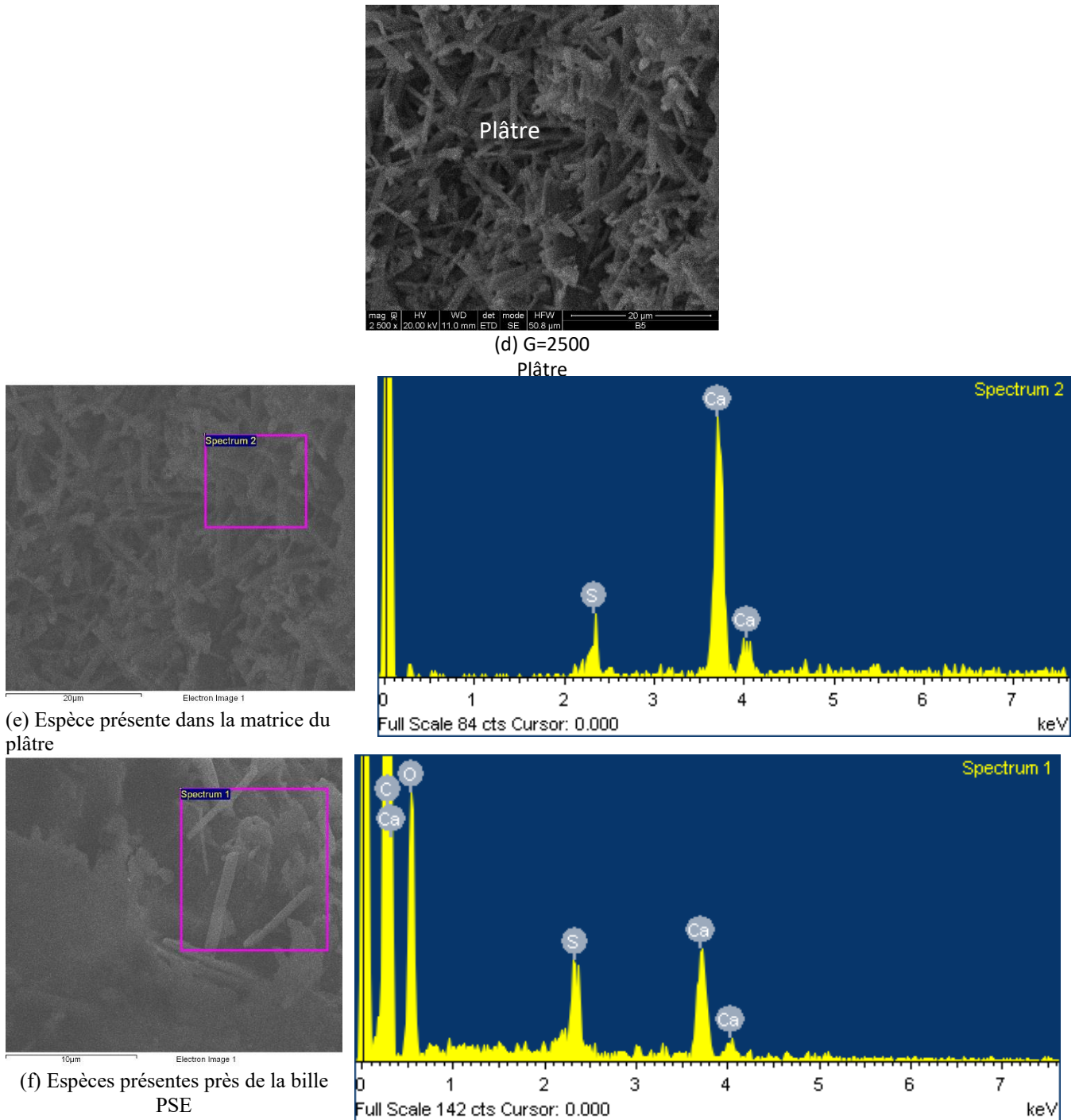
(a) G=1200  
Plâtre-Sable



(b) G=200  
Matrice- Plâtre



(c) G=2400  
Plâtre



**Fig. III. 20.** Mortier de plâtre après 15 cycles « séchage-humidification ».

La matrice apparaît moins dense avec dégradation du plâtre et les points de contact (ancrages mécaniques) sont touchés et les liaisons sont de type tenon- mortaise (Figure III.20c, d). Par contre lors de ce processus, l'interface gypse-granulats est dense et on voit un peu de gypse dégradé (Figure III.20a). On observe que les cristaux sont maigres et cela est dû au phénomène de recristallisation du gypse.

Les principales espèces présentes dans la pâte de plâtre (près d'un grain de sable) sont aussi « S » et « Ca ». Le rapport Ca / S est égal à 0.55 (Figure III.20e). Les principaux constituants

du plâtre sont toujours les mêmes (Figure III.20b). Ce milieu hygrométrique ne modifie donc ni les billes de polystyrène, ni les grains de sable.

De même, l'interface "PSE / matrice"; les espèces principales présentes à proximité des billes de polystyrène sont également « Si » et « Ca » avec un rapport Ca / S de 1.6 (Figure III.20).

## **II.2. EFFET DES ENVIRONNEMENTS CHIMIQUEMENT AGRESSIFS**

Afin d'apprécier l'effet des solutions acides et sulfatées sur le mortier de plâtre à base de polystyrène, les échantillons élaborés ont été soumis à différents environnements : l'eau (considérée comme référence), la solution acide et la solution de sulfate.

La résistance aux acides dans cette étude a été réalisée en s'appuyant sur les travaux faites sur la durabilité des composites en plâtre [141], et la durabilité des bétons de plâtre renforcés par des fibres végétales du palmier dattier [33].

L'attaque par l'acide ou par les sulfates des mortiers de plâtre légers a été déterminée sur des éprouvettes prismatiques de  $40 \times 40 \times 160 \text{ cm}^3$  pour l'essai de compression et la flexion de 3 points.

Après 28 jours de cure dans les conditions ( $20 \pm 2 \text{ }^\circ \text{C}$  et 65 % d'humidité), les éprouvettes sont conservées dans trois environnements :

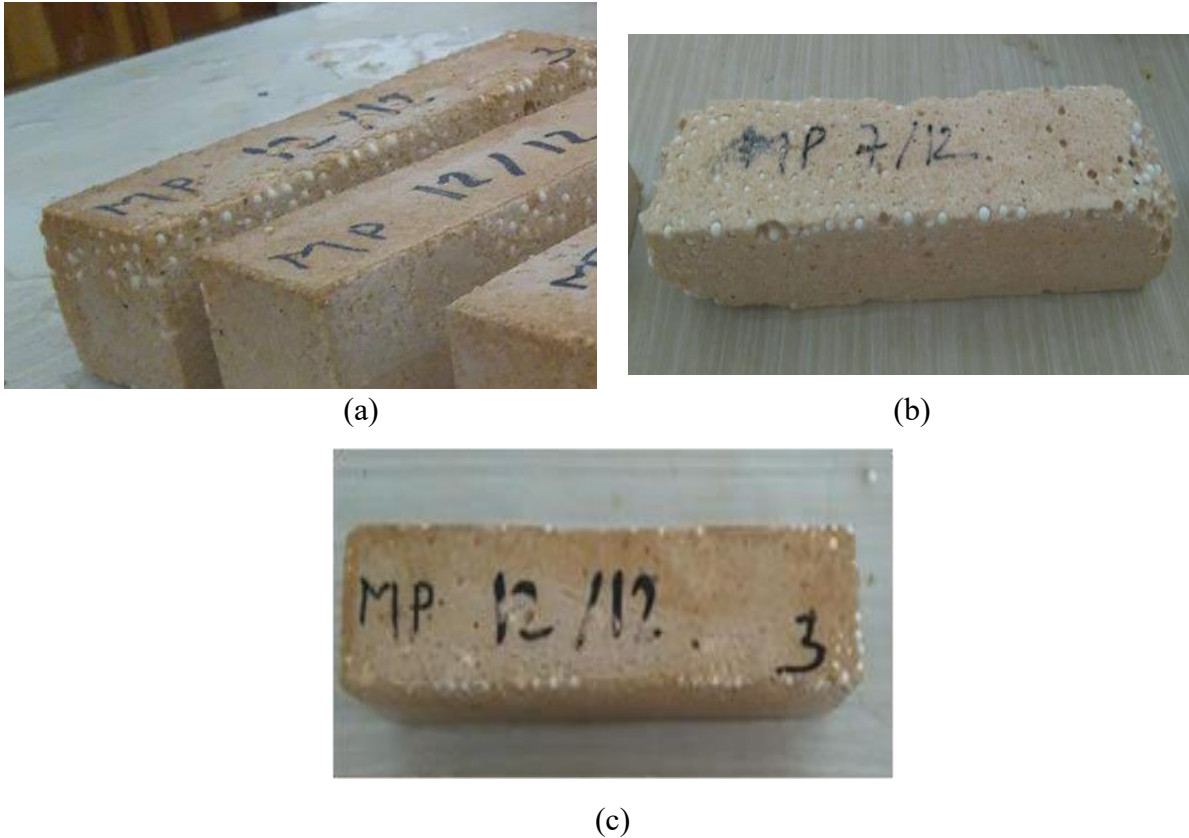
- l'eau déminéralisée, comme référence ;
- une solution de 1% de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ; la solution est renouvelée chaque 15 jours pendant 6 mois.
- une solution de 5 % de sulfate de magnésium  $\text{MgSO}_4$ , la solution est renouvelée tous les 30 jours.

### **II.2.1. ASPECT GENERAL DES ECHANTILLONS**

Tout d'abord, il est clair que même l'eau, sans éléments agressifs, a provoqué une dégradation de la surface des échantillons (Figure III.21a). De plus et d'après une vue générale, il a été observé que la dégradation dans les échantillons conservés en solution acide est légèrement plus sévère: des érosions superficielles générales du plâtre et le détachement de certaines billes de polystyrène sont observés sur la surface externe des échantillons testés. (Figure III.21b). Cependant, cette dégradation superficielle semble être moins nette dans le cas d'échantillons conservés dans une solution de sulfate où la dégradation de la surface est peut-être causée par l'eau seulement (Figure III.21c). Ces résultats peuvent donner un premier signe de l'effet des acides sur le mortier de plâtre à base de PSE.

De plus, ces observations sont en accord avec celles de la littérature. Edgar-Alejandro [122] a également fait les mêmes observations : la cinétique de dissolution du gypse dans l'eau

contenant des acides tartrique et borique était plus grande que dans l'eau pure. Même dans l'eau contenant des sulfates, la cinétique de dissolution du gypse était plus grande que dans l'eau pure, mais moindre que dans la solution acide [143].



**Fig. III. 21.** Aspect général du mortier de plâtre à base de PSE après immersion: (a) dans l'eau, (b) dans une solution acide, (c) dans une solution de sulfate.

Enfin, il convient de noter que ni l'eau seule, ni la présence d'acide ou de sulfate n'a eu d'effet sur les billes de polystyrène expansé. L'expérience a montré qu'ils restent intacts dans les trois solutions étudiées (Figure III.24). Ainsi, l'eau et l'acide / sulfate n'affecte pas le polystyrène, sauf peut-être à des températures très élevées où le polystyrène pourrait passer à la combustion. En effet le polystyrène est facilement combustible à haute température ; il se décompose à environ 300 ° C. Si le matériau est utilisé à des températures très élevées, des additifs peuvent être ajoutés afin d'améliorer sa résistance au feu [144]. En ce qui concerne sa résistance aux produits chimiques, le polystyrène peut être facilement attaqué par des solvants organiques, alors que sa résistance aux produits inorganiques est bonne. Il a de même une bonne résistance aux acides et aux bases, cependant il peut gonfler si l'acide est trop concentré [144-146] ce qui n'est pas le cas dans la présente étude.

**II.2.2. PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES**

La microstructure du plâtre a une grande influence sur les propriétés physiques et énergétiques des matériaux, en particulier leur rigidité due à la nature de l'enchevêtrement des cristaux formés. En effet, la résistance mécanique dépend de plusieurs paramètres, tels que la taille et la forme des cristaux, la force reliant les cristaux, les impuretés, la porosité [16,146-147]. Par conséquent, les cristaux ainsi formés contribuent beaucoup à l'amélioration des propriétés mécaniques du matériau. Même pendant la fissuration, la fissure se propage entre les cristaux (contacts inter-cristallins) et non à travers eux.

Généralement, lors du contact des liquides avec les solides, certains matériaux sont soumis à des phénomènes de croissance et de dissolution. Les paramètres pouvant influencer ces phénomènes sont nombreux, tels que la structure minérale, les défauts de surface, la pression, la température, le pH, les conditions hydrodynamiques, etc. La compréhension de ces phénomènes nécessite une connaissance précise de la microstructure des minéraux. De nombreuses études ont été réalisées dans ce contexte, mais certaines questions restent toujours sans réponse.

Malheureusement, le plâtre est l'un des matériaux qui peuvent être soumis à la dissolution au contact des liquides. Ses surfaces deviennent chimiquement actives au contact de l'eau ou de solutions aqueuses. La présente étude a, non seulement étudié l'effet de l'eau pure sur le comportement du plâtre, mais aussi l'effet de la présence d'acides et de sulfates dans l'eau, ce qui justifie d'ailleurs le choix des trois environnements de conservation.

Les propriétés mécaniques mesurées après immersion dans les différents milieux étudiés (eau, solution acide et solution de sulfate) sont illustrées par la figure III.22.

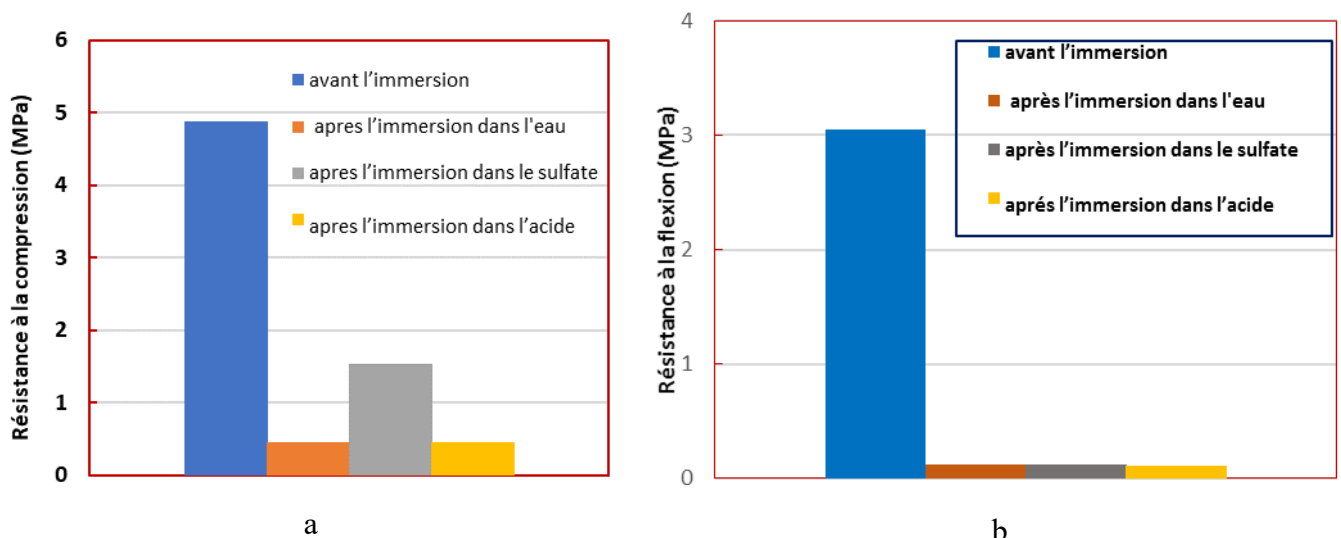


Fig. III. 22. Propriétés mécaniques pour les mortiers de plâtre allégés par les granulats de polystyrène expansé conservés dans les différents milieux étudiés.

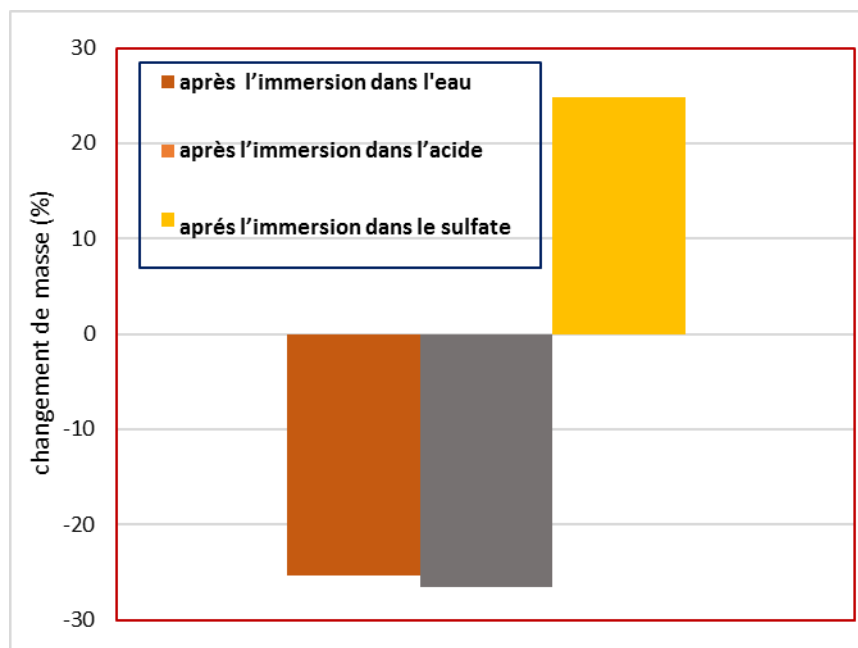
Il est clair qu'une forte baisse des propriétés mécaniques a été enregistrée après immersion des échantillons à base de plâtre dans les solutions envisagées. Cette immersion conduit, en effet, à la solubilité du gypse qui diminue généralement la résistance mécanique du plâtre [148]. Dans la présente étude, la résistance à la compression du mortier de plâtre à base de polystyrène a diminué d'environ 90% lorsque les spécimens ont été immergés dans l'eau pure. Mais il convient de noter que cette propriété n'a été diminuée que de 67% lorsque les échantillons ont été immergés dans des solutions (acide et sulfate). Comme indiqué précédemment, l'eau seule a une grande influence sur les matériaux par rapport à une solution acide, ce qui confirme que la présence d'acide dans l'eau améliore la résistance à la compression des composites de plâtre à base de PSE (Figure III.22a), c'est-à-dire, l'acide diminue l'effet négatif de l'eau sur le matériau de plâtre. Alors que la présence de sulfate de magnésium dans l'eau n'a pas d'effet supplémentaire sur le matériau de plâtre par rapport à l'eau seule. Ces résultats sont en accord avec ceux de la littérature. Badens (1998) a également étudié l'influence de l'eau sur les propriétés mécaniques d'un plâtre et d'un plâtre purs avec différents acides : acide tartrique, acide borique, acide malique et acide adipique. Il a été démontré que certains acides réduisent l'effet de l'eau sur le comportement mécanique du plâtre. Parmi les acides étudiés, seul l'acide adipique a eu un effet adverse, tandis que les autres acides ont contribué à diminuer l'effet de l'eau sur les propriétés mécaniques [141].

D'autre part, la résistance à la flexion du mortier de plâtre à base de PSE a diminué d'environ 96% lorsque les spécimens ont été immergés dans l'eau. Mais il convient de noter que lorsque les échantillons ont été immergés dans une solution acide ou sulfate, la diminution était également d'environ 96%, ce qui montre que, par rapport à l'eau, le sulfate de magnésium et les solutions acides n'ont aucun effet supplémentaire sur le plâtre (Figure III.22b). Généralement, en présence d'eau pure, des variations significatives du comportement du matériau de plâtre peuvent être observées [139, 141]. En effet, le plâtre sec présente un comportement élastique ; mais ce comportement devient élastoplastique avec l'augmentation de l'eau absorbée (augmentation de l'humidité relative), ce qui diminue par conséquent les propriétés mécaniques du plâtre, notamment en traction [16].

#### **II.2.3. CHANGEMENTS DE MASSE**

Les résultats des changements de masse des mortiers de plâtre à base de PSE étudiés après immersion dans des solutions sont illustrés par la figure III.23.

Dans le cas de l'eau et de la solution acide, des pertes de masse ont été observées tandis que dans le cas de la solution de sulfate, un gain de masse a été observé.



**Fig. III. 23.** La perte de masse pour les mortiers de plâtre allégés par les granulats de polystyrène expansé conservés dans les différents milieux.

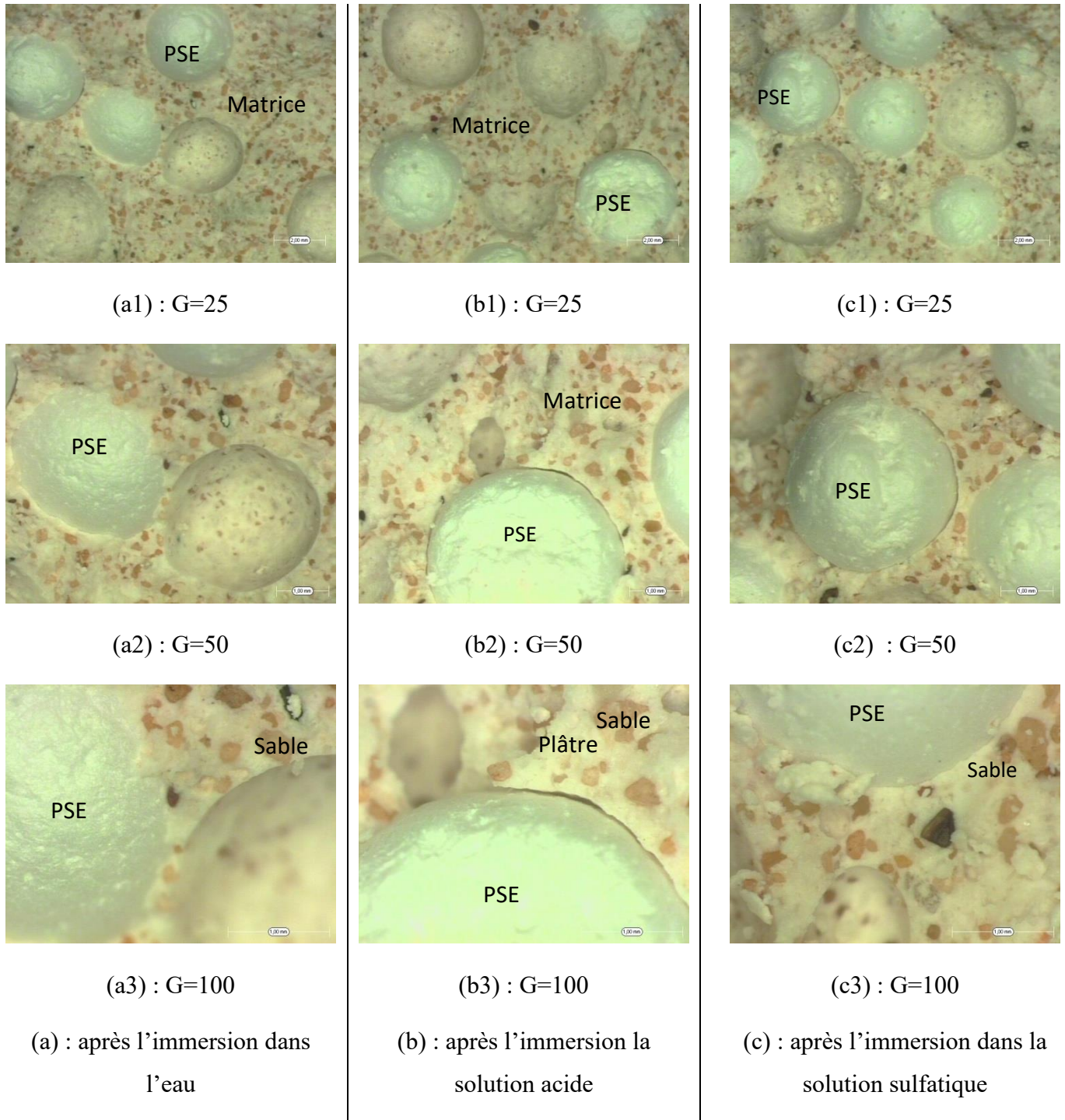
En ce qui concerne la perte de masse, il est clair qu'il n'y a pas de différence significative entre la conservation dans l'eau et dans la solution acide (Figure III.23): environ 25% dans l'eau et environ 26% dans la solution acide. En fait, juste une différence d'environ 1% qui peut être expliquée par l'érosion superficielle du plâtre observée après immersion dans une solution acide (Figure 3a). Alors, que les plâtres de gypse ne sont pas affectés par la présence de sulfate de magnésium dans l'eau. Généralement, le sulfate de magnésium a un effet négatif dans le cas d'un enduit à base de ciment ou de chaux (c'est-à-dire alcalin). Parmi ses effets, il provoque un manque de liaison dû à la formation de cristaux en forme d'aiguilles de sulfate de magnésium sous la surface du plâtre. Ce phénomène se produit parce que la surface de magnésium est dissoute par l'eau dans le plâtre humide et réagit avec de la chaux éteinte (sulfate de calcium), formant un dépôt d'hydroxyde de magnésium.

