



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



Université Amar Thelidji- Laghouat

FACULTÉ DE GENIE CIVIL ET D'ARCHITECTURE

DÉPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MÉMOIRE DE MASTER

Présenté par : Merad Rafika Imane et Takhi Kaouthar

DOMAINE : Sciences et Technologie

FILIERE : Génie Civil

OPTION : Matériaux en Génie Civil

Thème

**Amélioration du confort thermique dans les bâtiments par
utilisation des matériaux à changement de phase**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mme Bendjilali Khadra	MCA	Présidente
Mr Benabed Benchaa	MCA	Examineur
Mr Bouziani Tayeb	Pr	Rapporteur
Mr Kouidri Ahmed	MAA	Co-rapporteur

Promotion : Juin-2019

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Remerciements

Avant tout, nous remercions **ALLAH** tout puissant de toutes les richesses qu'il nous accorde et de la chance que nous avons de présenter ce modeste travail,

Nous remercions particulièrement notre encadreur le professeur **BOUZIANI Tayeb** de nous avoir guidées durant l'accomplissement de ce projet, ainsi que pour l'encadrement de qualité, l'aide, les conseils et la disponibilité dont il a toujours fait preuve.

Nous tenons à remercier aussi notre co-encadreur Mr. **KOUIDRI Ahmed** qui nous a encouragé pour mener à bien notre travail en mettant à notre disposition les moyens adéquats,

Nos remerciements vont aussi aux membres du jury Dr. **BENDJILALI Khadra** et Dr. **BENABED Benchaa** de la considération portée à l'égard du travail remis et d'avoir accepté de nous examiner en ce jour, en souhaitant bénéficier de leur expérience à travers leurs remarques,

Tous nos remerciements aussi à l'équipe du laboratoire du département « Génie Civil » pour leur coopération et les longues journées passées à nos côtés durant la période de nos essais,

Au personnel du laboratoire de Génie Mécanique de l'université, pour leur disponibilité,

A tous les professeurs ayant participé à l'accomplissement de notre formation au cours de notre cursus universitaire,

A Mr. **ATTIAT Aissa** agent technique chargé de nous guider dans nos recherches à la bibliothèque de la faculté de Génie Civil et d'Architecture en mettant à notre disposition tout ce qui est outils de travail : Livres, documents, thèses et mémoires,

Et à nos chers camarades de promotion, notamment **BENDJILALI Fatiha**, **BENBERTAL Amina** et **BENDJEDOU Abdeldjalil**, pour toute l'aide qu'ils nous ont apporté.

Merci infiniment.

Dédicaces

Dédicace

Je dédie ce mémoire

A mes très chers et tendres parents, aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que vous méritez, pour les sacrifices que vous n'avez cessé de me donner depuis ma naissance. Ce travail est le fruit des dévouements que vous avez déployés pour mon éducation, mon bien être et ma formation,

A mes très chères sœurs Zola, Sarah et mon cher frère Amine, ainsi que mes tendres grands-mères, pour leur amour, leurs encouragements, et leurs prières tout au long de mes études,

A ma très chère tante, son mari et leur adorables filles Meriem et Wissem, pour leur judicieux conseils qui ont su guider ma réflexion,

A mes adorées, Imane Merad, Feriel Dinar, Souhila Dahou, Fatiha Bendjilali, et Kaouthar Hamedini, pour leur soutien moral et toute l'aide qu'elles m'ont apporté pendant mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.

- Takhi Kaouthar -

Dédicace

Je dédie ce mémoire

A mes très chers parents, mes frères Rahim, Mustafa et Mohamed ainsi qu'à ma chère grand-mère, qui m'ont toujours soutenue et suivie, pour leur amour, leurs encouragements tout au long de mes études, et à toute ma famille.

A la mémoire de mon grand-père Lamri Hadj Mustapha et à celle de mon oncle Lamri Chadli, que dieu bénisse leurs âmes,

A mes chères amies, Kaouthar, Touha, Ferial, Mika, Souhila et ceux et celles qui ont partagé avec moi tous les moments d'émotions lors de la réalisation de ce travail.

Je leurs dédie tous, ce mémoire en guise de reconnaissance et remerciement

Merci d'être toujours là pour moi.

- Merad Rafika Imane -

Table des matières

Table des matières

ملخص	vii
Résumé	vii
Abstract.....	vii
Introduction générale	1
Chapitre I : Effet des matériaux sur le confort thermique des bâtiments	3
I.1 Introduction	3
I.2 Notions générales sur le confort thermique dans les bâtiments	3
I.3 Choix des matériaux de construction	4
I.4 Qualités et défauts thermiques des matériaux de construction	5
I.5 Propriétés thermo-physiques des matériaux.....	6
I.5.1 Conductivité thermique (λ)	6
I.5.2 Résistance thermique (R)	7
I.5.3 Chaleur spécifique (Cp)	9
I.5.4 Diffusivité thermique (a).....	9
I.5.5 Effusivité thermique (b)	9
I.5.6 Inertie thermique	10
I.6 Matériaux thermiquement isolants	11
I.7 Technique de chauffage par planchers et murs isolants	12
I.7.1 Plancher chauffant.....	12
I.7.2 Mur chauffant.....	13
I.8 Conclusion.....	15
Chapitre II : Matériaux à changement de phase (MCP)	15
II.1 Introduction.....	16
II.2 Historique des MCP	17
II.3 Principe de stockage de l'énergie thermique	18

II.3.1 Stockage thermique sensible.....	19
II.3.2 Stockage thermochimique.....	20
II.3.3 Stockage thermique latent.....	21
II.4 Classification des MCP.....	23
II.4.1 MCP organiques.....	24
II.4.2 MCP inorganiques	26
II.4.3 Eutectiques.....	28
II.5 Critères de choix d'un matériau à changement de phase.....	28
II.5.1 Propriétés thermiques.....	28
II.5.2 Propriétés physiques	29
II.5.3 Propriétés cinétiques	29
II.5.4 Propriétés chimiques.....	29
II.5.5 Aspects économiques.....	29
II.5.6 Critères technologiques.....	29
II.6 Applications des MCP dans le secteur du bâtiment.....	30
II.6.1 Incorporation directe.....	31
II.6.2 Immersion	31
II.6.3 Encapsulation.....	32
II.7 Conclusion	34
Chapitre III : Matériaux et méthodes.....	34
III.1 Introduction	35
III.2 Matériaux utilisés	35
III.2.1 Granulats.....	35
III.2.2 Ciment	36
III.2.3 Eau de gâchage	36
III.2.4 Plâtre.....	36
III.2.5 Paraffine.....	36

III.3	Caractéristiques des granulats utilisés	37
III.3.1	Masse volumique apparente	37
III.3.2	Masse volumique absolue.....	37
III.3.3	Capacité d'absorption d'eau	38
III.3.4	Equivalent de sable.....	39
III.3.5	Analyse granulométrique.....	41
III.4	Caractéristiques du ciment utilisé.....	45
III.4.1	Masse volumique	45
III.4.2	Consistance	46
III.5	Caractéristiques du plâtre utilisé.....	47
III.6	Caractéristiques de la paraffine utilisée	47
III.6.1	Préparation de la paraffine.....	47
III.6.2	Essai de point de fusion de la paraffine 58.....	48
III.6.3	Essai de température de fusion de la paraffine 27	49
III.7	Composition du béton.....	49
III.8	Résistance à 28 jours	49
III.9	Méthodes d'essais.....	50
III.9.1	Dispositif de mesure	50
III.9.2	Préparation des plaques	51
III.9.3	Protocole de l'essai.....	55
III.9.4	Mode de mesure.....	56
III.10	Conclusion	57
Chapitre IV : Résultats et interprétations.....		58
IV.1	Introduction	58
IV.2	Développement du modèle numérique.....	58
IV.3	Présentation des résultats.....	61
IV.3.1	Cas du plâtre.....	62