En effet, dans les plâtres de gypse, la cristallisation du sulfate de magnésium se produit à la surface du plâtre et apparaît comme une efflorescence et provoque, par conséquent, un gain de masse [149].

#### **II.2.4. ANALYSE PAR MICROSCOPE OPTIQUE**

Bien que des érosions superficielles du plâtre aient été observées après immersion dans les solutions étudiées (plus sévères dans le cas de l'acide), à l'intérieur des échantillons d'essai et

avec un grossissement plus élevé ( $G = 100$ ), il semble que le composite est relativement homogène et compact, dans tous les cas d'immersions. Les grains de sable et les billes de PSE sont bien répartis dans la pâte de plâtre (Figure III.24) et les adhérences matrice / PSE et plâtre / grain de sable sont, dans la plupart des cas, bonnes (Figure III.25a, b, Figure 26a, b et Figure 27.a, b).



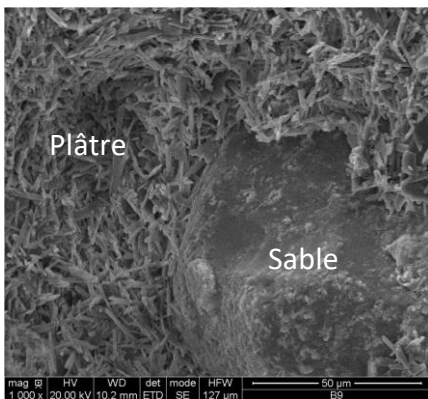
**Fig. III. 24.** Visualisation au microscope vidéo d'un mortier de plâtre à base de PSE après immersion dans différentes solutions.

**II.2.5. ANALYSE PAR MICROSCOPIE ÉLECTRONIQUE À BALAYAGE**

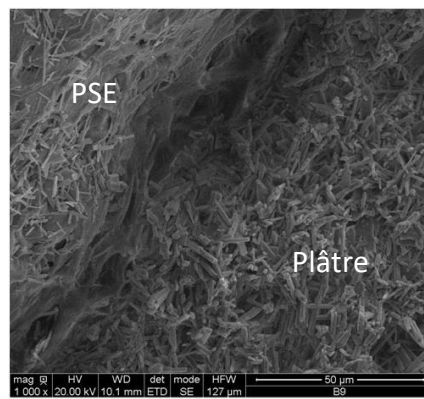
Une analyse par microscopie électronique à balayage permettra d'apprécier l'effet des modes de conservation étudiés à l'échelle microscopique. Cette analyse offre plus de détails pour expliquer les résultats des autres techniques de caractérisation, ainsi que les propriétés matérielles. Les échantillons conservés dans les trois environnements étudiés ont été soumis à une analyse menée par MEB. Ils ont d'abord été séchés, puis recouverts d'une fine couche d'or pulvérisé, qui a agi comme un conducteur.

**a- Échantillons conservés dans l'eau:**

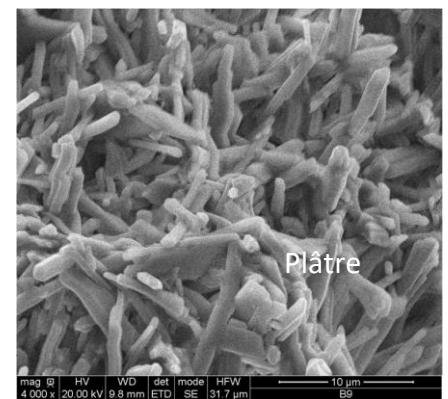
Des analyses au MEB ont été faites en différents points du composite étudié après leur immersion dans l'eau. L'analyse de l'interface "sable-plâtre" a montré une bonne adhérence entre les grains de sable et la pâte de plâtre. En effet, aucun écart n'a été observé entre ces deux composants (Figure III.25a). De plus, l'analyse de l'interface PSE / matrice a également montré une bonne adhérence entre les billes de PSE et la matrice de plâtre ; aucun espace n'a été observé entre ces deux composants (Figure III.25b).



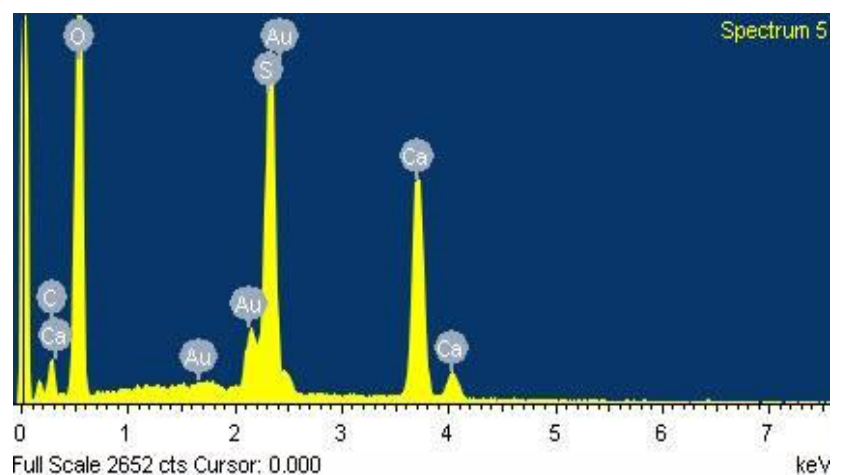
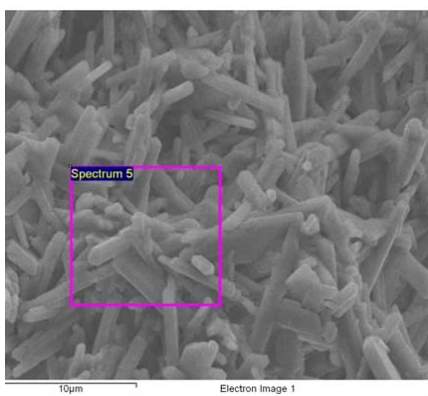
(a) G=1000  
Plâtre - Sable



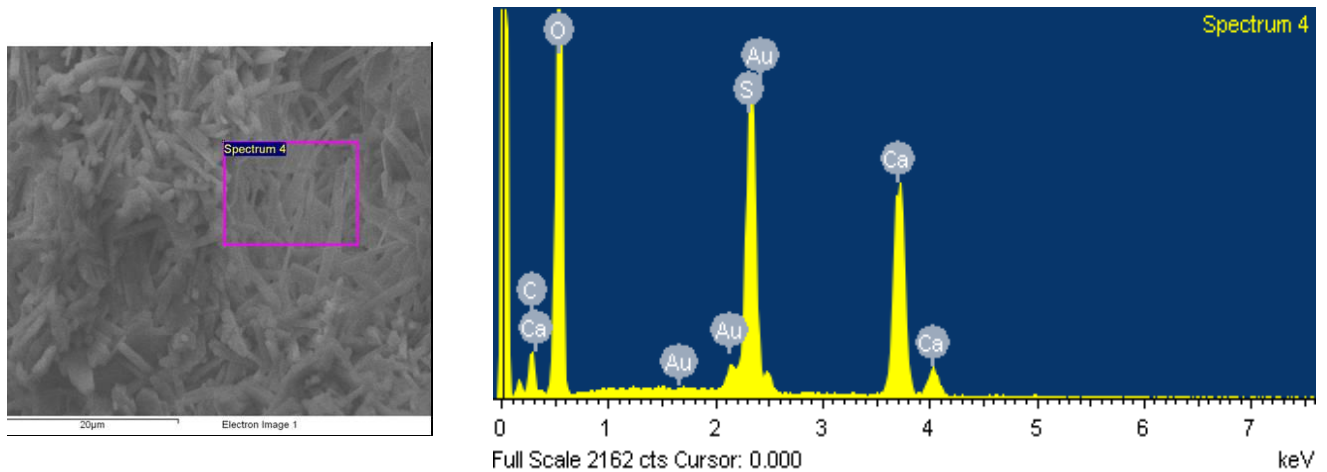
(b) G=1000  
Plâtre -PSE



(c) G=4000  
Plâtre



(d) Espèces présentes dans la matrice du plâtre



(e) Espèces présentes près de la bille PES

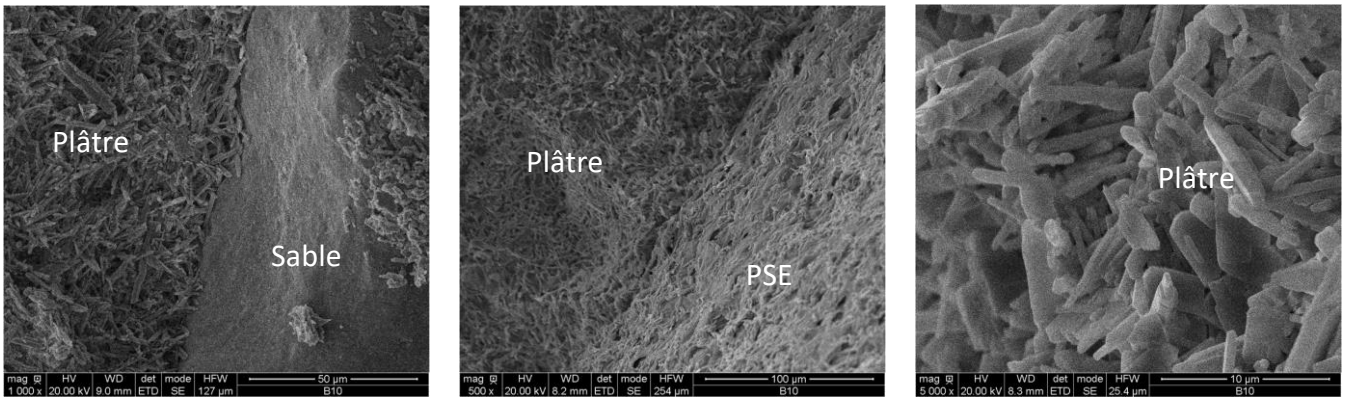
**Fig. III. 25.** Analyse SEM et EDX d'un mortier de plâtre à base de PSE après immersion dans l'eau.

D'autre part, les analyses EDX de la matrice en plâtre montrent que les espèces principales présentes sont « S » et « Ca » avec un rapport Ca / S de 0,73 (Figure III.25d). L'interface " PSE -matrice" a également été analysée par EDX. Il a été constaté que les principales espèces présentes à proximité des billes de PSE sont également « S » et « Ca » et le rapport Ca / S est de 0,8. Il est clair que « Ca » et « S » provenaient du plâtre (Figure III.25e.). Notons que la composition chimique montre également que le sulfate de calcium est le composant principal du plâtre utilisé. L'hydratation du plâtre a ensuite conduit à la formation de cristaux de gypse. La morphologie des cristaux ainsi formés est, en effet, le résultat des conditions d'hydratation de la pâte. Selon la figure III.25c, il est clair que seules des formes d'aiguilles sont présentes dans la matrice. La bonne disposition de ces aiguilles (bon enchevêtrement) donne au plâtre la bonne cohésion qui en fait un bon matériau de construction. San-Antonio-González et al. ont également observé des aiguilles cristallines formées par l'hydratation du gypse en présence de déchets de polystyrène extrudé. Ils ont même confirmé que la cohésion entre le gypse et les billes de polystyrène extrudé est bonne [150]. Enfin, il convient de noter qu'aucune réaction chimique particulière n'a eu lieu avec l'eau, à l'exception de certaines décompositions de surface dans le plâtre. Les grains de sable et les particules de PSE semblent être très résistants à l'effet de l'eau puisqu'aucune dégradation n'a été enregistrée sur ces deux matériaux après immersion dans l'eau.

**b- Échantillons conservés en solution acide:**

Une analyse SEM a également été menée sur différents points des composites étudiés après leur immersion dans une solution acide. L'analyse de l'interface "sable-plâtre" (à l'intérieur des échantillons) a également montré une bonne adhérence entre les grains de sable et la pâte de plâtre ; aucun espace n'a été observé entre ces deux matériaux (Figure III.26a). De plus,

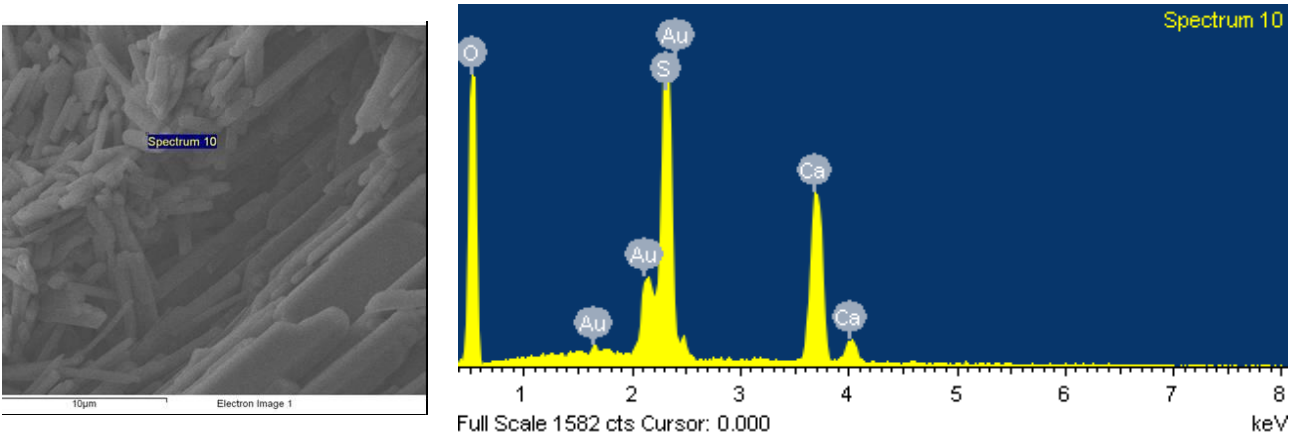
l'analyse de l'interface "PSE-matrice" a également montré une bonne adhérence entre les billes d'PSE et la matrice de plâtre ; aucun espace n'a été observé entre ces deux matériaux (Figure III.26b).



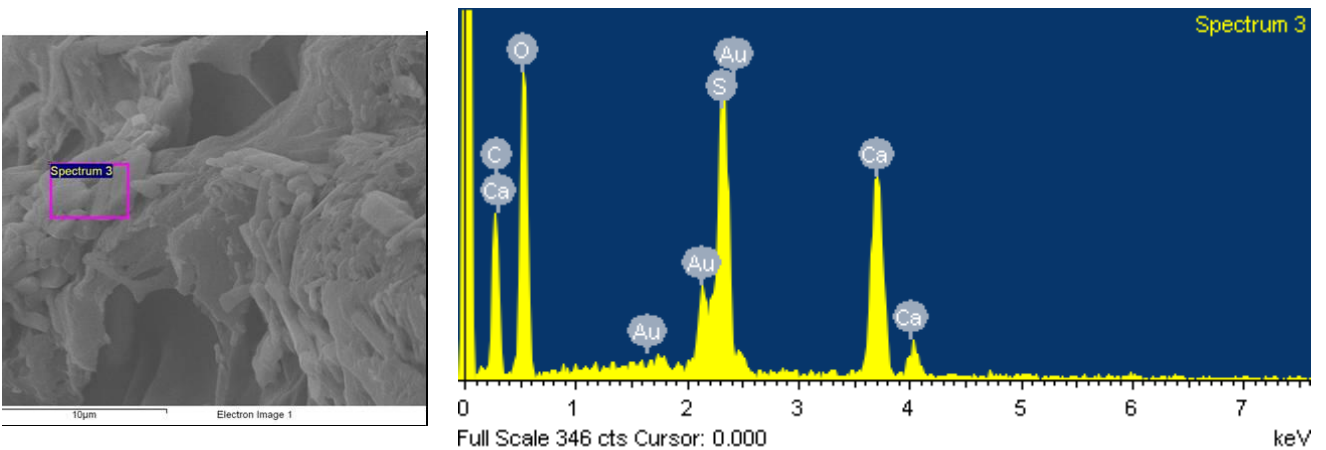
(a) Plâtre - Sable G=1000

(b) Plâtre - PSE G=500

(c) Plâtre G=5000



(d) Espèce présente dans la matrice du plâtre



(e) Espèces présentes près de bille PSE

**Fig. III.26.** Analyse SEM et EDX d'un mortier de plâtre à base de PSE après immersion dans une solution acide.

En ce qui concerne la morphologie des cristaux ainsi formés, qui sont en effet le résultat des conditions d'hydratation de la pâte, la figure III.26c montre que seules des formes d'aiguilles

sont présentes. Ces aiguilles semblent bien enchevêtrées et bien interférées, ce qui confère au plâtre le caractère contraignant en tant que matériau de construction.

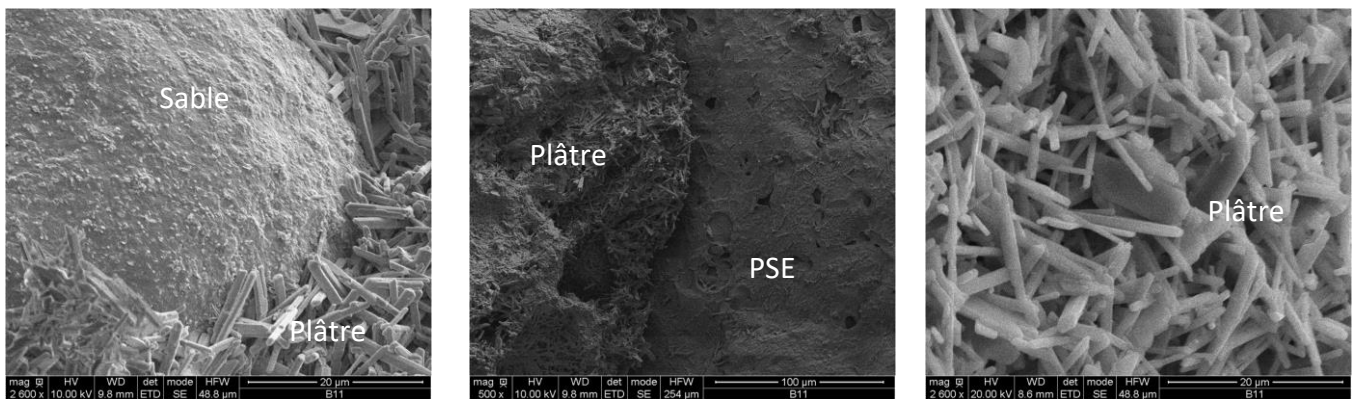
Une autre analyse SEM menée sur la matrice en plâtre a montré que les espèces principales présentes sont « S » et « Ca » avec un rapport Ca / S de 0,66 (Figure III.26d.), ce qui est très logique car « Ca » et « S » sont les constituants principaux du plâtre. De plus, l'analyse du grain de sable a également confirmé que le sable de dune utilisé était essentiellement de nature siliceuse. Il a été également montré que la solution d'acide ne modifiait pas les grains de sable des dunes.

En examinant l'interface "PSE-matrice", on a trouvé que les espèces principales présentes à proximité des billes de PSE sont également « S » et « Ca », avec un rapport Ca / S de 0,81: il est clair que « Ca » et « S » provenaient du plâtre (Figure III.26e).

D'autre part, certaines bulles d'air se sont formées dans le composite étudié. L'analyse au MEB effectuée sur la surface interne de ces bulles d'air a montré que seuls des éléments «Ca» étaient présents, ce qui confirme que ces bulles d'air se sont formées dans la pâte de plâtre seulement.

**c- Échantillons conservés dans une solution de sulfate :**

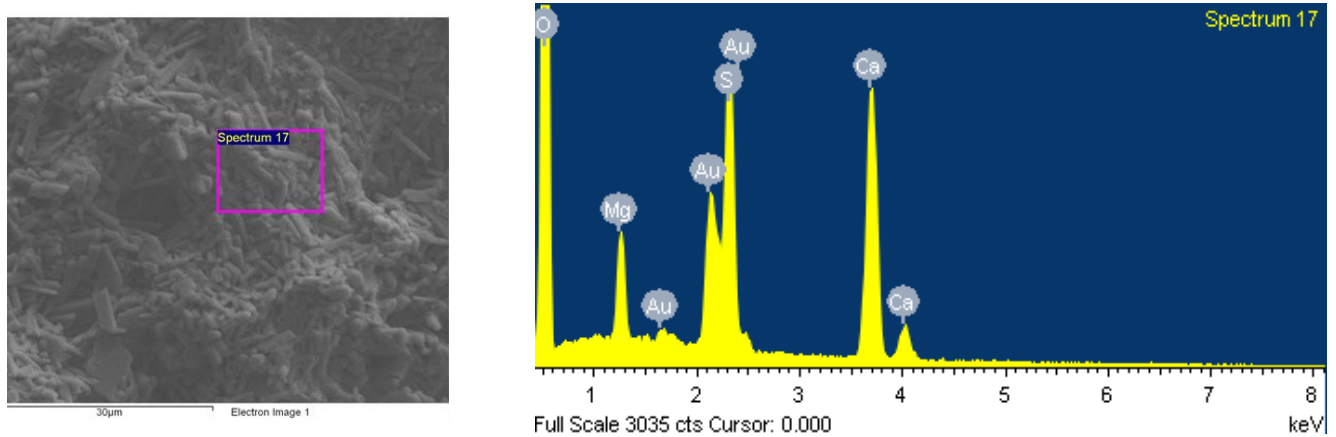
L'analyse au MEB a également été menée sur différents points du composite étudié après son immersion dans une solution de sulfate. Les résultats de l'observation sont les mêmes : bonne adhérence entre les grains de sable et la pâte de plâtre, pas d'espace entre ces deux matériaux (Figure 27a). De plus, l'analyse de l'interface PSE / matrice a également montré une bonne adhérence entre les billes de PSE et la matrice de plâtre ; aucun espace n'a été observé entre ces deux matériaux (Figure III.27b). Mais il convient de noter que certaines billes de PSE ont été détériorées après immersion dans la solution de sulfate.



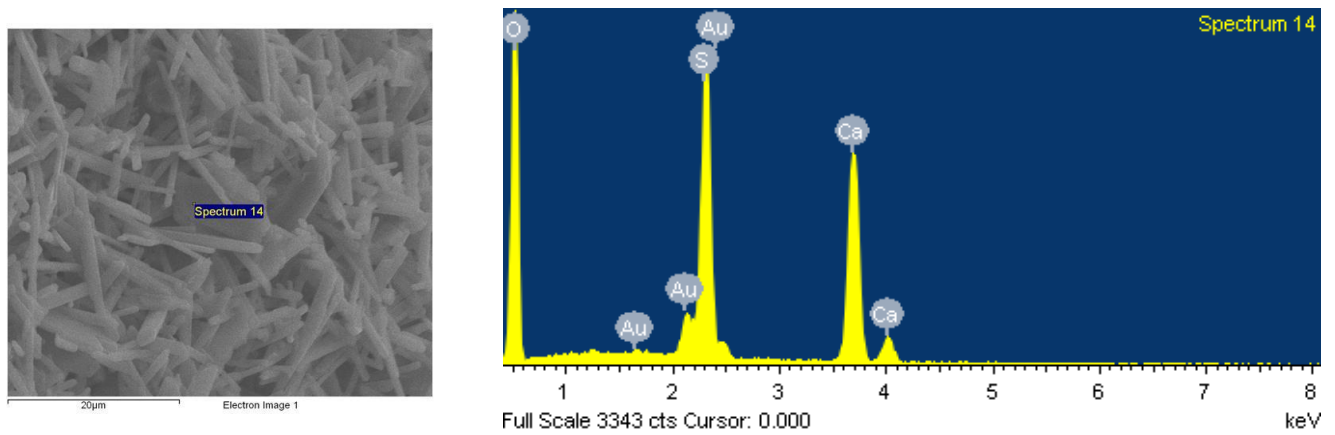
(a) Plâtre -Sable G=2600

(b) Plâtre – PSE G=500

(c) Plâtre G=2600



(d) Espèce présente dans la matrice du plâtre



(e) Espèces présentes près de bille PSE

**Fig. III. 27.** Analyse SEM et EDX d'un mortier de plâtre à base de PSE après immersion dans une solution de sulfate.

Une fois de plus, seuls les cristaux en forme d'aiguille sont observés (Figure III.27c). Ces aiguilles étaient enchevêtrées et interférées. Le caractère contraignant du plâtre ne change pas pendant l'immersion.

Les principales espèces présentes dans la pâte de plâtre (près des grains de sable) sont aussi « S » et « Ca ». Le rapport Ca / S est égal à 1,06 (Figure III.27d). Les principaux constituants du plâtre sont toujours les mêmes (Figure III.27). Cette immersion ne modifie, donc, ni la pâte de plâtre, ni les sables dunaires.

De même, l'interface "PSE / matrice"; les espèces principales présentes à proximité des billes de PSE sont également « Si » et « Ca » avec un rapport Ca / S de 0,81 (Figure III.27e).

Des bulles d'air ont également été observées dans le composite étudié. L'analyse au MEB effectuée sur la surface interne de ces bulles d'air a montré que seuls des éléments "Ca" étaient présents. Mais cette fois-ci, les conditions d'immersion influencent l'adhésion PSE / matrice ;

un écart est observé. Cet écart est d'environ 10  $\mu\text{m}$ . Cela pourrait expliquer la diminution de la résistance mécanique observée.

Enfin, il faut rappeler que les pansements usuels sont généralement des poudres sèches qui sont obtenues par déshydratation partielle du gypse. Le contact du plâtre avec l'eau conduit à une pâte fraîche qui durcit lorsque l'eau se combine avec l'hémihydrate pour reproduire le gypse déshydraté d'origine. Le résultat de ce phénomène est un matériau durci à haute porosité [151]. Même après immersion, quelle que soit la nature de la solution d'immersion, les mortiers de plâtre étudiés conservent leur structure poreuse (Figures III.25a, III.26a et III.27a). De plus, cette porosité est encore augmentée par la porosité du polystyrène qui ne semble pas être influencée par l'acide et l'eau (Figures III.25a b, III.26a b et III.27a b).

### **III. POTENTIEL D'UTILISATION DES BETONS DE PLATRE LEGRS**

- **BP3.15** et **BP4** avec une teneur inférieure à 40 %, constituent un béton léger d'isolation et de construction (isolant porteur) : la masse volumique est inférieure à **1800 kg/m<sup>3</sup>**, une résistance à la compression supérieure à **4 MPa** et une conductivité thermique inférieure à **0.75 W/m/ K**. Ce béton peut être considéré comme utilisable, en maçonnerie comme dans des blocs pleins ou creux, pour les murs extérieurs en milieux arides.

L'épaisseur des murs sera déterminée en fonction du confort thermique recherché. Elle sera supérieure ou égale à 20 cm pour les murs porteurs extérieurs, à 15 cm pour les murs porteurs intérieurs selon les recommandations de **CNERIB** [8].

- **BP3.15** et **BP4** avec une teneur supérieure à 40 %, et **BP5-7**, constituent un béton pour les murs non porteurs ou pour l'isolation des murs ou des toitures comme des plaques, avec une masse volumique inférieure à **1800 kg/m<sup>3</sup>** qui peut descendre jusqu'à **502 kg/m<sup>3</sup>**, une résistance à la compression supérieure à **1 MPa** et une conductivité thermique inférieure à **0.30 Wm<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>**. Les murs non porteurs, cloisons et murs intérieurs sont réalisés en blocs creux de 15 cm d'épaisseur, en blocs pleins de 10 cm d'épaisseur ou en carreaux du composite à base de plâtre de 7 et 10 cm d'épaisseur [8].

### **IV. CONCLUSION**

Cette partie nous a permis de prendre connaissance des classes de bétons de plâtre légers en fonction de la densité et les valeurs limites de la résistance mécanique et de la conductivité thermique. A la base de cette classification nous avons retenu les valeurs cibles suivantes :

Les gammes de densité dans lesquelles varient ces bétons de polystyrène sont de 1414 à 581 kg/m<sup>3</sup> pour le BP3.1 et de 1414 à 544 kg/m<sup>3</sup> pour le BP4 et 1414 à 502 kg/m<sup>3</sup> pour le BP5-7.

Les résistances mécaniques restent bien dans les normes exigées pour le béton témoin de construction et d'isolation (classe II) et pour (BP3.15, BP4 et BP5-7) classé un béton d'isolation (classe III) conformément au classement fonctionnel de la RILEM [29] et la norme EN13279-1 qui exigent une résistance minimale de 2 MPa pour la compression et 1 MPa pour la résistance à la flexion. Ces résistances restent bien dans les normes exigées pour un béton léger de faible résistance : ( $\rho = 300-800 \text{ kg/m}^3$  et résistance de compression  $R_c < 7 \text{ MPa}$ ) conformément à la classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87 [28].

Les résultats obtenus montrent que les composites BP3.15, BP4 et BP5-7 possèdent une bonne isolation thermique.

La durabilité de ce béton dans différents milieux a été également étudiée. En tant qu'aspect général, la conservation du composite de plâtre à base de PSE dans l'eau, la solution acide et la solution de sulfate dégrade la surface de l'échantillon ; la dégradation est plus visible dans le cas d'une solution acide.

- Bien que la surface soit dégradée, les composites élaborés semblent être relativement homogènes et compacts dans la plupart des conditions de conservation. Les grains de sable adhèrent bien à la pâte de plâtre et l'interface 'PSE / matrice' est peu affectée dans le cas des conditions de sulfate.
- Une baisse des propriétés mécaniques a été enregistrée après immersion des échantillons dans toutes les solutions ; les mesures sont comparables en flexion, mais en compression elles sont beaucoup moins dans le cas de la solution acide.
- Les valeurs de variation de masse semblent être similaires dans toutes les solutions, mais des pertes de masse ont été enregistrées dans le cas de l'eau et de la solution acide tandis qu'un gain de masse a été enregistré dans le cas de la solution de sulfate.
- L'analyse EDX a montré les bonnes adhérences 'PSE / matrice' et 'sable-plâtre' et a confirmé que les principales espèces présentes dans le plâtre sont Ca et S.

# QUATRIEME CHAPITRE

Simulation numérique du comportement  
thermo-physique des murs extérieurs en  
milieu aride

**CHAPITRE IV :**  
**SIMULATION NUMERIQUE DU COMPORTEMENT THERMO-PHYSIQUE DES MURS**  
**EXTERIEURS EN MILIEU ARIDE**

**INTRODUCTION**

Avec l'accroissement des exigences, en termes de performance énergétique et environnementale sur les nouveaux bâtiments, la Simulation Thermique Dynamique STD est de plus en plus intégrée dans le processus de conception des bâtiments. Elle peut aussi être mise en œuvre dans le cas de la réhabilitation thermique.

La réhabilitation thermique consiste, donc, à l'amélioration thermique de l'édifice, notamment, son enveloppe (parois verticales, parois horizontales), par des légères modifications, comme l'isolation par l'extérieur et le changement de menuiserie, ou lourdes comme l'isolation par l'intérieur [80]. Dans le présent travail, on s'intéresse à la réhabilitation thermique des parois verticales, par ajout d'un matériau isolant proposé sous forme de composite de plâtre allégé par des billes de polystyrène à l'intérieur. Une étude de simulation numérique à l'aide du logiciel EnergyPlus a été menée afin d'apprécier le comportement thermo-physique des quatre types de murs, à savoir, un mur à une seule paroi en parpaing (**Mur 1**), un mur à une seule paroi en brique (**Mur 2**), un mur à double paroi en parpaing (**Mur 3**), et enfin un mur à double paroi en brique (**Mur 4**). Les paramètres pris en compte sont l'épaisseur du mur.

**I. CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES DE LA VILLE DE LAGHOUE**

La ville de Laghouat est considérée comme la porte d'accès au sud de l'Algérie (Fig. IV.1) qui 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 [104].

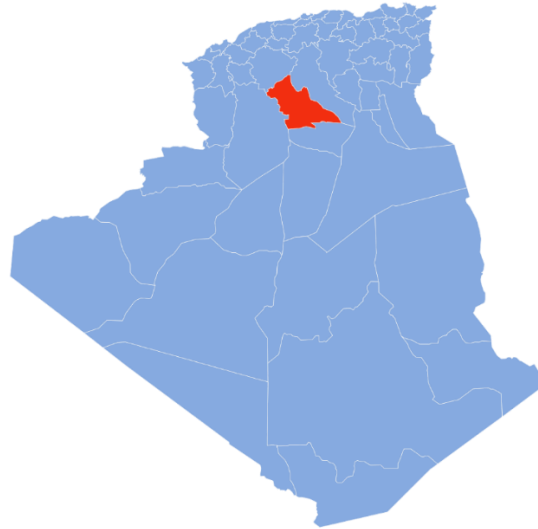


Fig. IV. 1.Situation de la ville de Laghouat [159].

La Fig. IV. 2. montre à titre d'exemple les moyennes des variations de températures mensuelles, maximales et minimales de l'année 2013.

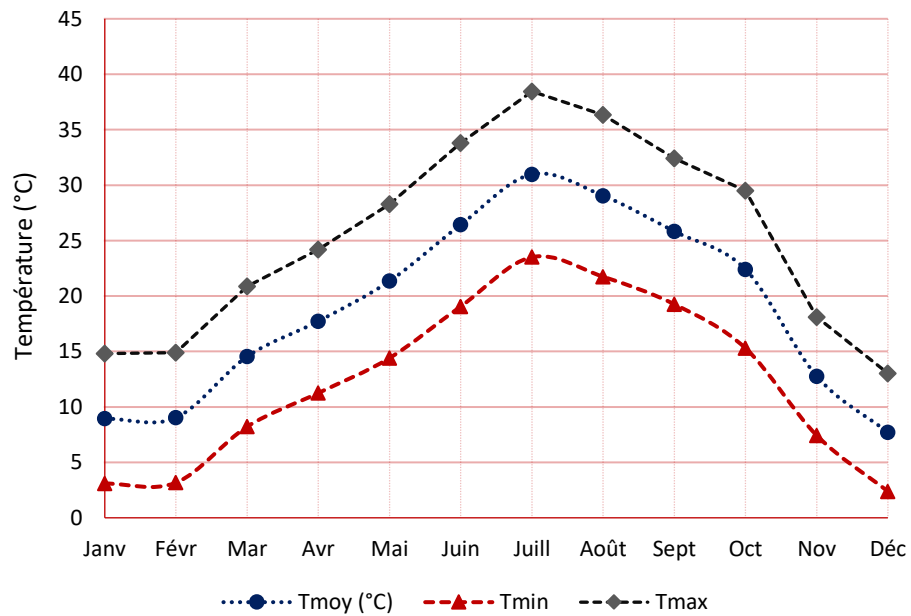
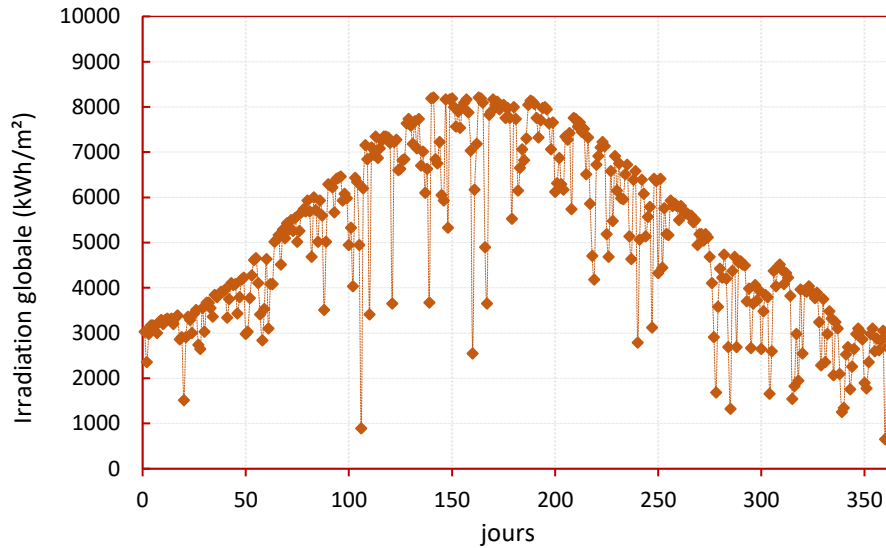


Fig. IV. 2.Températures moyennes mensuelles de l'année 2013.

Par ailleurs, l'ensoleillement annuel est très important, comme le montre la Fig. IV. 3. Il est accentué par les rayons réfléchis par le sol. Sur une surface horizontale, la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire reçue peut atteindre 6822 kWh/m<sup>2</sup> pendant l'été. En hiver la moyenne mensuelle de l'irradiation solaire reçue est de l'ordre de 3144 kWh/m<sup>2</sup>.



**Fig. IV. 3.** Irradiation globale sur le plan horizontal [160].

Avec un climat aride et chaud, 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 ( $\Phi$ )  $\geq 8$  :00 heures [152], les températures présentent de forts contrastes entre l'hiver et l'été. La température moyenne du mois le plus froid (décembre) est environ 7.7°C et la température maximale moyenne dépasse les 38.5°C. Les gradients de température sont accentués entre le jour et la nuit. L'humidité relative moyenne varie entre 33 % en été et 70 % en hiver.

L'architecture traditionnelle montre qu'il faut essayer de bénéficier du temps de retard de l'enveloppe du bâtiment grâce à des matériaux ayant une grande inertie thermique [153]. 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 [104].

## II. TRANSFERT DE CHALEUR ET LE CONFORT THERMIQUE

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 [104]. 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. 4. Pour ce problème, l'équation du transfert de chaleur, par conduction, s'écrit comme suit en fonction de (T, t, x) :

$$\lambda \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (IV - 1)$$

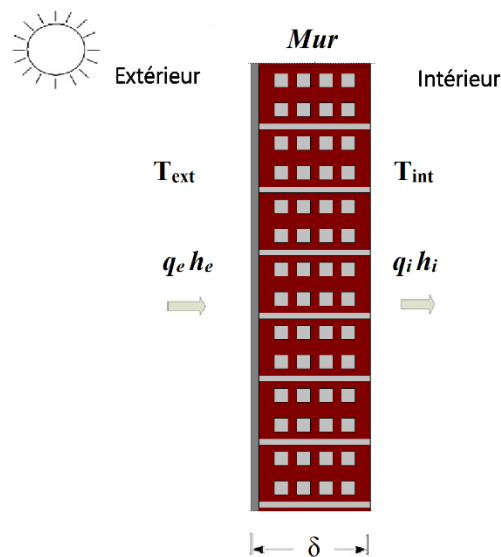


Fig. IV. 4. Schéma du transfert de chaleur dans un mur extérieur.

Avec ( $\lambda$ ) : la conductivité thermique, ( $\rho$ ) : 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 [104 ; 107,109] :

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

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) [104].

## **II.1. SIMULATION NUMERIQUE**

Dans le but d'améliorer le niveau du confort thermique des habitations existantes en milieux arides (cas de la ville de Laghouat), une étude de simulation numérique à l'aide du logiciel EnergyPlus a été menée afin d'apprécier le comportement thermo-physique des types de murs étudiés.

### **II.1.1. OBJECTIFS DE LA SIMULATION**

1. Optimisation de l'inertie thermique des murs extérieurs des constructions existantes, autrement dit, une réhabilitation thermique des murs extérieurs.
2. Amélioration du confort thermique des habitations existantes en milieux arides, et par conséquent, la réduction de la consommation d'énergie électrique.
3. Proposition d'une technique constructive des murs extérieurs pour les nouvelles constructions.

## **II.2. PROPRIETES THERMO-PHYSIQUES DU MUR**

L'objectif de la simulation est, donc, de déterminer deux propriétés thermo-physiques très importantes du mur, à savoir le temps de retard ( $\Phi$ ) ou déphasage et le facteur d'amortissement ( $f$ ). 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. 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 [104, 107].

### **II.3. TEMPS DE RETARD ET FACTEUR D'AMORTISSEMENT**

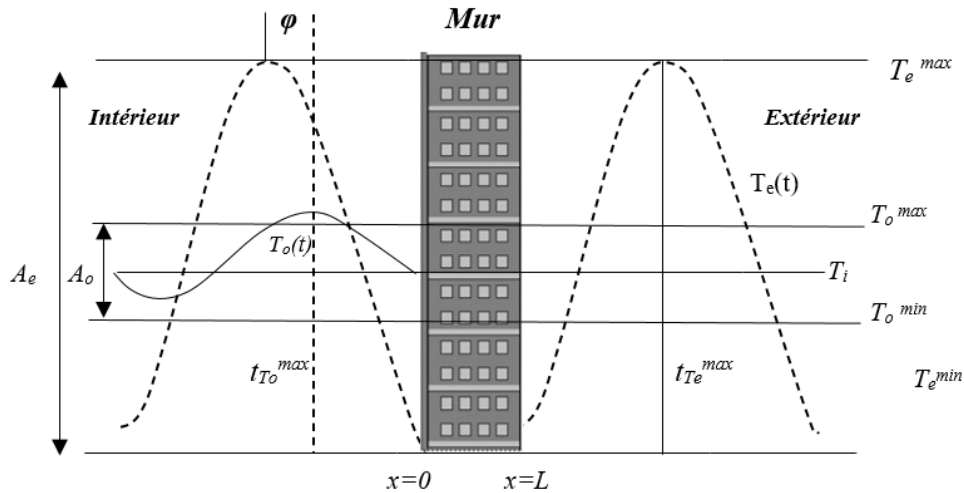
Le temps de retard ( $\Phi$ ) et le facteur d'amortissement ( $f$ ) sont deux facteurs très importants du mur, qui déterminent la capacité de stockage thermique pour les matériaux. Ils sont schématisés sur la Fig. IV. 5. Le temps que prend le flux de chaleur pour se propager, de la surface extérieure à la surface intérieure, est nommé « temps de retard » ou « déphasage ». Il est calculé par l'équation suivante [107,109]:

$$\phi \begin{cases} t_{T_0max} > t_{T_e max} \rightarrow t_{T_0max} - t_{T_e max} \\ t_{T_0max} < t_{T_e max} \rightarrow t_{T_0max} - t_{T_e max} + P \\ t_{T_0max} = t_{T_e max} \rightarrow P \end{cases} \quad (IV-3)$$

avec ( $\Phi$ ) : Temps de retard en heures.

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

$t_{T_0 max}$  : Temps auquel la température de la surface intérieure du mur est maximale.



**Fig. IV. 5.**Représentation schématique du temps de retard ( $\Phi$ ) et du facteur d'amortissement ( $f$ ) [107,109].

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 [104]. Le facteur d'amortissement ( $f$ ) est déterminé par l'équation suivante :

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

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 [104].

### II.3.1. TEMPERATURES DE SURFACES DU MUR

Les deux propriétés thermo-physiques du mur, ou autrement dit, les propriétés de l'inertie thermique, le temps de retard ( $\Phi$ ) et le facteur d'amortissement ( $f$ ) sont fonction des températures des surfaces, extérieure et intérieure, du mur comme le montre la Fig. IV.6.

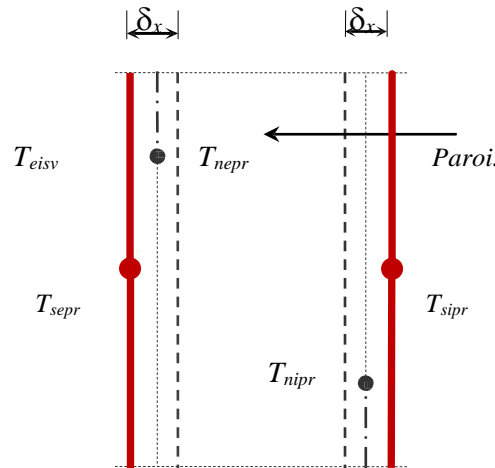


Fig. IV. 6. Les différents nœuds étudiés dans les couches de la paroi [104].

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  $a(e) T$ .
- par rayonnement avec l'environnement extérieur immédiat à la paroi à une température  $T_{eisv}$ .

$\delta x$  : Épaisseur d'une couche de la paroi (m) ;

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

$T_{nepr}$  : Température du nœud de la première couche externe de la paroi (°C) ;

$T_{sepr}$  : Température de la surface extérieure de la paroi (°C) ;

$T_{sipr}$  : Température de la surface intérieure de la paroi (°C) ;

$T_a(i)$  : Température de l'air intérieur (°C) ;

$T_{nopr}$  : Température du nœud de la première couche interne de la paroi (°C).

La paroi est divisée en couches d'épaisseur  $\delta x$ , 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 [104]:

$$\frac{T_{sepr}^{t+1} + T_{nopr}^{t+1}}{R_{sepr \rightarrow nopr}} + \frac{T_{sopr}^{t+1} - T_{nopr}^{t+1}}{R_{sopr \rightarrow nopr}} = \frac{(\rho c V)_{nopr}}{\delta T} \cdot (T_{nopr}^{t+1} - T_{nopr}^t) \quad (IV - 5)$$

#### II.4. METHODE DE SIMULATION

Il existe de nombreux logiciels de modélisation thermique dynamique du bâtiment. Parmi les plus utilisés, on peut retenir TRNSYS ou EnergyPlus, qui permettent des modélisations thermiques multizones en utilisant des fonctions de transfert de chaleur pour représenter les parois (l'enveloppe) et pour déterminer les températures de surfaces extérieures et intérieures d'un mur. Dans notre étude nous avons opté pour EnergyPlus (version 8.9), qui est utilisé par plusieurs chercheurs à cause de son efficacité, il a passé avec succès les tests de fiabilité de l'ASHRAE [104,107]. Ce logiciel est disponible gratuitement 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 du bâtiment. L'annexe II montre les Input et Output du logiciel ainsi que son principe de fonctionnement [104].

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 au cours duquel les températures extérieures, maximale et minimale, sont respectivement 42.5°C et 25.2°C, pour un mur supposé

situé dans la ville de Laghouat. Il est possible d'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 (2x2x3 m<sup>3</sup>) sont inspirées de la bibliographie [104].

Cette étude est faite pour quatre types de murs :

❖ **Mur 1 (a):** c'est un mur à une seule paroi en parpaing de 20 cm d'épaisseur, avec un revêtement extérieur en mortier de ciment, d'épaisseur 1 cm, et un revêtement intérieur en plâtre d'épaisseur 1 cm.

- **Mur 1 (a):** 1 cm mortier de ciment + 20 cm parpaing + 1 cm enduit plâtre.

- **Mur 1 (b):** 1 cm mortier de ciment + 20 cm parpaing + 5 cm mortier plâtre-billes polystyrènes.

- **Mur 1 (c):** 1 cm mortier de ciment + 20 cm parpaing + 10 cm mortier plâtre-billes polystyrènes.