IV.3.2 Cas du plâtre avec paraffine 58	63
IV.3.3 Cas du plâtre avec paraffine 27	64
IV.3.4 Cas du béton	65
IV.3.5 Cas du béton avec paraffine 58	66
IV.3.6 Cas du béton avec paraffine 27	67
IV.4 Conclusion.....	69
Conclusion générale.....	70
Recommandations et perspectives	71
Références biographiques	72
Annexes.....	77

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I

Figure I. 1 : Valeurs de la conductivité thermique pour quelques matériaux [Liebard et De Herde, 2005].	7
Figure I. 2 : Résistances thermiques de quelques isolants pour une épaisseur de 15 cm [Benhouhou, 2012].	8
Figure I. 3: Réaction d'un local à inertie forte et d'un local à inertie faible en présence d'apports solaires [Liebard et De Herde, 2005].	10
Figure I. 4 : Évolution des températures sous toiture pour des structures isolantes différentes [Benhouhou, 2012].	11
Figure I. 5 : Différents matériaux isolants [Mazari. M, 2012].	12
Figure I. 6 : Exemple d'une installation d'un plancher chauffant [Le monde.fr, 2019].	13
Figure I. 7 : Exemple d'une installation d'un mur chauffant [Système D, 2019].	14

Chapitre II

Figure II. 1 : Principe de fonctionnement des matériaux à changement de phase [Guichard, 2013].	16
Figure II. 2 Différents systèmes de stockage de l'énergie [Jacquin et Bertrand, 2013].	18
Figure II. 3 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état [Akrouche, 2011].	22
Figure II. 4: Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température : (a) pour un corps pur (b) pour un mélange [Ahmad, 2004].	22
Figure II. 5 : Classification des matériaux à changement de phase [Guichard, 2013].	23
Figure II. 6 : Emplacement des MCP dans l'enveloppe du bâtiment [Yinping et al, 2006].	30
Figure II. 7 : Equivalence thermique de quelques parois d'épaisseurs différentes en fonction de leurs matériaux constitutifs [BASF, 2014].	31
Figure II. 8 : Exemple des MCP macro-encapsulés : (a) conditionnement en nodule, (b) en balle inoxydable, (c) en sac plastique et (d) en briquettes plastiques [Akrouche, 2011 ; Gharssallaoui et al, 2007].	32
Figure II. 9 : Exemple des MCP micro-encapsulés : (a) à l'état poudre et (b) à l'état liquide [BASF, 2014].	33
Figure II. 10 : Structure de microparticules : (a) Microsphère (b) microcapsule [Legrand, 33	

Chapitre III

Figure III. 1 : Granulats utilisés.....	35
Figure III. 2 : Ciment utilisé.....	36
Figure III. 3 : (a) Paraffine 27, (b) paraffine 58.....	36
Figure III. 4 : Essai de la masse volumique apparente.....	37
Figure III. 5 : Masse volumique absolue.....	38
Figure III. 6 : Essai d'absorption des granulats.....	39
Figure III. 7 : Essai d'équivalent de sable (visuel et à piston).....	40
Figure III. 8 : Série des tamis utilisée pour l'analyse granulométrique.....	42
Figure III. 9 : Série des tamis utilisée pour l'analyse granulométrique.....	43
Figure III. 10 : Série des tamis utilisée pour l'analyse granulométrique par tamisage à sec du sable alluvionnaire.....	44
Figure III. 11 : Courbe d'analyse granulométrique des granulats.....	45
Figure III. 12 : Essai de la masse volumique du ciment utilisé.....	46
Figure III. 13 : Préparation de la paraffine 27.....	48
Figure III. 14 : Mesure de la température de fusion de la paraffine 58°.....	48
Figure III. 15 : Dimensions (en cm) du dispositif en bois.....	50
Figure III. 16 : Dispositifs en bois utilisés pour l'essai.....	51
Figure III. 17 : Moule utilisé pour la confection des plaques de béton et de plâtre.....	51
Figure III. 18 : Préparation de l'échantillon avant la mise en place de la paraffine.....	52
Figure III. 19 : Préparation des plaques de béton avec la paraffine.....	53
Figure III. 20 : Préparation des plaques de plâtre avec la paraffine.....	54
Figure III. 21 : Etapes de préparation de l'essai.....	55
Figure III. 22 : Thermomètre infrarouge.....	56