❖ **Mur 2 (a):** c'est un mur à une seule paroi en brique de 20 cm d'épaisseur, avec un revêtement extérieur en mortier de ciment, d'épaisseur 1 cm, et un revêtement intérieur en plâtre d'épaisseur 1 cm.

- **Mur 2 (a):** 1 cm mortier de ciment + 20 cm brique + 1 cm enduit plâtre.

- **Mur 2 (b):** 1 cm mortier de ciment + 20 cm brique + 5 cm mortier plâtre-billes polystyrènes.

- **Mur 2 (c):** 1 cm mortier de ciment + 20 cm brique + 10 cm mortier plâtre-billes polystyrènes.

❖ **Mur 3 (a):** c'est un mur à double paroi en parpaing (15+5+10 cm) avec un revêtement extérieur en mortier de ciment, d'épaisseur 1 cm, et un revêtement intérieur en plâtre d'épaisseur 1 cm.

- **Mur 3 (a):** 1 cm mortier de ciment + 15 cm parpaing + 5 cm lame d'air + 10 cm parpaing + 1 cm enduit plâtre.

- **Mur 3 (b) :** 1 cm mortier de ciment + 15 cm parpaing + 5 cm mortier plâtre-billes polystyrènes + 10 cm parpaing + 1 cm enduit plâtre.

- **Mur 3 (c) :** 1 cm mortier de ciment + 15 cm parpaing + 5 cm lame d'air + 10 cm parpaing + 5 cm mortier plâtre-billes polystyrènes.

- **Mur 3 (d) :** 1 cm mortier de ciment + 15 cm parpaing + 5 cm lame d'air + 10 cm parpaing + 10 cm mortier plâtre-billes polystyrènes.

❖ **Mur 4 (a):** c'est un mur à double paroi en brique (15+5+10 cm) avec un revêtement extérieur en mortier de ciment, d'épaisseur 1 cm, et un revêtement intérieur en plâtre d'épaisseur 1 cm

- **Mur 4 (a) :** 1 cm mortier de ciment + 15 cm brique + 5 cm lame d'air + 10 cm brique + 1 cm enduit plâtre.

- **Mur 4 (b) :** 1 cm mortier de ciment + 15 cm brique + 5 cm mortier plâtre-billes polystyrènes + 10 cm brique + 1 cm enduit plâtre.

- **Mur 4 (c)** : 1 cm mortier de ciment + 15 cm brique + 5 cm lame d'air + 10 cm brique + 5 cm mortier plâtre-billes polystyrènes.

- **Mur 4 (d)** : 1 cm mortier de ciment + 15 cm brique + 5 cm lame d'air + 10 cm brique + 10 cm mortier plâtre-billes polystyrènes.

Les épaisseurs envisagées du matériau isolant proposé, qui est un mortier en plâtre allégé par des billes de polystyrènes, sont **5 cm** et **10 cm** du côté intérieur du mur pour tous les types des murs.

A noter aussi que 5 cm a été appliqué en remplaçant la lame d'air pour les murs en double paroi.

Les résultats sont mentionnés dans le tableau 5, pour les différentes épaisseurs et formulations des murs, à savoir :

Les propriétés thermo-physiques des matériaux utilisés dans la simulation sont portées dans le tableau IV.1.

**Tab. IV. 1.** Propriétés thermo-physiques des matériaux de construction

Matériaux de construction	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité thermique (W/mK)	Chaleur spécifique massique (J/kgK)
Parpaing	1300	1,1	1080
Brique	900	0,48	936
Mortier de ciment	2100	1,40	1200
Enduit de plâtre	1300	0,5	1000
Mortier de plâtre-polystyrène	1030	0,47	941

### **III. RESULTATS DE LA SIMULATION**

Sur la base des résultats de la simulation du logiciel EnergyPlus illustrés sur la Fig. IV.4, et en utilisant les équations (IV-3 et IV-4), on peut calculer le temps de retard ( $\Phi$ ) et le facteur d'amortissement ( $f$ ) afin d'étudier l'effet de l'ajout d'un matériau isolant proposé (mortier de plâtre allégé par des billes de polystyrènes) aux différents murs extérieurs, ainsi que l'effet de l'orientation du mur.

#### **III.1. EFFET DE L'ÉPAISSEUR DE LA COUCHE AJOUTÉE AU MUR (MUR ORIENTE SUD)**

La figure IV. 7, montre à titre d'exemple, l'effet de l'épaisseur de la couche ajoutée au mur sur les températures de la surface intérieure (Tsi) et la surface 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 la surface intérieure du mur diminue.

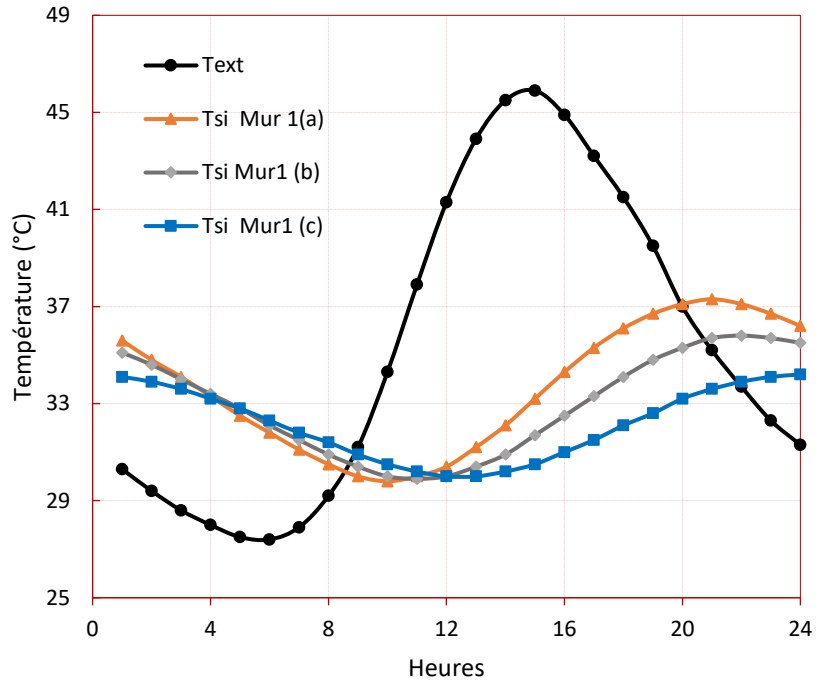


Fig. IV. 7. Effet de l'épaisseur du mur 1 sur Tsi

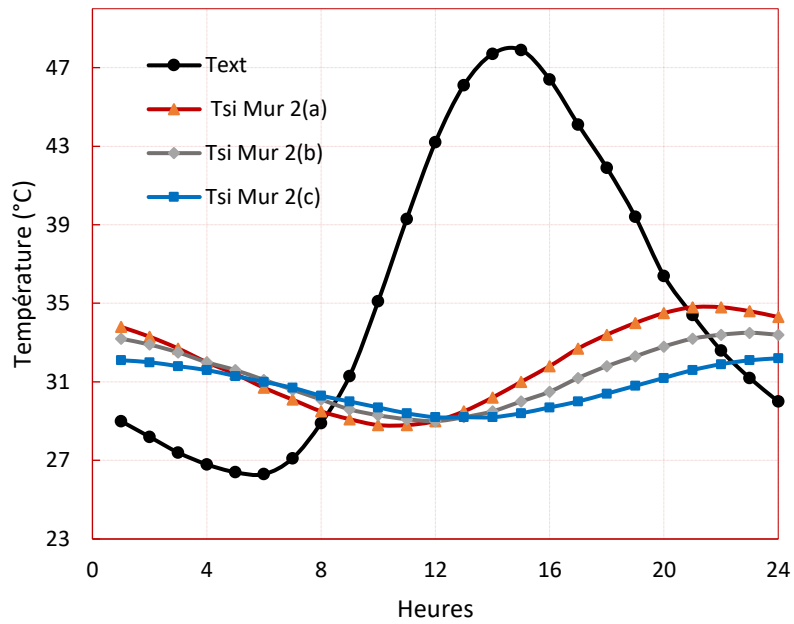


Fig. IV. 8. Effet de l'épaisseur du mur 2 sur Tsi.

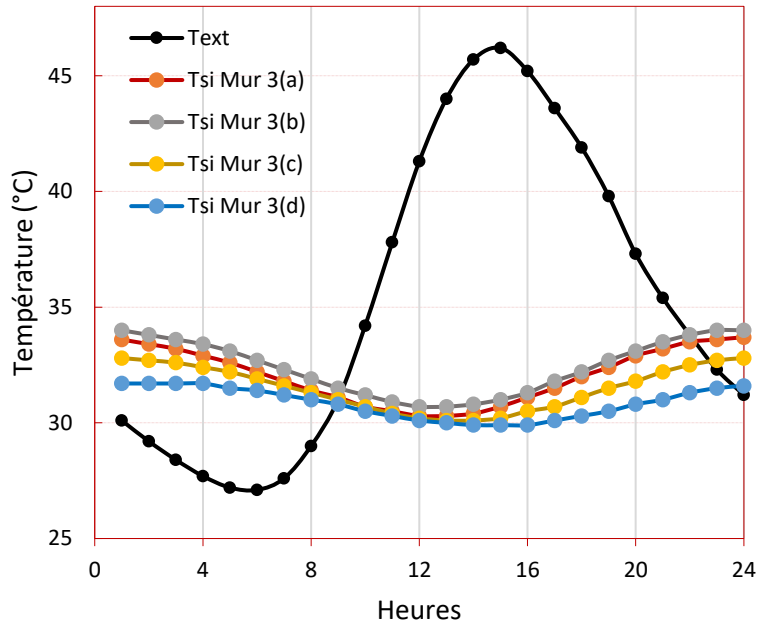


Fig. IV. 9. Effet de l'épaisseur du mur 3 sur Tsi.

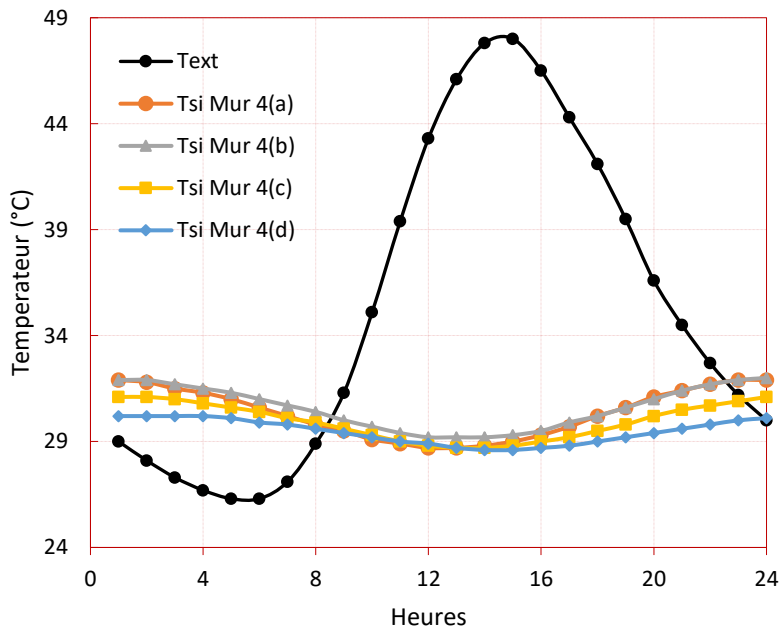


Fig. IV. 10. Effet de l'épaisseur du mur 4 sur Tsi

Le tableau IV.2 récapitule les résultats des simulations faites sur les différents murs.

Tab. IV. 2. Temps de retard et facteur d'amortissement pour les différentes épaisseurs des murs étudiés

		Mur Sud		Mur Est		Mur Nord		Mur Ouest	
		$\Phi$ (h)	$f$	$\Phi$ (h)	$f$	$\Phi$ (h)	$f$	$\Phi$ (h)	$f$
Mur à une seule paroi en parpaing	Mur 1 (a)	6	0,399	10	0,333	3	0,448	3	0,332
	Mur 1 (b)	7	0,318	11	0,265	4	0,357	4	0,249
	Mur 1 (c)	<b>9</b>	<b>0,222</b>	12	<b>0,184</b>	6	<b>0,252</b>	6	<b>0,170</b>
Mur à une seule paroi en brique	Mur 2 (a)	7	0,279	11	0,226	4	0,327	4	0,221
	Mur 2 (b)	8	0,206	12	0,165	5	0,239	6	0,160
	Mur 2 (c)	<b>9</b>	<b>0,138</b>	<b>13</b>	<b>0,112</b>	<b>6</b>	<b>0,159</b>	<b>7</b>	<b>0,105</b>
Mur à double paroi en parpaing	Mur 3 (a)	9	0,177	12	0,144	6	0,198	6	0,143
	Mur 3 (b)	9	0,179	13	0,147	6	0,198	6	0,144
	Mur 3 (c)	10	0,139	13	0,117	7	0,155	7	0,108
	Mur 3 (d)	11	0,098	15	0,083	8	0,108	8	0,073
Mur à double paroi en brique	Mur 4 (a)	9	0,151	13	0,12	6	0,175	7	0,117
	Mur 4 (b)	9	0,129	13	0,106	7	0,150	7	0,099
	Mur 4 (c)	<b>10</b>	0,11	<b>14</b>	0,089	<b>7</b>	0,127	<b>8</b>	0,084
	Mur 4 (d)	<b>11</b>	0,073	<b>15</b>	0,06	<b>9</b>	0,083	<b>9</b>	0,054

Lorsque l'épaisseur du mur augmente le temps de retard augmente et le facteur d'amortissement diminue, ce phénomène est similaire aux travaux de la bibliographie [103-104].

D'une façon générale, la réponse de tous les murs présente une amélioration dans leur stabilité thermique. Le facteur d'amortissement est amélioré avec une différence nette variant dans la plage de 20.3 % pour  $e=5$  cm à 44.3 % pour  $e = 10$  cm ( $e$  : l'épaisseur de la couche ajoutée aux différents murs)

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 une seule paroi en parpaing sont l'orientation 'Sud' 'Nord' et 'Est' pour le **Mur 1 (d)**, lorsqu'on tient compte du temps de retard qui est  $\geq 8$  heures, d'après la recommandation de la zone climatique [152]. Néanmoins, l'orientation défavorable est 'Ouest'. Ces constatations sont similaires aux résultats de la bibliographie [104,156]. A noter que l'orientation 'Est' a le plus long temps de retard, ce qui est conforme aux résultats de la littérature [104-106,111]. Donc pour atteindre la condition minimale de déphasage, il faut ajouter une couche de 10 cm.

Les orientations favorables pour des murs à une seule paroi en brique sont l'orientation 'sud' et 'est' pour **Mur 2 (b)**, **Mur 2 (c)**, donc une couche de 10 cm de BPSE est largement suffisante pour améliorer le comportement thermique des murs à une seule paroi en brique avec des améliorations de 2h dans le temps de déphasage et de 50.5 % dans le facteur d'amortissement.

Pour le **Mur 3**, on peut constater que toutes les orientations du **Mur 3 (d)** sont favorables, les autres types de **Mur 3** répondent aux conditions de comportement thermique minimales vis à vis du temps de déphasage pour les orientations 'Sud' et 'Est' .

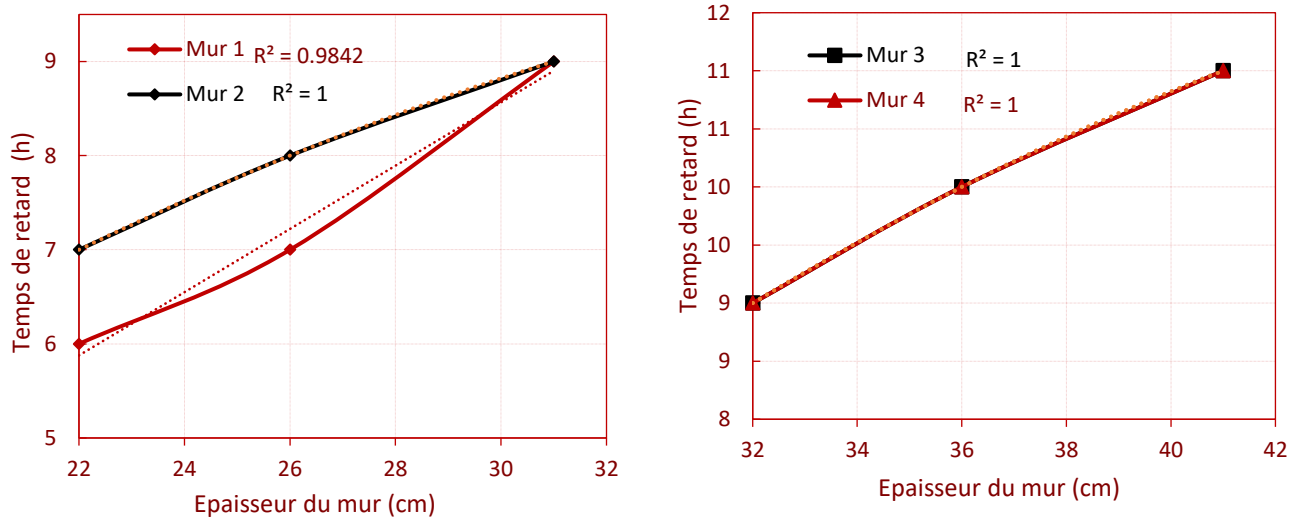
Concernant le mur à double paroi en brique **Mur 4**, l'amélioration a été bien observée en termes de temps de déphasage et facteur d'amortissement. Les valeurs du temps de déphasage sont comprises entre 9 et 11 pour les orientations 'Sud'. Les facteurs d'amortissement, qui varient entre 0.151 et 0.073, interprètent une stabilité thermique de l'enveloppe envers les fluctuations des températures dans toutes les orientations après l'ajout d'une couche de 10 cm de BPSE.

Donc, tous les murs de type 4 répondent aux conditions de comportement thermique minimales vis à vis du temps de déphasage.

Pour satisfaire les conditions initiales de la réhabilitation des murs à double paroi en parpaing et en brique, l'épaisseur de la couche ajoutée doit être de 10 cm (**Mur 3d**, **Mur 4d**) afin d'atteindre le déphasage moyen prévu pour toutes les orientations.

Cette amélioration ( $f, \Phi$ ) est due à l'augmentation de la capacité thermique du mur grâce aux propriétés thermo-physiques du matériau ajouté. C'est l'effusivité thermique (inertie d'absorption) qui a permis d'absorber le flux de chaleur ; l'effet de la faible diffusivité thermique (inertie de transmission) du matériau est aussi observé pour cette amélioration

La Fig. IV. 11. 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 très proche de 1 pour le mur 1, et égal à 1 pour les autres types de murs. In convient de noter que ces tendances linéaires sont similaires aux résultats de la bibliographie [104,156,157].

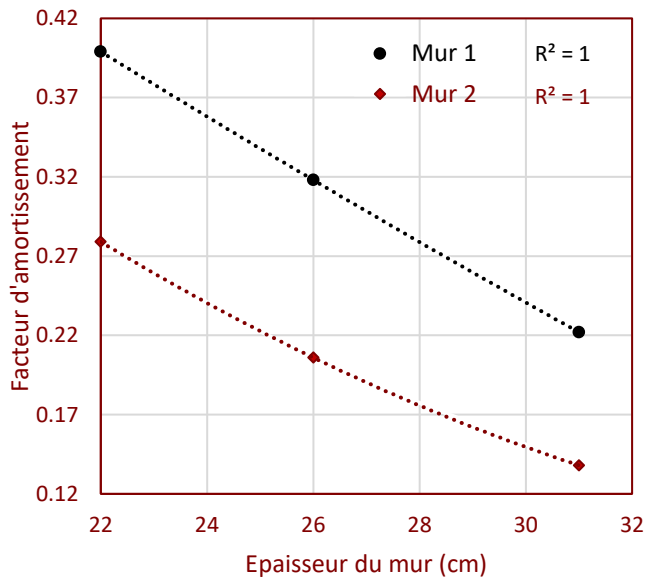


a) Murs à une seule paroi

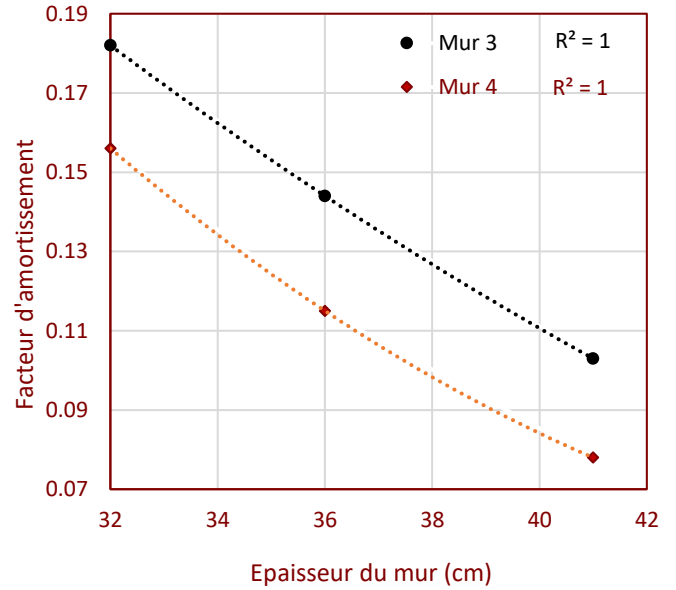
b) Murs à une double paroi

**Fig. IV. 11.**Relation épaisseur des murs orientés 'Sud' et temps de retard.

La Fig. IV. 12. montre l'évolution du facteur d'amortissement avec l'épaisseur du mur pour les différents murs étudiés. Elle présente une tendance parabolique négative. Les lois polynomiales s'appliquent avec des coefficients de corrélation égal à 1 pour les tous murs. Lorsque l'épaisseur du mur augmente, le facteur d'amortissement diminue, ce qui est similaire aux travaux de Xing Jin et al. et Belhadj [104 ;156-157].



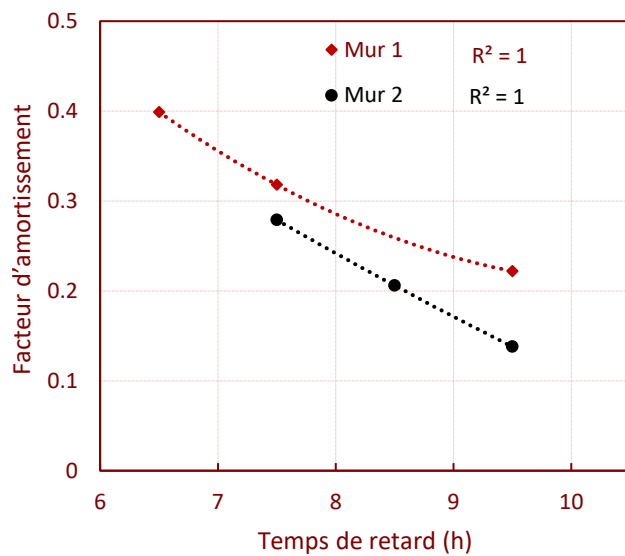
a) Murs à une seule paroi



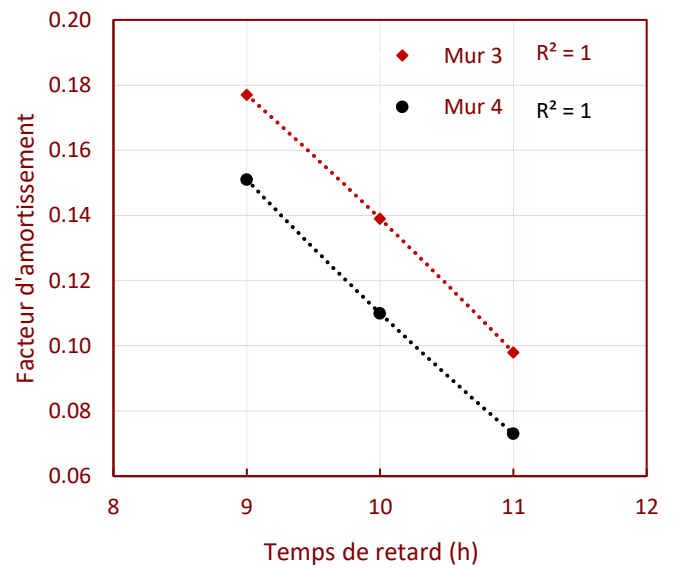
b) Murs à une double paroi

**Fig. IV. 12.** Relation entre l'épaisseur du mur et le facteur d'amortissement des différents murs étudiés.

Enfin, il faut noter l'existence d'une relation forte entre le temps de retard ( $\phi$ ) et le facteur d'amortissement ( $f$ ) pour les différentes épaisseurs de murs étudiés, comme le montre la Fig. IV. 13. 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 mur étudiés.



a) Murs à une seule paroi



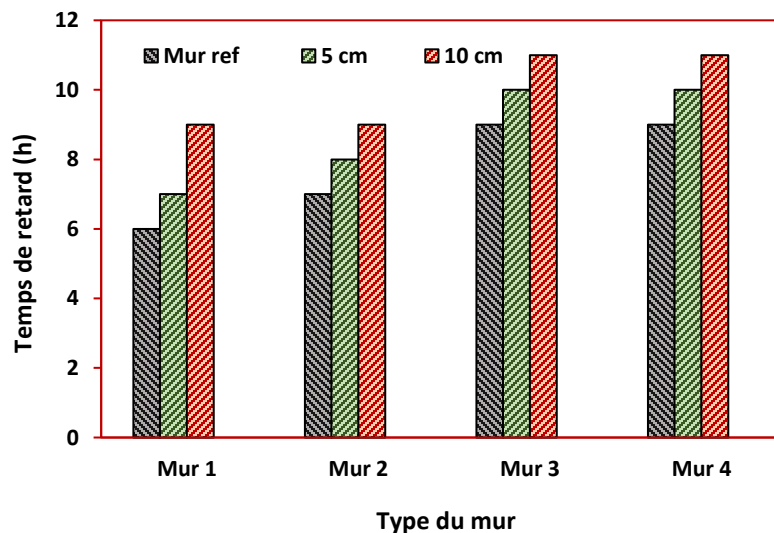
b) Murs à une double paroi

**Fig. IV. 13.** Relation entre le temps de retard et le facteur d'amortissement des différents murs étudiés.

Concernant l'effet de remplacement de lame d'air par le composite BPSE (configurations Mur 3 (b) et mur 4(b)), on remarque que n'il y a aucun effet supplémentaire sur le rendement thermique des murs après cette configuration.

### III.2. RECOMMANDATION DE CETTE TECHNIQUE CONSTRUCTIVE

Les Figures IV. 14 et 15 montrent, d'une manière générale, l'effet de la couche ajoutée aux murs orientés vers le 'Sud' ; l'étude 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 défavorables, sauf pour les murs à double paroi. Lorsqu'on tient compte du temps de retard qui est  $\geq 8$  heures d'après la recommandation de la zone climatique [11]. A noter que l'orientation 'est' au plus long temps de retard, ce qui est conforme aux résultats de la bibliographie [104-106 ,111]. Pour un meilleur confort thermique avec une consommation d'énergie réduite et pour satisfaire les conditions initiales dans le cas de la réhabilitation thermique des murs extérieures, l'épaisseur idéale qui doit, donc, être d'ajoutée est de 10 cm de BPSE pour les 4 types des murs.



**Fig. IV. 14.** Effet de couche ajoutée sur le temps de retard pour différents types de murs orientés vers le 'Sud'.

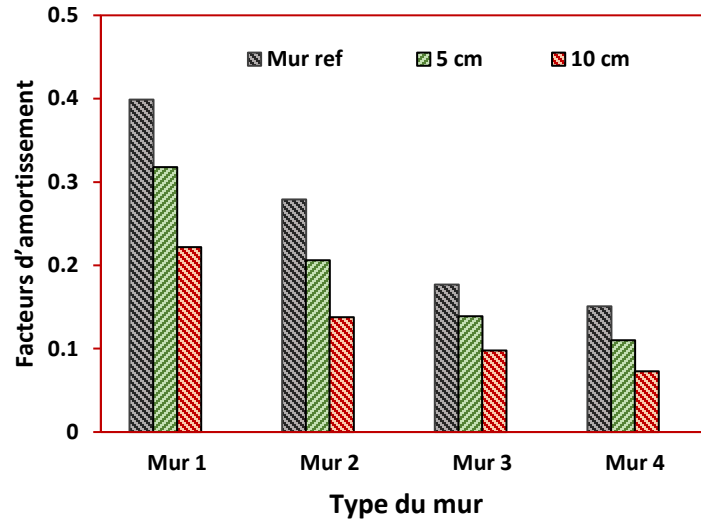


Fig. IV. 15.Effet de couche ajoutée sur le facteur d’amortissement pour différents types de murs orientés vers le ‘Sud’.

#### IV. QUANTIFICATION DES GAINS ÉNERGÉTIQUES

Afin d'intégrer le matériau, sujet d'étude, dans un bâtiment, nous avons choisi une cellule type pour étudier l'impact de l'ajout de ce matériau sur la consommation énergétique, et par conséquent sur le confort thermique de l'individu. Notre investigation est menée sur une habitation individuelle supposée dans la ville de Laghouat. Les figures IV.16, 17 et 18 représentent successivement le plan de la transversale (niveau 1 et rez-de-chaussée) et un modèle 3D, en utilisant le logiciel CYPETHERM EPlus.

CYPETHERM EPlus est un logiciel destiné à l'étude de la simulation des performances énergétiques des bâtiments avec le moteur de calcul EnergyPlus™ (version 9.1), il permet une création rapide du projet :

- calcul de la demande énergétique du chauffage et du refroidissement ;
- évolution de la température des locaux ;
- affichage de la balance énergétique mensuelle et annuelle.

Le logiciel complet CYPETHERM EPlus, est disponible en version académique gratuite. Plus d'information sur l'introduction des données sont portées dans **(l'annexe III)**.

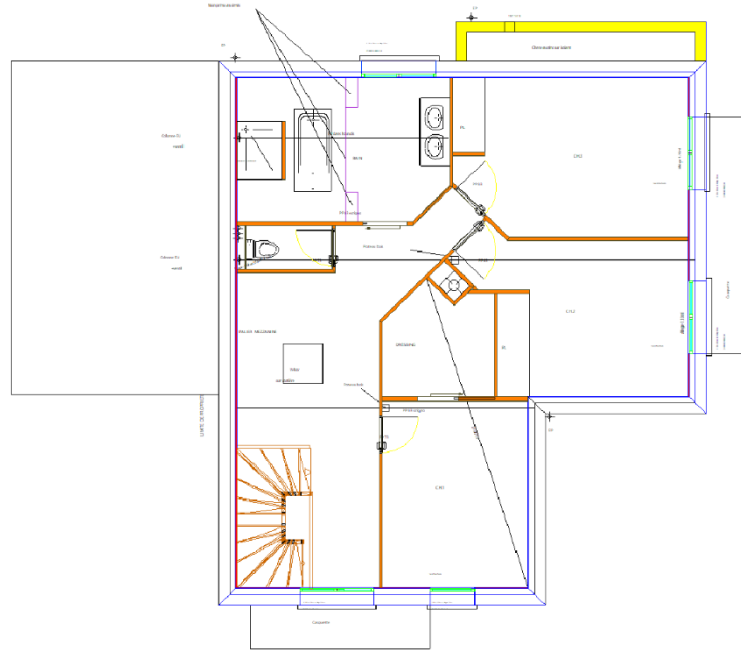


Fig. IV. 16.Vue en plan niveau 1.

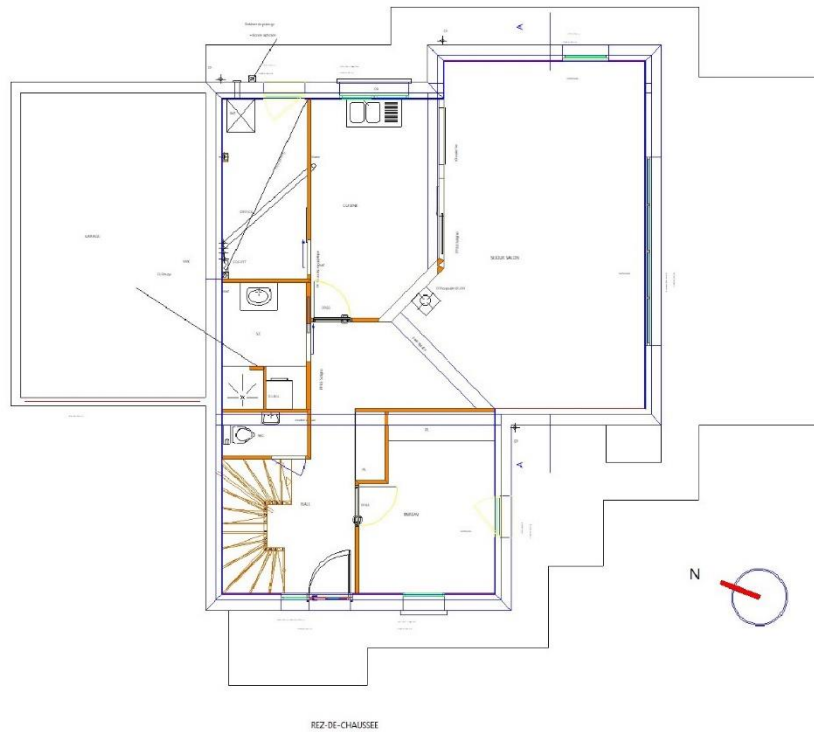
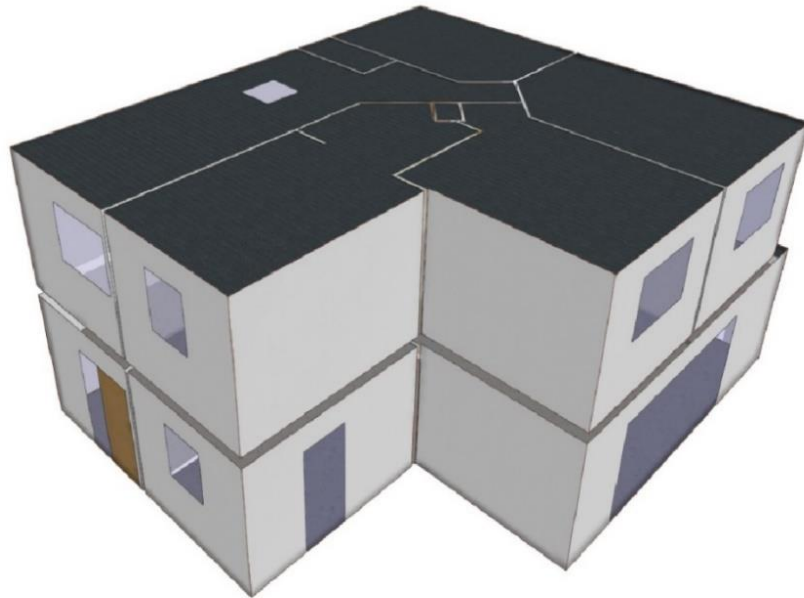


Fig. IV. 17.Vue en plan Rez-de-chaussée.

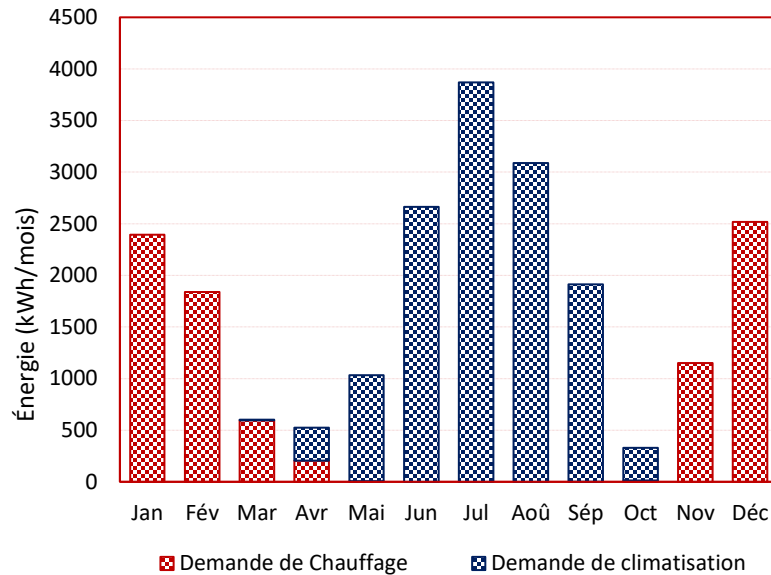


**Fig. IV. 18.**Modèle 3D.

Afin de modéliser le bâtiment, on a défini les matériaux utilisés dans la construction de l'enveloppe (plancher haut, plancher bas, murs extérieurs, portes et fenêtres). Leurs caractéristiques thermo-physiques sont tirées du document technique régimentaire algérien DTR C 3-2 [152], elles sont consignées sur l'annexe 2. Les murs extérieurs sont des murs à double paroi en parpaing ; dans cette section on a essayé d'améliorer le comportement thermique des murs extérieurs existants par la réhabilitation thermique, en ajoutant une épaisseur 5 cm de BPSE et 3 cm de lame d'air à l'intérieur.

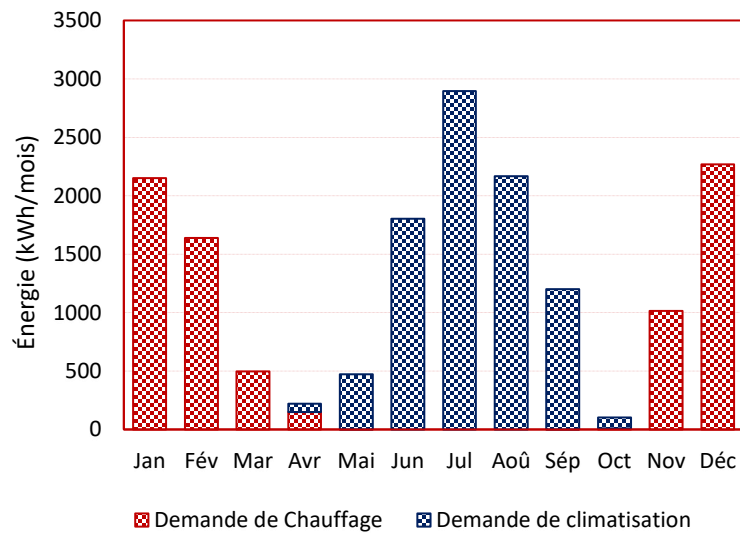
#### **IV. 1. DEMANDE ENERGETIQUE MENSUELLE DE CHAUFFAGE ET DE REFROIDISSEMENT.**

Répondant uniquement à la demande énergétique à couvrir, par les systèmes de chauffage et de refroidissement, les nécessités énergétiques au cours de la simulation annuelle, sont montrées dans les figures IV. 19 et 20 suivants :



**Fig. IV. 19.** Demande énergétique mensuelle de chauffage et de climatisation pour le cas initial.

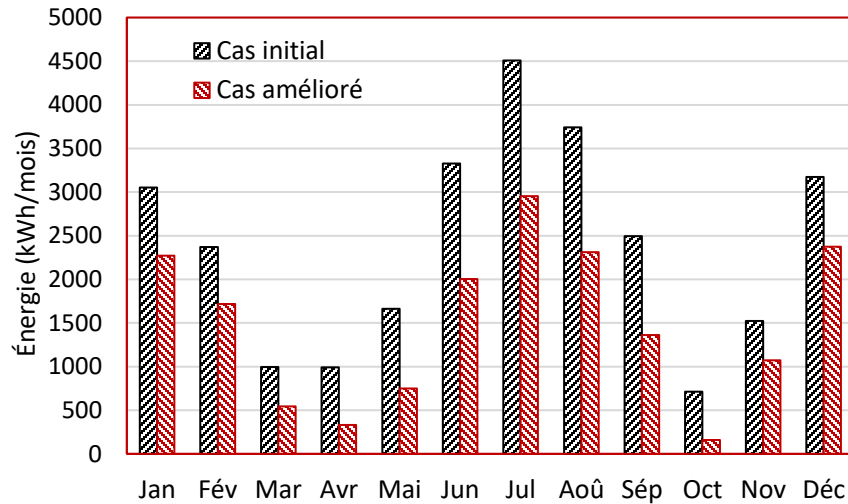
Les besoins énergétiques de chauffage et de climatisation en énergie utile du bâtiment (cas de base) se révèlent être de l'ordre de 11405.5 (kWh/an) pour le chauffage et de 17146.4 (kWh/an) pour la climatisation, soit un besoin total annuel de 28551.9 (kWh). La performance énergétique de notre cas est de l'ordre de 176.3 (kWh/m<sup>2</sup>·an). Après la réhabilitation, les charges de chauffage et de climatisation deviennent respectivement 8148.2 kWh/an et 9701.9 kWh/an ; par conséquent le gain serait de l'ordre de 28.5 % pour le chauffage et 43.5 % pour la climatisation.



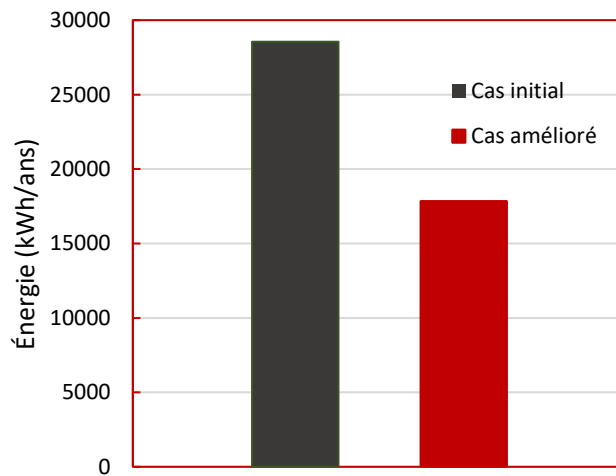
**Fig. IV. 20.** Demande énergétique mensuelle de chauffage et de climatisation pour le cas amélioré.

**IV.2. CONSOMMATION ENERGETIQUE ANNUELLE TOTALE DU BATIMENT**

Les figures IV. 21 et 22 montrent le bilan énergétique total du bâtiment, mois par mois, pour les deux cas.



**Fig. IV. 21.**Bilan énergétique du bâtiment mois par mois.



**Fig. IV. 22.**Bilan énergétique du bâtiment par année

Pour la consommation énergétique totale, il faut mentionner que la maison avait une consommation totale de 28551.9 kWh /ans, donc 176.3 kWh/m<sup>2</sup>.ans. Après l'amélioration du comportement thermique des murs extérieurs, cette consommation a baissé à 17850 kWh/ans, donc 110.2 kWh/m<sup>2</sup>.ans. La diminution dans la consommation énergétique totale est, donc, de l'ordre de 37.5 %. C'est un chiffre significatif, bien sûr, si on prend en compte que l'amélioration est limitée aux

murs extérieurs seulement. En effet, cette amélioration a permis de reclasser la maison, énergétiquement, d'une maison classe « D », qui correspond à une construction mal isolée, à une construction classe « C » (figure IV. 26). Cette amélioration est certes argumentée par l'inertie thermique du matériau BPSE, mais aussi par sa capacité d'isolation ( $0.35\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ). La figure IV. 23 ci-dessous, récapitule la consommation annuelle des deux configurations.

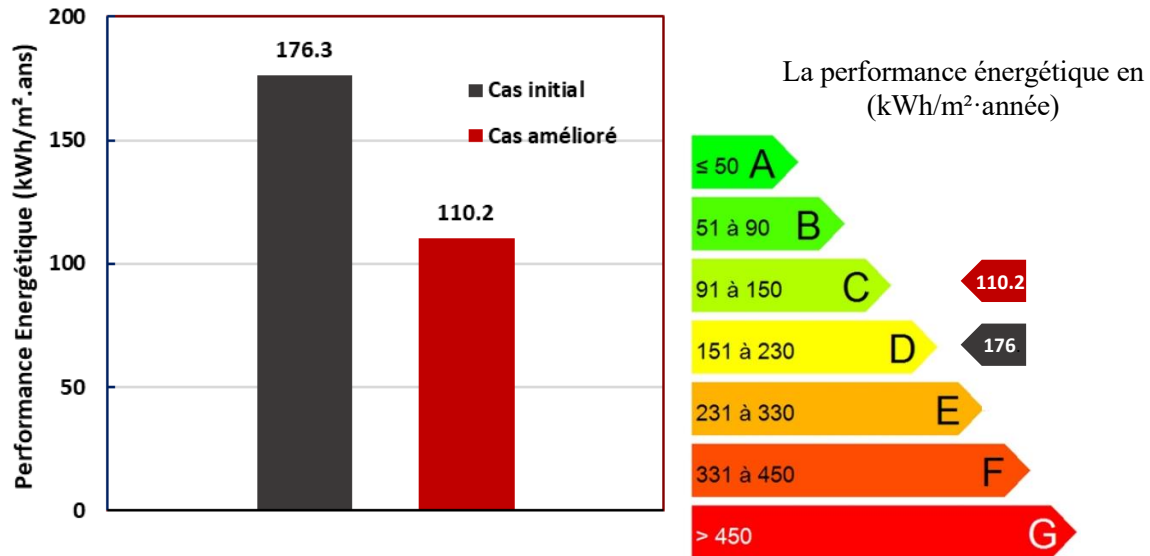


Fig. IV. 23 .Performance énergétique de la maison dans le cas initial et après la réhabilitation.

## V. CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a essayé de faire une configuration murale pour une éventuelle utilisation à l'extérieur. Les résultats montrent que les propriétés de l'inertie sont fonction de plusieurs paramètres (l'épaisseur des murs) dans le but d'optimiser la configuration idéale énergétiquement, économiquement et environnementalement. On a déterminé l'effet de l'ajout d'une épaisseur de couche en plâtre allégé par le polystyrène expansé aux différents murs, qui ont une influence directe sur le temps de retard ( $\Phi$ ) et le facteur d'amortissement ( $f$ ). Ce dernier a contribué positivement à minimiser les effets des facteurs climatiques extérieurs avec un long temps de retard et un faible facteur d'amortissement.

Dans les milieux arides, ce type de composite 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, la réduction est l'ordre de 37.5 % dans la consommation énergétique annuelle totale. Ce matériau contribue également à la protection de l'environnement, à court et à long terme, si on suppose que les billes de polystyrène proviennent du recyclage.

# CONCLUSION GENERALE

## **CONCLUSION GÉNÉRALE ET PÉRSPECTIVES**

L'impact environnemental du secteur de la construction se distingue par la forte consommation d'énergie de chauffage et de refroidissement. Cependant, de nouvelles réglementations imposent des valeurs plus restrictives vis-à-vis de la demande énergétique, ce qui se traduit par une augmentation de l'utilisation de matériaux d'isolation thermique. D'autre part, c'est également un impact environnemental important : la forte génération de déchets. Dans ce cas, il existe également des réglementations essayant de contrôler les déchets de construction et de démolition pour augmenter le taux de recyclage. En ce sens, le polystyrène expansé est exceptionnel, car il est l'un des matériaux d'isolation thermique les plus utilisés, ces derniers temps, en particulier les déchets de polystyrène qui sont principalement éliminés en enfouissement.

En outre, une autre cause d'impact environnemental du secteur de la construction est la surexploitation des matériaux traditionnels, qui continuent à être utilisés dans ce secteur, ce qui contribue à l'épuisement des matières premières, nuisant ainsi à l'environnement. On peut citer, par exemple, le fort impact environnemental de l'extraction du gypse des carrières. Dans ce cas, pour réduire la consommation du gypse, il est possible de le remplacer partiellement par des granulats légers, ce qui peut également améliorer le comportement thermique du composite gypseux. Il existe de nombreuses études de recherche qui analysent l'incorporation d'agréats dans les composites de gypse pour améliorer certaines de leurs propriétés.