Chapitre IV

Figure IV. 1 : Représentation graphique de la variation de $\ln\theta$ en fonction du temps.....	60
Figure IV. 2 : Schéma explicatif de différentes températures mesurées et calculées dans une plaque.....	61
Figure IV. 3 : Variations des températures initiales et finales mesurées et calculées (T_{i-mes} , T_{i-cal} , T_{f-mes} et T_{f-cal}) d'une plaque fabriquée en plâtre.....	63
Figure IV. 4 : Variations des températures initiales et finales mesurées et calculées (T_{i-mes} , T_{i-cal} , T_{f-mes} et T_{f-cal}) et des températures intermédiaires calculées (T_{1-cal} et T_{2-cal}) d'une plaque fabriquée en plâtre et la paraffine 58.....	64

Figure IV. 5 : Variations des températures initiales et finales mesurées et calculées ($T_{i\text{-mes}}$, $T_{i\text{-cal}}$, $T_{f\text{-mes}}$ et $T_{f\text{-cal}}$) et des températures intermédiaires calculées ($T_{1\text{-cal}}$ et $T_{2\text{-cal}}$) d'une plaque fabriquée en plâtre et la paraffine 27.	65
Figure IV. 6 : Variations des températures initiales et finales mesurées et calculées ($T_{i\text{-mes}}$, $T_{i\text{-cal}}$, $T_{f\text{-mes}}$ et $T_{f\text{-cal}}$) d'une plaque fabriquée en béton.	66
Figure IV. 7 : Variations des températures initiales et finales mesurées et calculées ($T_{i\text{-mes}}$, $T_{i\text{-cal}}$, $T_{f\text{-mes}}$ et $T_{f\text{-cal}}$) et des températures intermédiaires calculées ($T_{1\text{-cal}}$ et $T_{2\text{-cal}}$) d'une plaque fabriquée en béton et la paraffine 58.	67
Figure IV. 8 : Variations des températures initiales et finales mesurées et calculées ($T_{i\text{-mes}}$, $T_{i\text{-cal}}$, $T_{f\text{-mes}}$ et $T_{f\text{-cal}}$) et des températures intermédiaires calculées ($T_{1\text{-cal}}$ et $T_{2\text{-cal}}$) d'une plaque fabriquée en béton et la paraffine 27.	68

Liste des tableaux

Liste des Tableaux

Chapitre II

Tableau II. 1 Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C [Dinçer et Rosen, 2002].	20
D'après [Sharma et al, 2009], les plus prometteuses sont résumées dans le Tableau II. 2 :	24
Tableau II. 2 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques paraffines.	24
Tableau II. 3 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques non-paraffines.	25
Tableau II. 4 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques acides gras.	26
Tableau II. 5 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques sels hydratés.	27
Tableau II. 6 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques matériaux métalliques.	27
Tableau II. 7 : Liste de quelques eutectiques [Hasnain ,1998].	28

Chapitre III

Tableau III. 1 : Masses volumiques apparentes des granulats utilisés.	37
Tableau III. 2 : Masses volumiques absolues des granulats utilisés.	38
Tableau III. 3 : Coefficients d'absorption des granulats utilisés.	39
Tableau III. 4 : Résultats d'équivalent de sable.	40
Tableau III. 5 : Préconisations en matière de propreté pour les sables [Festa, Dreux].	40
Tableau III. 6 : Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 3/8.	42
Tableau III. 7 : Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 8/15	43
Tableau III. 8 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable alluvionnaire.	44
Tableau III. 9 : Masse volumiques du ciment utilisé.	46
Tableau III. 10 : Consistance du ciment utilisé.	47
Tableau III. 11 : Caractéristiques du plâtre utilisé.	47
Tableau III. 12 : Caractéristiques de la paraffine 58.	48
Tableau III. 13 : Caractéristiques de la paraffine 27 [Aadmi et al, 2013].	49
Tableau III. 14 : Ecrasement à 28 jours des éprouvettes de béton.	50
Tableau III. 15 : Ecrasement à 28 jours des éprouvettes de plâtre.	50