Par conséquent, l'objectif de cette thèse est de contribuer à la réduction de l'impact environnemental du secteur du bâtiment et au développement d'une nouvelle génération de produits en plâtre, en concevant un nouveau matériau éco-efficace en gypse avec des billes de polystyrène expansé. Les déchets, qui autrement seraient mis en décharge ou incinérés, peuvent donner, donc, un matériau léger avec des propriétés thermiques améliorées.

Les gammes de densité dans lesquelles varient ces bétons de plâtre allégé par les billes de polystyrène expansé vont de 1414 à 581 kg/m<sup>3</sup> pour le BP3.15, de 1414 à 544 kg/m<sup>3</sup> pour le BP4 et 1414 à 502 kg/m<sup>3</sup> pour le BP5-7.

Les résistances mécaniques restent bien dans les normes exigées pour le béton témoin de construction et d'isolation (classe II), cependant, (BP3.15, BP4 et BP5-7) sont classés des bétons d'isolation (classe III), conformément au classement fonctionnel de la RILEM et la

norme EN13279-1 qui exigent une résistance minimale de 2 MPa pour la compression et 1 MPa pour résistance à la flexion ; ces résistances restent bien dans les normes exigées pour un béton léger de faible densité ( $\rho = 300-800 \text{ kg/m}^3$ ) et résistance de compression ( $R_c < 7 \text{ MPa}$ ), conformément à la classification des bétons légers selon le guide ACI 213R-87 .

Pour le comportement thermique de ce matériau, les résultats obtenus montrent que les composites BP3.15, BP4 et BP5-7 présentent une bonne isolation thermique. On peut aller à des conductivités moins de  $0.20 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , pour une teneur de 50 % de polystyrène expansé.

Par ailleurs, la modélisation par HAC permet bien de prédire la conductivité du béton de plâtre à base de polystyrène. Les valeurs théoriques, ainsi obtenus, sont très cohérentes avec les différentes mesures expérimentales effectuées au laboratoire.

D'autre part, l'étude de la durabilité de ce matériau dans les différents milieux étudiés, montre une baisse des propriétés mécaniques, après immersion des échantillons dans toutes les solutions envisagées. En flexion, les mesures sont comparables, mais en compression, elles sont beaucoup moins dans le cas de la solution acide. Les pertes en résistance mécanique dans le temps, pour les éprouvettes soumises aux cycles répétés de séchage – humidification, sont dues au phénomène de dissolution – recristallisation du gypse qui a changé la taille des cristaux et a affecté les points de contact entre eux. Cette perte reste dans les marges autorisées, pour les matériaux de construction. La légère diminution de la résistance mécanique dans le temps, enregistrée pour les éprouvettes conservées continuellement dans l'humidité, est due au gonflement à long terme de la structure cristalline.

Enfin et en vue d'une éventuelle application de ce nouveau matériau dans le bâtiment, on a étudié l'effet de l'ajout d'une couche, d'épaisseur donnée, en plâtre allégé par le polystyrène expansé aux différents murs de l'enveloppe, qui ont une influence directe sur le temps de retard ( $\Phi$ ) et le facteur d'amortissement ( $f$ ). Cette étude a permis de contribuer positivement à minimiser les effets des facteurs climatiques extérieurs avec un long temps de retard et un faible facteur d'amortissement. Par ailleurs, l'étude théorique par simulation grâce au logiciel

En effet, dans les milieux arides, ce type de composite 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 ; la réduction, dans la consommation énergétique annuelle totale, est l'ordre de 37.5 %. Il convient de noter également que ce matériau contribue également à la protection de l'environnement, à court et long terme, si on suppose

que les billes de polystyrène proviennent du recyclage.

Bien que l'approche de cette thèse ne couvre pas le développement d'un produit commercial (pour lequel l'optimisation du matériau serait nécessaire, en fonction des facteurs étudiés dans cette thèse, ainsi que des tests spécifiques d'application du matériau, en fonction de son emplacement possible sur la façade extérieur), il est possible de comparer le pouvoir isolant des composites isolants étudiés avec les produits d'isolation thermique du marché couramment utilisés qui ont une conductivité thermique 50% - 80%.

L'inconvénient de ce matériau est ses faibles propriétés mécaniques, qui nécessitent des améliorations profondes du matériau pour surmonter les limitations d'application ; Cependant, des produits similaires sur le marché (pour lesquels un processus d'optimisation a déjà été effectué) ont même été appliqués à l'extérieur de la façade du bâtiment.

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 ce produit. Il s'agit notamment de :

- Étude et modélisation du comportement acoustique du matériau étudié.
- L'utilisation de déchets de polystyrène expansé et la recherche d'une méthodologie pour développer la procédure de la transformation des déchets par un traitement préalable, tel que la séparation qui est nécessaire, s'il est mélangé avec d'autres matériaux, un tamisage s'il se présente sous différentes granulométries, un fractionnement, etc.
- Le renforcement de ce matériau par des fibres, telles que les fibres de polypropylène, pour améliorer son comportement physico-mécanique.
- L'analyse du comportement au feu de ce matériau.
- L'étude de la finition de surface du nouveau composite de plâtre par des tests visuels sur la couleur, la texture, etc.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Yasmine maoudj "la recherche et le développement dans le domaine de l'efficacité énergétique, état de lieux et perspective dans le Bâtiment en Algérie » Rapport de chef d'équipe de recherche » thermique du bâtiment" CNERIB 2007.
- [2] Bilan\_des\_Realisations\_du\_secteur\_2017\_édition\_2018
- [3] Barkli Hacene, Chaban Essam, B.Benyoucef "La construction écologique en Algérie : question du choix ou de moyens" revue énergie renouvelables, Vol 14 .2011
- [4] Boukli Hacene, Chab Anesa, Benyoucef Amara "l'impact environnementale d'une habitation écologique », Revue des énergies renouvelables ", Vol13 N14 P [545-559].2010
- [5] Egenhoper, C., Jansen, J., Bakker, S. & Jussila Hammes, J., 2006. Revisiting EU Policy Options for Tackling Climate Change: A Social Cost-Benefit Analysis of GHG Emissions Reduction Strategies, Bruselas : Centre for European Policy Studies
- [6] Egenhoper, C., Jansen, J., Bakker, S. & Jussila Hammes, J., 2006. Revisiting EU Policy Options for Tackling Climate Change: A Social Cost-Benefit Analysis of GHG Emissions Reduction Strategies, Bruselas : Centre for European Policy Studies.
- [7] B. M. Mansour, A. C. Soukaina, B. Benhamou, B. S. Jabrallah, (2013), "Thermal characterization of a Tunisian gypsum plaster as Construction Material", Energy Procedia, 42, 680-688.
- [8] C.N.E.R.I.B., Recommandations pour la construction en plâtre. Ministère de l'habitat, Centre national d'études et de recherches intégrées au bâtiment, 1993.
- [9] Jaffel H., Caractérisation multi-échelles de matériaux poreux en évolution : cas du plâtre. Thèse de doctorat. Ecole polytechnique 91128 Palaiseau Cedex, France, 2006, P.159.
- [10] Site : [www.mem-algeria.org](http://www.mem-algeria.org).Ministère de l'énergie et de mines
- [11] Daligand D., Plâtre. Techniques de l'Ingénieur, Traité Construction C 910, 2002.
- [12] Pascal BOUSTINGORRY. Elaboration d'un matériau composite à matrice gypse et renfort bois fragmenté- Amélioration de la résistance au vissage de produits préfabriqués en gypse. Thèse doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint Etienne et Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.
- [13] Coquard, P., Résistance mécanique des plâtres secs et humides. Thèse de doctorat, l'Université d'Aix-Marseille III : France, 1992, P. 93.
- [14] C. BEZOU. Etudes des caractéristiques cristallographiques, thermodynamiques et microstructurales des produits de déshydratation du gypse. Thèse de doctorat, Université de Bourgogne, 1991.
- [15] Sophie EVE. Comportement à la prise et caractérisation mécanique de matériaux composites à base de plâtre. PhD thesis, Université de Caen, 2003.
- [16] Meille S., Etude du comportement mécanique du plâtre pris en relation avec sa microstructure.

Thèse de doctorat de l'INSA Lyon, France, 2001, p. 219.

[17] SATTLER H. The importance of porosity for the properties of hardened gypsum plaster products. ZKG International, pages 54–62, 1997.

[18] H. Sattler and H.-P. Bruckner. Changes in volume and density during the hydration of gypsum binders as a function of the quantity of water available. ZKG International, 54 Num.9 P.522-, 2001.

[19] Saâdaoui M., Meille S., Reynaud P., and Fantozzi G. Internal friction study of the influence of humidity on set plaster. Journal of European Ceramic Society, 25 :3281– 3285, 2005.

[20] Les Industries du plâtre. La plaque de plâtre au cœur de la construction durable. <http://www.lesindustriesduplatre.org>.

[21] VIGNES J.-L., ESSADDAM H, and DALIGAND et D. Une vie de plâtre : Expé- riences de chimie sur l'élaboration et la mise en œuvre d'un matériau. Bulletin de l'Union des Physiciens N° 790, pages 145–164

[22] Ghoulam Allah S., Etude des caractéristiques des matériaux de construction de zaouïa Tidjania de Ghemar, Oued Souf. Préparation d'un mortier de plâtre pour restauration. Institut d'archéologie. Université d'Alger 2. 2011, P.143 (Document en arabe).

[23] S.Dorbani, F.Kharchi, F.Salem, K.Arroudj, N.Chioukh Influence of the Addition of Sand and Compaction on the Mechanical and Thermal Performances of Plaster.

[24] Abdelmoumen Chaker A., Caractérisation thermique et mécanique de matériaux de construction du sud Algérien. Thèse de doctorat. Université de Constantine. 1999

[25] Djoudi A., Khenfer M.M., Bali A., Kadri E.H., Debicki G., Performance of date palm fibres reinforced plaster concrete. International journal of physical sciences, Vol. 7(21), 2012 : pp. 2845-2853.

[26] Debouci. Z., Teggour. H., Chili.T., Rôle de la chaux dans les protections extérieures en plâtre. Séminaire pour la construction en plâtre. C.N.E.R.I.B, 4, 5, 6 Décembre 1989.

[27] M. Lanzon, P.A. Garcia-Ruiz, (2012), "Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters", Construction and Building Materials, 28(1), 506-511

[28] N. Belayachi, D. Hoxha, M. Slaimia, (2016), "Impact of accelerated climatic aging on the behavior of gypsum plaster-straw material for building thermal insulation", Construction and Building Materials, 28(1), 912-91.

[29] Soltane. M. L., Contrôle technique d'un prototype de quatre logements en plâtre à Biskra., colloque maghrébin sur la construction en matériaux locaux. MATLOC 91, C.N.E.R.I.B, 1991, pp. 101 – 104.

[30] Zuber. F., Pour une construction en plâtre. Communication, (Plâtre Lafarge), 1989.

[31] Aldebert. R., Rénovation du Grand Louvre à la gloire du plâtre. Le moniteur des travaux publics et du bâtiment, N° 41615,1992, pp. 56 – 68.

[32] C.S.T.B., Préparation des sols, des plaques de plâtre en chape flottante sèche. Le moniteur des sols, murs, plafonds, 1992, pp. 1162 – 3497.

[33] DJOUDI Amina ; Etude de la durabilité et du comportement thermo-phonique des bétons de plâtre renforcés par des fibres végétales du palmier dattier ; Thèse de Doctorat ; Ecole Nationale

Polytechnique (ENP), 2015 pp 30

[34] Cherait Y et Nafa Z, : Eléments de matériaux de construction et essai, édition Direction de publication universitaire Guelma. 2006

[35] Camara O., Le plâtre P.S.O.A dans la construction au Sénégal. Séminaire international sur le plâtre en Algérie., du 3 au 5 Décembre 1989.

[36] Cormon.P. Bétons légers d'aujourd'hui ; collection U.T.I. Edition ; Eyrolles Paris

[37] Hung NGUYEN Bétons de structure à propriétés d'isolation thermique améliorées : approche expérimentale et modélisation numérique ; thèse de doctorat, université de cergy-pontoise ;2013 pp17

[38] RILEM (1970). Commission des bétons légers. Terminologie et définition. Matériaux et construction (Terminology and definition. Materials and Construction). N°13, pp. 60-69.

[39] J.L Kass; D. Campbell-Allen, Functional classification of lightweight concrete, Matériaux et Constructions, vol.5, n°27, pp.171-172, 1972

[40] J-François AGASSANT ; Plastiques et composites Réf. Internet : 42147 ,3<sup>ème</sup> édition

[41] J.P Yvrard, expérimentation et modélisation du comportement mécanique du polystyrène expansé, thèse de doctorat, université de Lille ,1998.

[42] Rapport du laboratoire de contrôle technique et d'expertise, Etude et analyse du polystyrène expansé Avril 1998, Alger

[43] Bing Chen, Juanyu Liu. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. Cement and Concrete Research. 34 (2004) 1259–1263.

[44] Karim MILED Effet de taille dans le béton léger de polystyrène expansé, thèse de doctorat, l'école nationale des ponts et chaussées ,2005.

[45] González Madariaga, F. J. & Lloveras Macia, J., 2008. EPS (expanded polystyrene) recycled beads mixed with plaster or stucco, some applications in building industry. Informes de la Construcción, 60(509), pp. 35-43.

[46] Bing Chen, Juanyu Liu, Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. Cement and Concrete Research 34 (2004), pp.1259-1263.

[47] J.M Chaix ; G.Laviales ; D.Quenard, structure et propriétés d'un matériaux polyphasique modèle : le Béton légers isolant thermique, compte rendu de fin d'étude, CSTB Grenoble mars (1989).

[48] K Ganeshbabu, D. Saradhi Babu, Performance of fly ash concretes containing lightweight EPS aggregates, Cement and Concrete Composites 26(2004), pp.605-611.

[49] Jiang, H. & Luan, C., 2011. Preparation and Absorption/Desorption Performance of Gypsum-based Humidity Controlling Materials. Journal of Wuhan University of Technology-Mater, 26(4).

[50] Huang, K., Liang, H. & Hung, M., 2010. Improvement in fire prevention performance of cork-gypsum decorative materials by applying porous waste. International Journal of Physical Sciences, Volume 5, pp. 2038-2044

[51] Ramezani, H., Shandab, S. & Nouri, A., 2012. Study on effects of wood fiber content on

physical, mechanical and acoustical properties of wood-fiber-filled gypsum composites. *Materials Research*, Volume 15, pp. 236-241.

[52] Hummel, H. et al., 2007. Examination of the exposure- and odour-reducing characteristics of gypsum-based building materials containing zeolite. *Bauphysik*, 29(6), pp. 430-435.

[53] Del Río Merino, M. & Comino, P., 2001. Influencia del grado de dispersabilidad de la fibra de vidrio E en el comportamiento mecánico y la trabajabilidad de la escayola. *Materiales de construcción*, 51(261), pp. 33-44.

[54] Dalmay, P. et al., 2010. Properties of cellulosic fibre reinforced plaster : influence of hemp or flax fibres on the properties of set gypsum. *J Mater Sci*, Volume 45, pp. 793-803.

[55] Zhang, W. H., Li, G. Z. & Liu, M. R., 2011. Properties research of cotton fiber reinforced gypsum based composites. *Advanced Materials Research*, Volumen 194, pp. 1759-1762.

[56] Mohandesi, J. A., Sangghaleh, A., Nazari, A. & Pourjavad, N., 2011. Analytical modeling of strength in randomly oriented PP and PPTA short fiber reinforced gypsum composites. *Computational Materials Science*, Volumen 50, pp. 1619-1624.

[57] Iucolano, F., Caputo, D., Leboffe, F. & Liguori, B., 2015. Mechanical behavior of plaster reinforced with abaca fibers. *Construction and Building Materials*, Volumen 99, pp. 184-191.

[58] Lima, J. & Faria, P., 2016. Eco-Efficient Earthen Plasters : The Influence of the Addition of Natural Fibers. *Natural fibres: advances in science and technology towards industrial applications: from science to market*, Volumen 12, pp. 315-327.

[59] Leiva Aguilera, M. J., Del Río Merino, M. & Villoria Sáez, P., 2016. Feasibility of plaster composites with rice husk waste. *ZKG drymix special 2016*, pp. 30-40.

[60] Pichniarczyk, P., Malata, G. & Szelag, H., 2005. The polymer impregnated gypsum mineral wool as a new, alternative material for thermal insulation. *Cement Wapno Beton*.

[61] Demir, I. & Baspinar, M. S., 2008. Effect of silica fume and expanded perlite addition on the technical properties of the fly ash-lime-gypsum mixture. *Construction and Building Materials*, 22(6), p. 1299–1304.

[62] Borreguero, A. M. et al., 2010. Improvement of the thermal behaviour of gypsum blocks by the incorporation of microcapsules containing PCMS obtained by suspension polymerization with and optimal core/coating mass ratio. *Applied Thermal Engineering*, 30(10), pp. 1164-1169.

[63] Xi, Y. G., Peng, T., Liu, H. & Chen, J., 2011. Preparation and Properties of Expanded Vermiculite/Gypsum Thermal Insulation Boards. *Advanced Materials Research*, Volumen 178, pp. 220-225.

[64] Baspinar, M. S. & Kahraman, E., 2011. Modifications in the properties of gypsum construction element via addition of expanded macroporous silica granules. *Construction and Building Materials*, 25(8), pp. 3327-3333

[65] Vimmrová, A., Nazmunnahar, M. & Cerny, R., 2016. Lightweight gypsum-based materials prepared with aluminum powder as foaming agent. *Cement Wapno Beton*, 19(5), pp. 299-307.

[66] Oliver, A., 2012. Thermal characterization of gypsum boards with PCM included : Thermal energy storage in buildings through latent heat. *Energy and Buildings*, Volumen 48, pp. 1-7.

[67] Cherki, A. A.-b. y otros, 2014. Experimental thermal properties characterization of insulating

- cork-gypsum composite. *Construction and Building Materials*, Volumen 54, pp. 202-209.
- [68] Gencel, O. y otros, 2016. A novel lightweight gypsum composite with diatomite and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, Volumen 113, pp. 732-740.
- [69] Del Río Merino, M. & Hernández Olivares, F., 2004. Lightened plaster: alternative solutions to cellular solids addition. *Materiales de Construcción*, 54(275).
- [70] Vimrová, A., Keppert, M., Svoboda, L. & Černý, R., 2011. Lightweight gypsum composites: Design strategies for multi-functionality. *Cement and Concrete Composites*, 33(1), pp. 84-89.
- [71] Huang, B., Xhang, Y. & Li, D. X., 2013. Study on the Influences of Foaming Gypsum's Performance. *Materials Science Forum*, Volumen 743, pp. 222-227.
- [72] Del Río Merino, M., Domínguez, J. D. & Hernández Olivares, F., 1998. Escayola aligerada con sólidos celulares. *Informes de la construcción*, 50(458), pp. nov-dic.
- [73] Gmouh, A., Samdi, A., Moussa, R. & Gomina, M., 2001. Lightened plaster-based composite materials: Elaboration and mechanical properties. *Silicates industriels*, Volumen 5-6, pp. 61-66
- [74] Yong, G. X., Tong, J. P., Hai, F. L. & Ji, M., 2010. Preparation and Properties of Expanded Vermiculite/Gypsum Thermal Insulation Boards. *Advanced Materials Research*, Volumen 178, pp. 220-225.
- [75] Hernández-Olivares, F., Bollati, M., Del Río Merino, M. & Parga-Landa, B., 1999. Development of cork-gypsum composites for building applications. *Construction and Building Materials*, 13(4), pp. 179-186.
- [76] Zhou, S. y otros, 2013. The preparation and performance of gypsum-based composites. *Applied Mechanics and Materials*, Volumen 310, pp. 46-50.
- [77] Leiva Aguilera, M. & Del Río Merino, M., 2014. Escayola aditivada con residuos agrícolas: cáscara de arroz y cáscara triturada. En: e. a. C. Llinares-Millán, ed. *Construction and Building Research*. Switzerland: Springer, pp. 463-470.
- [78] González Madariaga, F. J. & Lloveras Macia, J., 2008. EPS (expanded poliestyrene) recycled bends mixed with plaster or stucco, some applications in building industry. *Informes de la Construcción*, 60(509), pp. 35-43.
- [79] Karaman, S., Sahin, S., Gunal, H. & Orung, I., 2006. Stabilization of waste pet bottles with Gypsum. *Journal of Applied Sciences*, Volumen 6, pp. 1119-1122.
- [80] García Santos, A., 2009. PPF-reinforced, ESP-lightened gypsum plaster. *Materiales de Construcción*, 59(293), pp. 105-124.
- [81] Gutierrez-Gonzalez, S. et al., 2013. Rheological behaviour of gypsum plaster pastes with polyamide powder wastes. *Construction and Building Materials*, Volume 38, pp. 407-412.
- [82] Gutiérrrez-González, S. y otros, 2012. Lightweight plaster materials with enhanced thermal properties made with polyurethane foam wastes. *Construction and Building Materials*, 28(1), pp. 653-658
- [83] Khalil, A., Tawfik, A., Hegazy, A. & El-Shahat, M., 2013. Effect of different forms of silica on the physical and mechanical properties of gypsum plaster composites. *Materiales de construcción*, 63(312), pp. 529-537.

- [84] Herrero, S., Mayor, P. & Hernández Olivares, F., 2013. Influence of proportion and particle size gradation of rubber from end-of-life tires on mechanical, thermal and acoustic properties of plaster-rubber mortars. *Materials & Design*, Volume n 47, pp. 633-642.
- [85] Jiménez Rivero, A., de Guzmán Báez, A. & García Navarro, J., 2014. New composite gypsum plaster – ground waste rubber coming from pipe foam insulation. *Construction and Building Materials*, Volume n°55, pp. 146-152.
- [86] González Madariaga, F. J., 2005. Caracterización de mezclas de residuos de poliestireno expandido (EPS) conglomerados con yeso o escayola, su uso en la construcción (tesis doctoral). Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.
- [87] Veischi, S. & Yousefi, A.A., 2003. The use of polystyrene in lightweight brick production. *Iranian Polymer Journal*, 12(4), pp. 323-329.
- [88] El-Bashir, S., 2007. Thermal and mechanical properties of plywood sheets based on polystyrene/silica nanocomposites and palm tree fibers. *Polymer Bulletin*, 70(7), pp. 2035-2045.
- [89] Zhengxian, Y., Hollar, J. & Xianming, S., 2010. Surface-sulfonated polystyrene microspheres improve crack resistance of carbon microfiber-reinforced Portland cement mortar. *Journal of Materials Science*, 45(13), pp. 3497-505.
- [90] Wu, Z., Chen, B. & Liu, N., 2013. Fabrication and compressive properties of expanded polystyrene foamed concrete : Experimental research and modeling. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 18(1), pp. 61-9.
- [91] Madandoust, R., Ranjbar, M. M. & Mousavi, S. Y., 2011. An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, 25(9), pp. 3721-3731.
- [92] Yi, X. & Linhua, J., 2011. Investigating mix proportions of lightweight expanded polystyrene concrete. *Applied Mechanics and Materials*, pp. 950-3.
- [93] Tang, W., Lo, Y. & Nadeem, A., 2008. Mechanical and drying shrinkage properties of structural-graded polystyrene aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 30(5), pp. 403-409.
- [94] Demirboga, R. & Kan, A., 2012. Thermal conductivity and shrinkage properties of modified waste polystyrene aggregate concretes. *Construction and Building Materials*, Volumen 35, pp. 730-734.
- [95] Bosco Hernandez-Zaragoza, J. y otros, 2013. Cellular Concrete Bricks with Recycled Expanded Polystyrene Aggregate. *Advances in Materials Science & Engineering*, p. 160162 (5 pp.)..
- [96] Asaad, J. & Tawfik, S., 2011. Polymeric composites based on polystyrene and cement dust wastes. *Materials & Design*, 32(10), pp. 5113-5119.
- [97] Ru, W. & Meyer, C., 2012. Performance of cement mortar made with recycled high impact polystyrene. *Cement and Concrete Composites*, 34(9), pp. 975-81.
- [98] Lipeng, C., 2012. Experimental research on producing thermal insulating bonding mortar by spent polystyrene foam. *Applied Mechanics and Materials*, Volumen 174-177, pp. 1253-6.
- [99] Demirel, B., 2013. Optimization of the composite brick composed of expanded polystyrene and pumice blocks. *Construction and Building Materials*, Volumen 40, pp. 306-313.

- [100] Yi, X., Linhua, J., Jinxia, X. & Yang, L., 2012. Mechanical properties of expanded polystyrene lightweight aggregate concrete and brick. *Construction & Building Materials*, 27(1), pp. 32-8.
- [101] L. Rouvreau "Analyse de la faisabilité de l'utilisation de déchets de plâtre pour emblayer des carrières de gypse" Rapport finale BRGM/RP-57684-FR
- [102] Mohamed Ameer ,Étude du comportement thermique par modélisation de béton de plâtre renforcé de fibres végétales du palmier dattier ,Mémoire de magister ,université Ammar Thelidji – Laghouat ,2017 .
- [103] Bencheikh Hmida "Étude et réalisation d'un système de refroidissement passif en utilisant une toiture radio-évaporative dans les climats chaud et arides", Thèse de doctorat, université Mentouri de Constantine, Algérie, 2007.
- [104] BELHADJ Belkacem ; 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), Thèse de doctorat, université Ammar Thelidji – Laghouat,2016.
- [105] 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.
- [106] 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.
- [107] H. Asan, Investigation of wall's optimum insulation position from maximum time lag and decrement factor. *Building and Environment*. 32 (2000) 197-203.
- [108] H. Asan, Numerical computation of time lag and decrement factors for different building materials. *Building and Environment*. 41 (2006) 915-920.
- [109] H. Asan, Y.S. Sancakatar, Effects of wall's thermophysical properties on time lag and decrement factor. *Energy and Buildings*. 28 (1998) 159-166.
- [110] 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.
- [111] 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.
- [112] 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.
- [113] 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.
- [114] David Y.K. Toguyeni, Ousmane Coulibaly, Abdoulaye Ouedraogo, Jean Koulidiati, 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.

- [115] N. Fezzioui, B. Droui, M. Benyamine 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.
- [116] N.B. Singh and B. Middendorf. Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. vol. 53, 2007.
- [117] A.M Neville, J.J. Brooks. *Concrete Technology*. 2nd ed. Pearson Education: Prentice Hall; 2010.
- [118] A. Djoudi. Caractérisation structurale et rhéologique des bétons de plâtre et leurs renforcements par les fibres végétales du palmier dattier. Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2002, P.117.
- [119] A. Ziregue. Influence de différents facteurs d'allègement sur les caractéristiques physico-mécaniques et thermiques D'un béton à matrice calcaire-ciment. Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2005, P.66.
- [120] Bachar M. Optimisation de la composition d'un mortier de chaux en vue de l'élaboration d'un béton de chaux léger à base de copeaux de bois. Mémoire de Magister, Université de Laghouat, 2006, P.98.
- [121] Adam M. Neville, *Propriétés des bétons*, Edition EYROLLES, 2000.
- [122] R. Dupain, R. Lanchan, J.C. Saint-Arroman. *Granulats, sols, ciment et bétons*.
- [123] Del Río Merino, M., 1999. *Elaboración y aplicaciones constructivas de paneles prefabricados de escayola aligerada y reforzada con fibras de vidrio E y otros aditivos (tesis doctoral)*. Madrid : Universidad Polytechnical de Madrid. Casteilla, 1995.
- [124] UNE-EN 13279-1 *Liants-plâtres et enduits à base de plâtre pour le bâtiment - Partie 1 : définitions et exigences*
- [125] Ferrándiz-Mas V, Bond T, Garcia-Alcocel E, et al. Lightweight mortars containing expanded polystyrene and paper sludge ash. *Constr Build Mater*. 2014 ;61 :285–292.
- [126] San-Antonio-Gonzalez A, Merino M, Arrebola C, Villoria-Saez P. Lightweight material made with gypsum and EPS waste with enhanced mechanical strength. *J Mater Civ Eng*. 2016 ;28 :04015101.
- [127] Zitani. I., Caractérisation physico-mécanique et thermique d'un béton de plâtre à base des granulats de liège. Mémoire d'ingénieur, Université de Laghouat, 2011, P. 83.
- [128] ACI, Committee 213R-87. *Guidelines for structural lightweight aggregate concrete*, 1 CI Manual of Concrete Practice, Part I: Materials and General Properties of Concrete. Detroit, Michigan: Michigan, Farmington Hills; 1994. p. 18.
- [129] A. Bicer, F. Kar, Thermal and mechanical properties of gypsum plaster mixed with expanded polystyrene and tragacanth, *Thermal Science and Engineering Progress* (2017), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsep.2017.02.008>
- [130] Bederina .M, Marmoret. L, Mezreb. K, Khenfer .M-M, Bali. A Et Queneudec .M; Effect of the addition of wood shavings on the thermal conductivity of sand concretes: experimental study and modelling; *construction and building materials*; 21:662-668 ; 2007.

[131] Samira BOUAZIZ, Kamal AIT TAHAR. Elaboration et Caractérisation d'un Béton Composite à Granulats Composites ; 82<sup>ème</sup> CONGRES de L'ACFAS du 12 au 16 Mai 2014 Université Concordia – Québec

[132] Cerezo V ; Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique ; thèse de l'INSA de Lyon 2005

[133] Boutin, Conductivité thermique du béton cellulaire auto-clavé modélisation par méthode auto cohérente ; Matériaux et Constructions, 1996, vol.29 pp.609-615

[134] Jackson, K.W.And Black, W.Z. A unit cell model for predicting the thermal conductivity of a granular medium containing an adhesive binder. Int. J. Heat Mass Transfer.,1983, vol.26, pp.87-99.

[135] Laurent, J.P. La conductivité à sec des bétons cellulaires auto-clavés : un modèle conceptuel. Matériaux et Constructions, 1991, vol.24, pp.221-226.

[136] BOUTIN, C. Conductivité thermique du béton cellulaire autoclavé : modélisation par méthode autocohérente. Matériaux et Constructions, 1996, vol.29, pp.609-615.

[137] CORDIER, C. *Caractérisation thermique et mécanique des bétons de chanvre* : rapport de stage de fin d'études. Ecole doctorale MEGA. Vaulx-en-Velin : ENTPE, 1999. 56 p.

[138] Jean-Pierre OLLIVIER et Angélique VICHOT ; La durabilité des bétons (livre) ; Presses des Ponts et Chaussées ; pp616

[139] **Coquard P.**, Résistances mécaniques des plâtres secs et humides. Thèse de doctorat. Université d'Aix-Marseille, 1992, P.100.

[140] **Dupain R., Lancho R., Saint Arroman J.C.**, Granulats, sols, ciments et bétons ; caractérisation des matériaux de génie civil par les essais de laboratoires. Collection Capliez. Edition casteilla, vol.235, Paris, 1995.

[141] **Badens E.**, Etude de l'absorption de l'eau sur les cristaux de gypse et de son influence sur les propriétés mécaniques de plâtre pris et additive. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille, 1997, P.110.

[142] **Cerulli T., Pistolesi C., Maltese C., Salvioni D.**, Durability of traditional plasters with respect to blast furnace slag-based plaster, Cement and Concrete Research, vol.33, 2003, pp. 1375–1383

[143] Edgar-Alejandro Pachon-Rodriguez Etude de l'influence de la dissolution sous contrainte sur les propriétés mécaniques des solides - fluage du plâtre [Thèse de doctorat]. Lyon : Université de Lyon; 2011. p. 135.

[144] Philippe Heim, Olivier de Linares and Laure Hym. Polystyrène et copolymères de styrène. Éditions techniques de l'ingénieur, traité « Plastiques et composites », AM 3 340, 2002.

[145] M. Carrega, V. Verney. Matières plastiques - 3ème édition. s.l. : Dunod, 2012.

[146] Charle E. Carraher Jr. USED (GD) Seymour/Carragher's Polymer Chemistry. Sixth Edition; Basel, New York: Maecel Dekker Inc, 2003. p. 960.

[146] Lewery AJ, Williamson J. The setting of gypsum plaster. part ii. the development of microstructure and strength. J Mater Sci. 1994; 29:5524–5528.

- [147] E.M. GARTNER. Cohesion and expansion in polycrystalline solids formed by hydration reactions - the case of gypsum plasters. *Cement and Concrete Research*, 39, pp. 289–295, 2009.
- [148] Fathollah Sajedi · Payam Shafigh. High-Strength Lightweight Concrete Using Leca, Silica Fume, and Limestone. *Arab J Sci Eng* (2012) 37:1885–1893.
- [149] Duncan MARSHAMM Derec Worthing & Roger Heath. *Understanding – Housing – Defects*. 3rd edition, Estate Gazelle, 2009, p.344.
- [150] Alicia San-Antonio-González, Mercedes Del Río Merino, Carmen Viñas Arrebola, Paola Villoria Sáez. Lightweight material made with gypsum and extruded polystyrene waste
- [151] Kyung-Min Song, Jonathan Mitchell, Lynn F. Gladden. Observing Microstructural Evolution During Plaster Hydration. *The Open-Access Journal for the Basic Principles of Diffusion Theory, Experiment and Application, Diffusion Fundamentals* 10 (2009) 22.1 - 22.3.
- [152] DTR C 3-2 "réglementation thermique des bâtiments d'habitation, Règle de calcul des déperditions calorifiques, fascicule 1" CNERIB, 1997.
- [153] 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.
- [154] E. Erell, Y. Etzion. A radiative cooling system using water as a heat exchange medium. *Architectural science Review*. 35 (1992) 39-49.
- [155] 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.
- [156] B. Belhadj<sup>a</sup>, M. Bederina<sup>a</sup> & M. Quéneudec<sup>b</sup>. Effect of wall orientation of the sand concrete lightened by lignocellulosic materials on the thermal inertia properties. *International Conference On Materials and Energy ICOME'16, La Rochelle, France, 17-20 May 2016. Proceeding*, (p. 645-650).
- [157] 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.
- [158] Saboor S, Ashok Babu T. P." Effect of Air Space Thickness within the External Walls on the Dynamic Thermal Behaviour of Building Envelopes for Energy Efficient Building Construction", *Energy Procedia* volume 79, 2015 p766 – 771.
- [160]** HelioClim-1 monthly, weekly and daily Global Solar Irradiation values over a horizontal plane, Meteosat satellite field of view ; site web: <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/helioclim-1>

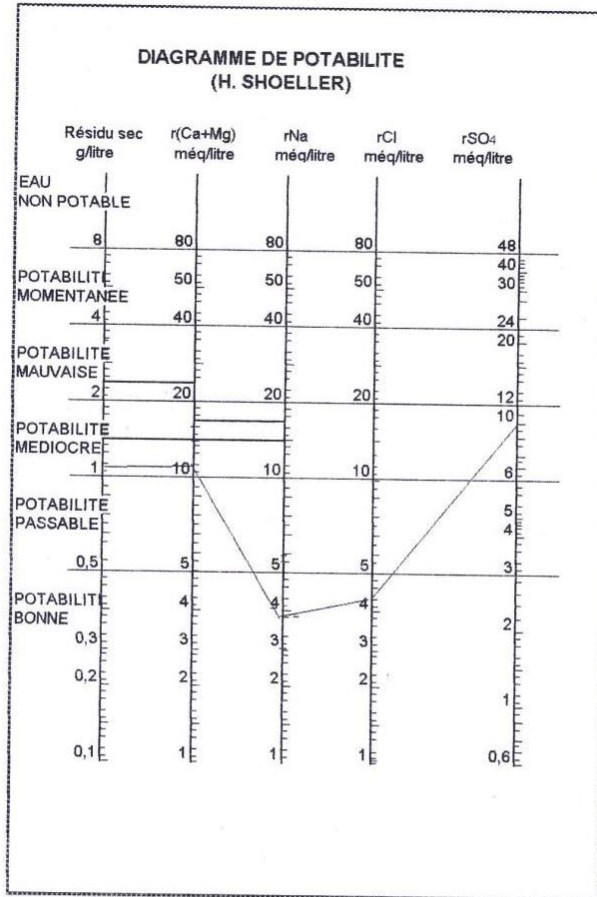
**ANNEXE (I)**

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

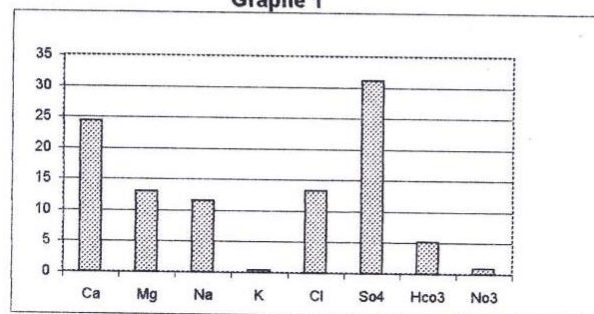
**RESULTATS DE L' ANALYSE DE L' EAU**

Origine	Eau robinet	/	/	Bactériologie	
Date de prélèvement	07.08.2006	T°C	/	N° des germes totaux	
Date d'envoi	07.08.2006	N° Ect	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		
K en mg/litre (Potassium)	6		0,4		
Cl en mg/litre (Chlorures)	151,7	Balanc anions mé/l 16,21	4,28	Sulfito-réducteurs	
SO <sub>4</sub> en mg/litre (Sulfates)	480		10	Bactériophage fécaux	
CO <sub>3</sub> en mg/litre (Carbonate)					
HCO <sub>3</sub> en mg/litre (Bicarbonat)	100,7		1,65	Autres germes	
NO <sub>3</sub> en mg/litre (Nitrates)	17,5		0,28	Turbidité en NTU	
Conductivité En 1/10 ms/cm à 25°C	16,79	Minéralisation 1140 mg/l		TDS en mg/litre	
				Salinité ‰	
Résidu sec à 180°C	1175 mg/l	Somme des ions 1049 mg/l		TEST CHLORE en mg/l	
				Couleur 436 nm	
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 NO <sub>2</sub>		Eléments Toxiques ou Indésirables Mg/litre		Chrome	
Ammonium NH <sub>4</sub>				Cu comb	
Indice de KMnO <sub>4</sub>				Cu total	
CO <sub>2</sub> total				Zinc	
Pourcentage de saturation en O <sub>2</sub> %				Mn	
Oxygène dissous O <sub>2</sub>				Aluminium	
Phosphate PO <sub>4</sub>				Ozone	
MES en mg/litre				Iode	
Fer dissous				Brome	
PH (Laboratoire)				SiO <sub>2</sub> dissoute	
		H <sub>2</sub> S			
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%	SO <sub>4</sub> =31,1%	HCO <sub>4</sub> =5,13%	NO <sub>3</sub> =0,87%	Sulfatée-Calcique
<b>INTERPRETATION DE L'ANALYSE</b>			<b>POTABILITE CHIMIQUE : PASSABLE</b>		

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



L'outil de simulation choisi pour l'étude de fiabilité des composites étudiés est EnergyPlus version 1. Il s'agit d'un outil de simulation dynamique permettant de prévoir le comportement énergétique de bâtiments. EnergyPlus se base sur les outils BLAST (Building Loads Analyse and System Thermodynamics) et DOE-2, qui ont été développés dans les années 80 et restés en développement avec une nouvelle version disponible tous les 6 mois. Il peut être utilisé par des ingénieurs, des architectes et des chercheurs et c'est le département de l'énergie des États Unis (DOE) qui finance cet outil, le LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) coordonnant le développement. EnergyPlus est uniquement un moteur de calcul sans interface graphique. D'autres outils se sont développés utilisant le moteur de calcul d'EnergyPlus mais avec leur propre interface graphique comme par exemple l'outil Design-Builder. Design-Builder permet la saisie graphique d'un modèle, la gestion de ses bases de données (matériaux, vitres, plannings d'activité, etc.) et gère de façon transparente la liaison au moteur de calcul jusqu'à la restitution des résultats sous forme graphique ou tableau.

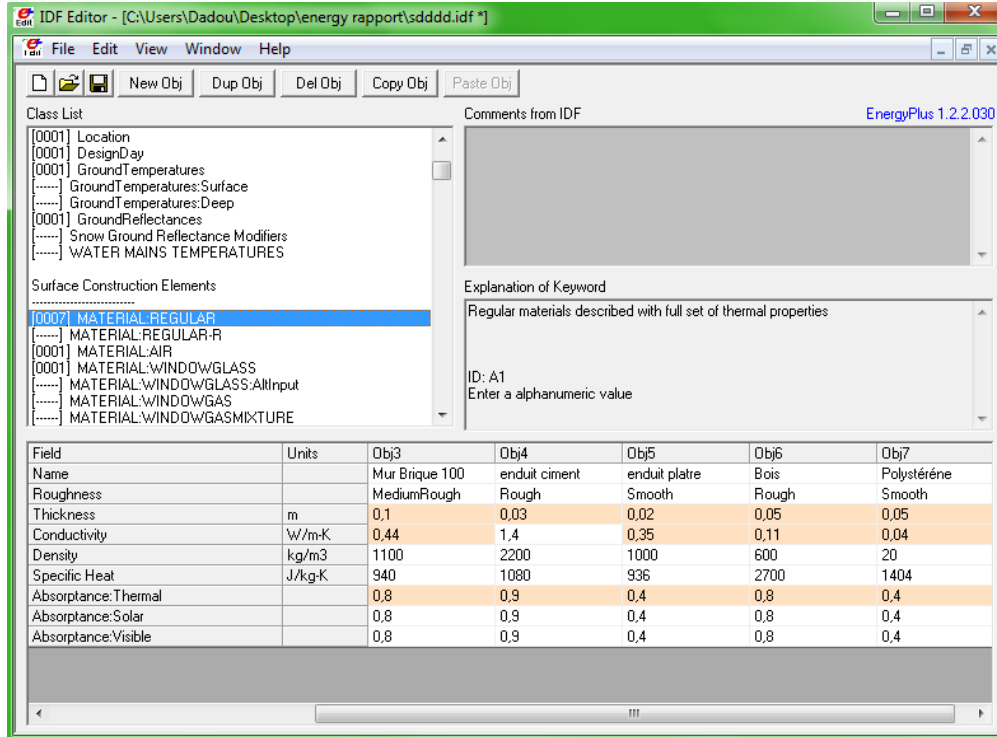


Figure 1 : Éditeur IDF

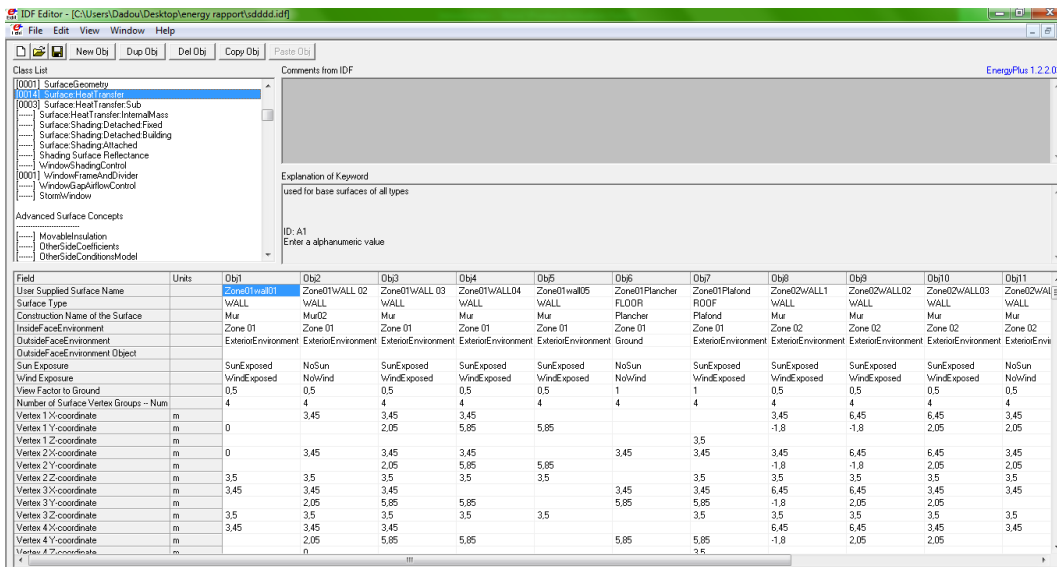


Figure 2 : Éditeur IDF (Zoning)

Les données nécessaires pour la simulation, se résument comme suit :

Tableau A-: Données nécessaires pour la simulation d'EnergyPlus.

ANNEXES

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

Exemple de résultat de simulation relatif au **Mur 4 (d)** : 1 cm mortier de ciment + 15 cm brique + 5 cm lame d'air + 10 cm brique + 10 cm mortier plâtre-billes polystyrènes.

ANNEXES

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 01:00:00,30.2211543415756,29.0900341610220,30.3063132877856,29.1912699894934,30.4980799487197,29.1931304100870,30.1704267543441,29.1429320312618,30.8210032970608,29.8975946342947,23.8616981276430,18.0000000000000,31.4975756371490,32.9909682933891,29.1760953306256	
07/21 02:00:00,30.2649466982605,28.1658036680064,30.3466725040346,28.2565103094555,30.5158438095352,28.2578150157084,30.2274565266901,28.2021854983016,30.8896506921045,28.8080405853811,23.8977950696793,18.0000000000000,31.2598989867105,31.4464054326525,29.2093700705564	
07/21 03:00:00,30.2604813435145,27.3740178969475,30.3380537673527,27.4556930579707,30.4876218597017,27.4563291255418,30.2334649138303,27.3995713827587,30.8877780472225,27.8950790452846,23.9096000964585,18.0000000000000,30.9937470764134,30.1274387211518,29.1955753001590	
07/21 04:00:00,30.2111477913924,26.7301165705434,30.2841571314913,26.8035661607733,30.4166596906467,26.8038771901224,30.1920701696128,26.7482828136053,30.8245398893410,27.1597325500467,23.8977878654730,18.0000000000000,30.7086955392256,29.0251799165709,29.1389451186253	
07/21 05:00:00,30.1213655623757,26.3360578092678,30.1896384688600,26.4004994062247,30.3072277160947,26.4022434873710,30.1081455298914,26.3490728416831,30.7096218907882,26.6951811473393,23.8639946019708,18.0000000000000,30.4110515027690,28.2034136073342,29.0444808917770	
07/21 06:00:00,29.9968159092736,26.3218204963215,30.0603482564352,26.3751059087129,30.1648531652076,26.3812712916649,29.9878419884355,26.3311993429079,30.5529403018464,26.6256371809863,23.8109997892216,18.0000000000000,30.1065351849101,27.7551569150577,28.9180962816902	
07/21 07:00:00,29.8428830628971,27.1074613761701,29.9017852815805,27.2157074187336,29.9947696265459,31.9806543628352,29.8369483279359,28.6012415938767,30.3630535001839,27.4281127670272,23.7415690823611,18.0000000000000,29.7997566967526,28.9301761910475,28.7653320606841	
07/21 08:00:00,29.6652682688559,28.9160219401666,29.7197222799386,29.1256807508484,29.8026074218754,41.3506255412577,29.6615095558221,31.2789823365344,30.1479276256765,29.3004639275054,23.6586407523194,18.0000000000000,29.4971111867783,33.5994203418122,28.5918188933479	

ANNEXES

07/21 09:00:00,29.4708355590448,31.3465510474970,29.5210817881382,31.6363657739166,29.5966374786166,47.9145321212991,29.4690876721590,32.6663948493426,29.9159971662711,31.7786117036492,23.5656686000154,18.0000000000000,29.2139967683420,40.1753206793795,28.4047319799058	
07/21 10:00:00,29.2694095177876,35.1262456697171,29.3157953705892,35.7656970657669,29.3929226597282,50.6378307526412,29.2711839275430,34.7391271636874,29.6781866721622,34.4738290290164,23.4675497570045,18.0000000000000,28.9827746336398,47.2510233534770,28.2154335034832	
07/21 11:00:00,29.0746692454469,39.4223789839325,29.1177155474034,40.4852690341147,29.2155125482369,50.8471116989745,29.0829053404861,37.3021941792229,29.4489348904513,37.2287412818527,23.3711783922894,18.0000000000000,28.8445302028421,54.2081450446244,28.0397534372111	
07/21 12:00:00,28.9028945187123,43.3339267559535,28.9433786238545,44.7394603159135,29.0878652976575,48.9743499623819,28.9196255920106,39.8259382656990,29.2446666369570,39.8209759129218,23.2847501382298,18.0000000000000,28.8315498567984,60.3837503467107,27.8944206896265	
07/21 13:00:00,28.7709944483896,46.2210757717121,28.8101578871732,47.8237361103854,29.0242666061871,45.7982955329397,28.7949708934251,41.9341373095920,29.0811165745020,42.3527412285076,23.2164062647330,18.0000000000000,28.9577861717437,65.1361439036793,27.7933400207583	
07/21 14:00:00,28.6930005362435,47.8701809574739,28.7327017492092,49.5011612027541,29.0264347268998,45.6778580049678,28.7190223032651,43.5748154336336,28.9699804004411,48.4827461447581,23.1722038932059,18.0000000000000,29.2164130770703,68.1009473893436,27.7447767667013	
07/21 15:00:00,28.6777936698762,48.0517219326043,28.7203714672245,49.5202813205801,29.0861159878434,45.8868007108948,28.6977747703402,44.5255028272819,28.9180599175274,54.7884901754680,23.1554774020059,18.0000000000000,29.5828554511206,69.0036569307218,27.7510180519772	
07/21 16:00:00,28.7282624205681,46.5816481221609,28.7761344174080,47.6866481015149,29.1908684490560,45.4407493798113,28.7332914867591,44.4636249575365,28.9290430287118,59.9660274302149,23.1673096077774,18.0000000000000,30.0214884760069,67.6854089388197,27.8100223469500	
07/21 17:00:00,28.8404882857359,44.3531932039658,28.8956490459158,45.0953938402998,29.3293308672629,44.3770395226690,28.8231287500185,44.3549758053206,29.0057113210145,62.8203509229098,23.2064350282224,18.0000000000000,30.4900327238814,64.3266338134850,27.9168281169143	
07/21 18:00:00,29.0038022118998,42.1643968786836,29.0673579199959,42.7536320813139,29.4923714681590,42.4829621515141,28.9600434774462,44.7160752212945,29.1490310812207,62.6158637338507,23.2692115953197,18.0000000000000,30.9435381197252,59.1612742186916,28.0637848188142	

ANNEXES

07/21 19:00:00,29.2036385881831,39.6266276340710,29.2755076166390,40.1026847670242,29.6725851516052,39.9845056744553,29.1341783817777,43.8028040372136,29.3565408958086,57.4709748781319,23.3510643753623,18.0000000000000,31.3409726304471,52.7181102318755,28.2415915142086	
07/21 20:00:00,29.4229549095412,36.6728859979697,29.5019323737505,36.9492476767863,29.8614430755177,36.8996353301697,29.3337768897152,37.9813255582726,29.6186727186833,43.4822278545840,23.4463342756512,18.0000000000000,31.6477651901592,46.3650522963149,28.4387422694029	
07/21 21:00:00,29.6445218871075,34.5625754411555,29.7287179061298,34.7601649673548,30.0484248521519,34.7398907636318,29.5463661940649,35.0672840232075,29.9170374539829,37.9411832718744,23.5484768456124,18.0000000000000,31.8391785208251,42.4540085867419,28.6417601413543	
07/21 22:00:00,29.8520616067393,32.7787514664965,29.9393636347641,32.9373707405857,30.2212158489834,32.9289431331966,29.7573560066308,33.0142702535307,30.2228454326049,34.8239568306856,23.6502785366695,18.0000000000000,31.9061984630433,39.3708842792745,28.8352751458846	
07/21 23:00:00,30.0309377997585,31.2901893941184,30.1192693775713,31.4243048596990,30.3669919945264,31.4213129404439,29.9486878561761,31.4196610145494,30.4998009693205,32.6980369494412,23.7442257519016,18.0000000000000,31.8610031116624,36.8341721092868,29.0029293324830	
07/21 24:00:00,30.1693786267432,30.0928240337650,30.2568794390010,30.2085046120780,30.4746157074126,30.2087386257578,30.1031210875089,30.1727494833740,30.7173272313006,31.1364736293821,23.8230625552191,18.0000000000000,31.7277475105262,34.7466315298180,29.1308572622746	

## ANNEX III

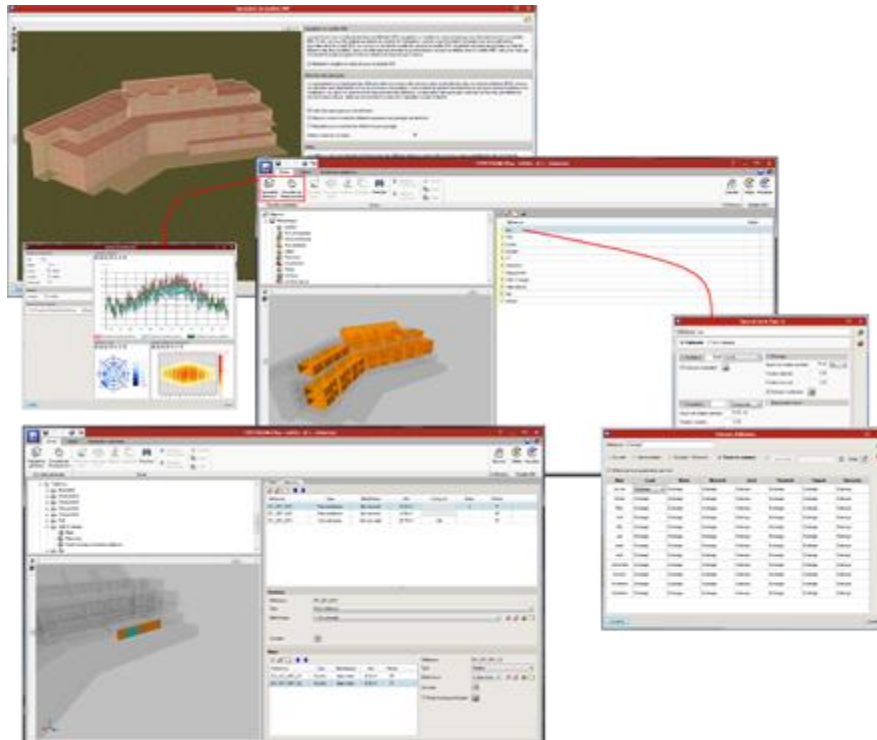
### CYPETHERM EPlus



CYPETHERM EPlus est un logiciel pour la simulation des performances énergétiques des bâtiments avec EnergyPlus™ (version 9.1), intégré au flux de travail Open BIM via la plateforme BIMserver.center.

#### CARACTERISTIQUES DE L'INTERFACE

L'interface du logiciel CYPETHERM EPlus permet une création rapide du projet, notamment à l'aide d'outils d'import et de détection sur le modèle BIM fourni:

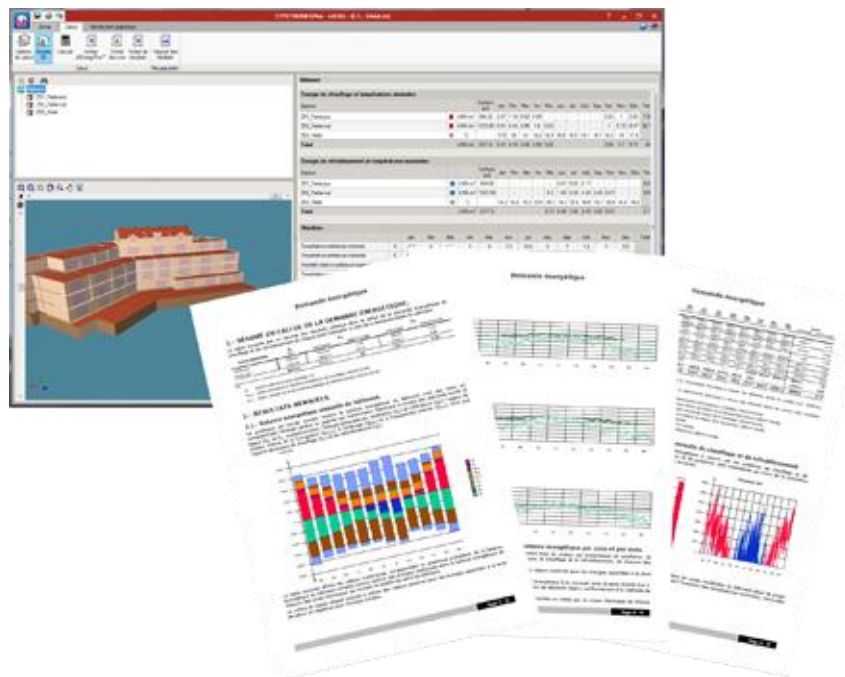


**Figure 3** : présentation du logiciel 1

- Import de modèles Open BIM aux formats **IFC4 et IFC2x3**
- **Synchronisation du modèle BIM** pour l'intégration de modifications géométriques
- Gestion des arêtes du modèle BIM et **détection automatique des ponts thermiques**
- Détection **automatique des masques** proches et lointains du modèle BIM
- Possibilité de saisie numérique traditionnelle du projet, avec ou sans lien au modèle BIM
- Visualisation et navigation dans le projet par **arborescence ou par vues en plan**
- **Visualisation et interaction** du modèle BIM dans l'interface de travail
- Création et gestion de **scénarios** d'activité détaillés pour les **locaux**
- Création et gestion de **scénarios** détaillés pour les **protections solaires**

### FONCTIONNALITES DE CALCUL

Le logiciel CYPETHERM EPlus permet de réaliser une simulation thermique dynamique complète avec le moteur de calcul EnergyPlus™:



**Figure 4** : présentation du logiciel 2

- Évolution de température des locaux
- Calcul de la demande énergétique de chauffage et de refroidissement
- Affichage de la balance énergétique mensuelle et annuelle

- Calcul des consommations énergétiques de chauffage et de refroidissement
- Calcul intégré du coefficient de transmission thermique des ponts thermiques linéaires conformément à la norme NF EN ISO 10211 à l'aide du logiciel CYPETHERM BRIDGES (en option)
- Calcul intégré des condensations interstitielles et superficielles des parois conformément à la norme NF EN ISO 13788 à l'aide du logiciel CYPETHERM HYGRO (en option).
- Exportation vers COMCheck™

### **VERSIONS ET MODULES DE CYPETHERM EPLUS**

Une version gratuite et opérationnelle du logiciel CYPETHERM EPlus est disponible et permet la saisie manuelle du projet ou par import de maquette numérique au format IFC, la caractérisation thermique des parois et ponts thermiques, et le calcul de la demande thermique du bâtiment avec EnergyPlus™.

Le logiciel complet CYPETHERM EPlus est disponible en version professionnelle avec les modules additionnels suivants :

- EnergyPlus: Demande énergétique et évolution des températures
- EnergyPlus: Simulation des consommations énergétiques
- Exportation vers 'COMCheck'
- Synchronisation de modèles BIM
- Détection et gestion des arêtes du modèle BIM
- Détection des masques solaires du modèle BIM

Le module intégré d'**Analyse numérique des ponts thermiques linéaires ISO 10211** est disponible optionnellement en faisant l'acquisition d'une version professionnelle complète du logiciel CYPETHERM BRIDGES.

Le module intégré de **Calcul de condensations interstitielles et superficielles ISO 13788** est disponible optionnellement en faisant l'acquisition d'une version professionnelle complète du logiciel CYPETHERM HYGRO.

Le logiciel CYPETHERM EPlus fait partie du groupe de logiciels CYPETHERM Suite.

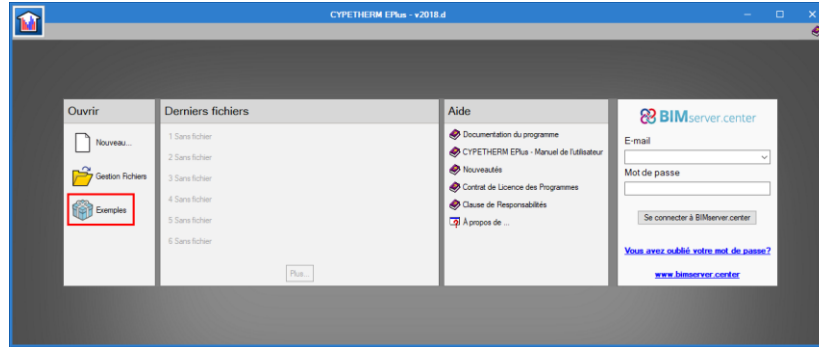


Figure 5 : interface BIM server

### DONNEES DE L'EMPLACEMENT

Les données météorologiques et géographiques sont accessibles via la fenêtre 'Données de l'emplacement'.

Dans cette fenêtre, vous pourrez renseigner l'altimétrie, l'orientation d'un projet, et lui associer un fichier de données climatiques.

Les fichiers de données climatiques apparaissent au format EPW. Vous pouvez trouver ces fichiers pour de nombreuses régions du monde sur le site du moteur Energy Plus au lien suivant : <https://energyplus.net/weather>

Vous pouvez également trouver ce type de fichier de données climatiques sur d'autres plateformes.

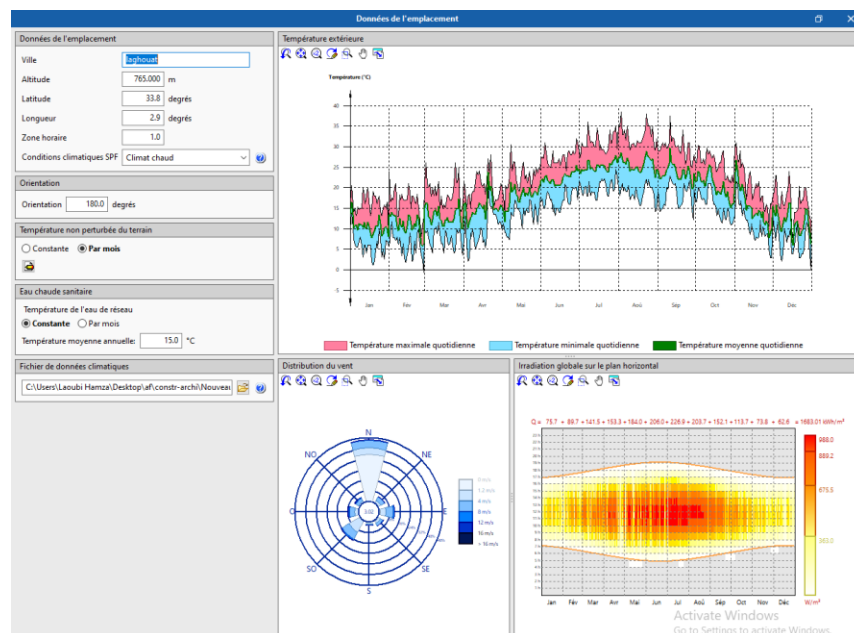


Figure 6 : Données météorologiques et géographiques

## BIBLIOTHEQUE

La bibliothèque comporte la référence de chacun des éléments d'un projet. C'est ici que vous devez saisir les caractéristiques des locaux, parois, baies et ponts thermiques du bâtiment.

Tout élément de la bibliothèque peut être exporté pour ensuite être importé dans une nouvelle étude.

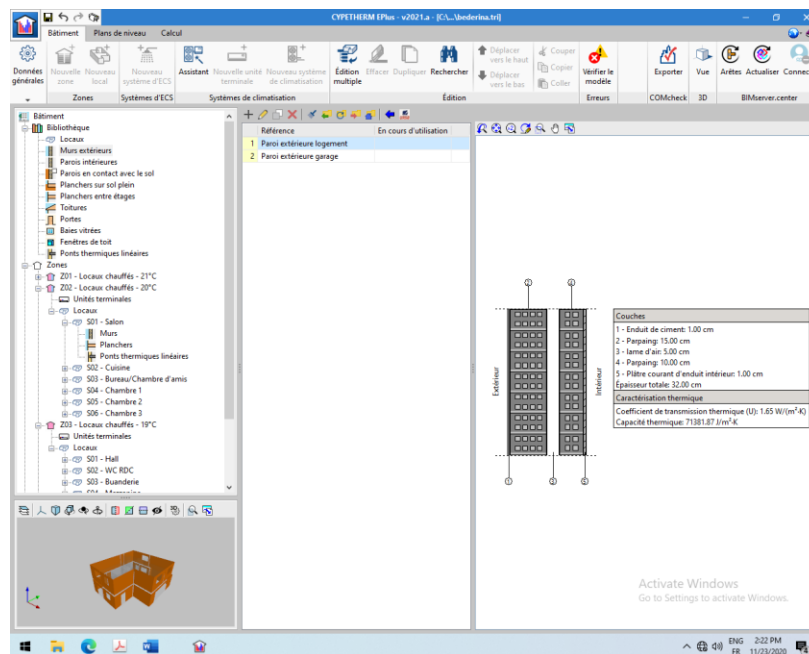


Figure 7 : bibliothèque

## Éléments constructifs

Les éléments constructifs peuvent être renseignés par couches de matériau ou de façon générique. Dans l'édition par couches, les couches sont renseignées de l'extérieur vers l'intérieur. Vous pouvez vous servir des flèches bleues pour modifier l'ordre des couches

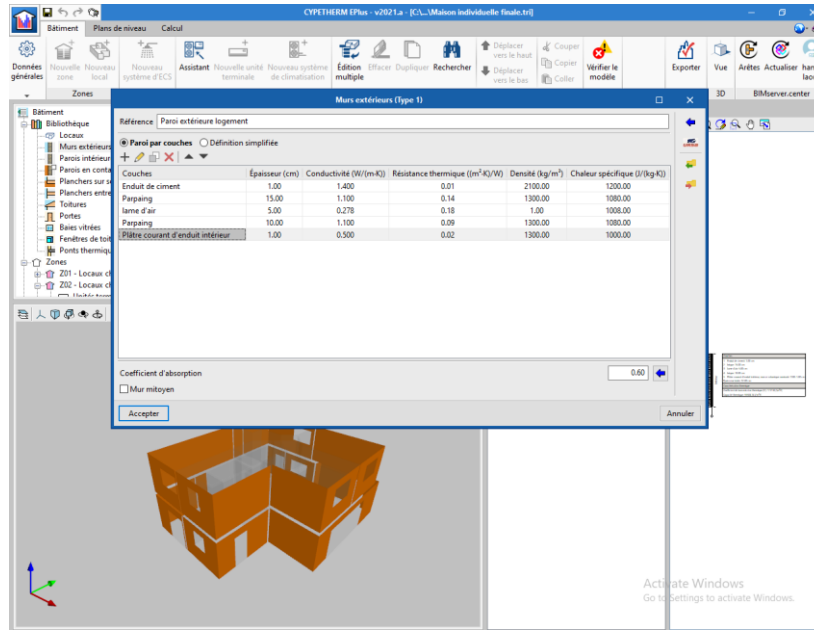


Figure 8 : Les éléments constructifs

### Récapitulatifs

Dans la partie supérieure de l'onglet 'Calcul', vous pouvez accéder aux fichiers de sortie du moteur de calcul et aux récapitulatifs.

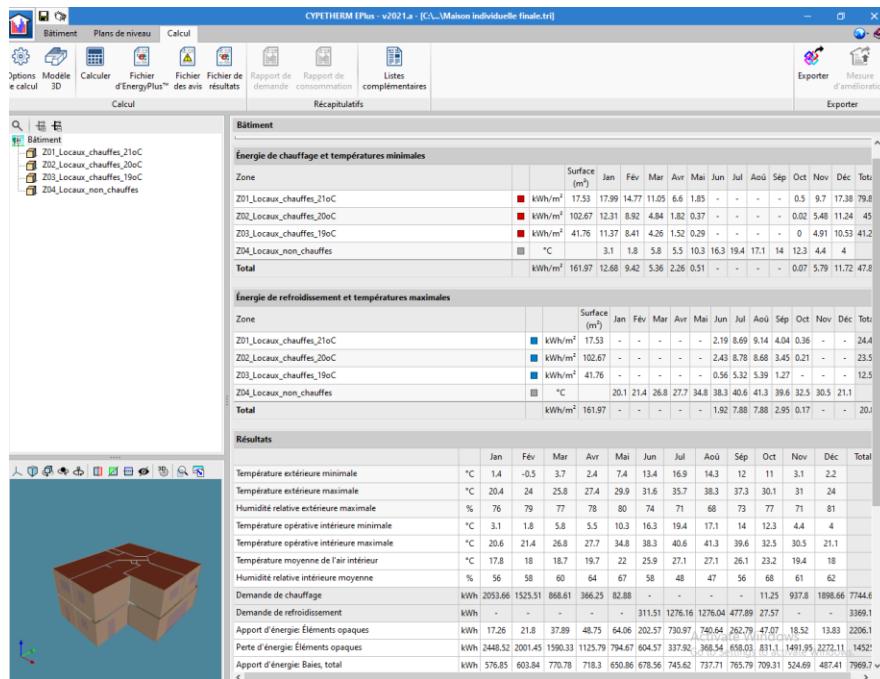


Figure 9 : bilan énergétique du bâtiment complet

### 3-Rapport de demande

#### -Bilan énergétique annuel du bâtiment.

Le graphique en barres suivant montre le bilan énergétique du bâtiment mois par mois, en comptabilisant l'énergie perdue ou gagnée par transmission thermique à travers des éléments lourds et légers ( $Q_{op}$  et  $Q_w$ , respectivement), l'énergie échangée par ventilation et infiltrations ( $Q_{ve+inf}$ ), l'apport de chaleur interne dû à l'occupation ( $Q_{occup}$ ), à l'éclairage ( $Q_{éclair}$ ) et à l'équipement interne ( $Q_{équip}$ ), ainsi que l'apport nécessaire de chauffage ( $Q_H$ ) et de refroidissement ( $Q_C$ ).

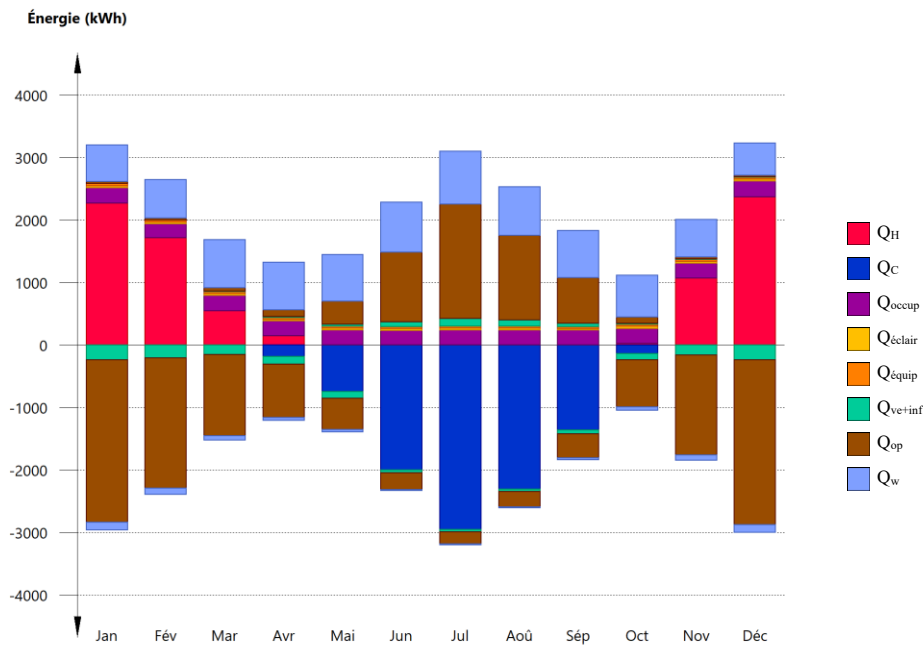


Figure 11 : bilan énergétique du bâtiment complet