Chapitre IV

Tableau IV. 1: Propriétés physiques et thermiques des matériaux utilisés dans le modèle [Passive Act, 2019 ; Wikipedia, 2019 ; Aadmi et al, 2013].....	62
Tableau IV. 2: Paramètres du modèle (pente, coefficient global de perte de chaleur).....	62

Nomenclature

Nomenclature

Acronymes

MCP : Matériau à Changement de Phase.
Cv : Capacité thermique volumique.
Cs : Chaleur spécifique du corps à l'état solide.
Cl : Chaleur spécifique du corps à l'état liquide.
Cw : Capacité thermique du mur.
M_f : Module de finesse du sable.
A_{abs} (%) : Coefficient d'absorption.
UA : Coefficient de perte de chaleur.

Symboles

T : Température [°C] ; [K].
t : Temps [s]
λ : Conductivité thermique [W/m.°C] ; [W/m.K].
Cp : Chaleur spécifique massique [J.kg⁻¹. K⁻¹].
R : Résistance thermique [m².k/w].
a : Diffusivité thermique [m²/s].
b : Effusivité thermique [J K⁻¹ m⁻² s^{-1/2}].
d : Epaisseur de l'isolant [cm].
ΔT : Différence de température [°C].
Θ_i : Différence de température [°C].
Cv : Capacité thermique volumique [J m⁻³ K⁻¹].
Q : Quantité de chaleur [J].
L : Chaleur latente de fusion [J].
C : Capacité calorifique [J/K].
Δh_f : L'enthalpie spécifique de fusion [Kj/mol].
ρ : Masse volumique [kg/m³] ; [g/cm³].
T_F : Température de fusion [°C].
T_i : Température initiale [°C].
T_f : Température finale [°C].
ρ_{app} : Masse volumique apparente [g/cm³].
R₂₈ : Résistance à la compression à 28 jours [Mpa].
D_{max} : Diamètre maximal des granulats [mm].
ρ_{abs} : Masse volumique absolue [g/cm³].
T_F : Température de fusion [°C].
T_{i-cal} : Température initial calculée [°C].
T_{f-cal} : Température finale calculée [°C].
T_{i-m} : Température initial mesurée [°C].
T_{f-m} : Température finale mesurée [°C].
T_c : Température du confort utilisé dans le modèle [°C].

Résumés

ملخص

نقدم في هذا العمل، دراسة تسمح باستخدام مواد جديدة ليس فقط لتنظيم التبادل الحراري في الأجزاء المختلفة من المبنى، ولكن أيضًا لتقليل أو حتى تجنب استخدام أنظمة التدفئة والتبريد التقليدية. قمنا باستعمال نوعين من مادة البارافين (27 و58) في طبقات من الجبس والخرسانة، وذلك بغية استعمالها في الارضيات والحيطان الساخنة. قمنا أيضا باقتراح نمذجة للسلوك الحراري للطبقات المحضرة، بالإعتماد على الخصائص الحرارية والفيزيائية للمواد المستعملة. تشير النتائج المقدمة الى الأثر الإيجابي لاستعمال البارافين في تحسين السلوك الحراري للطبقات المحضرة (الجبس والخرسانة)، من ناحية تخزين الطاقة والراحة الحرارية. النماذج المقترحة تعتبر جيدة ومقبولة بالمقارنة مع النتائج المخبرية، حيث تسمح بتقدير درجات الحرارة في السطوح الخارجية للطبقات، وأيضاً تلك للسطوح البينية.

الكلمات المفتاحية: خرسانة؛ جبس؛ الراحة الحرارية؛ بارافين؛ مواد تغيير الطور؛ تخزين الطاقة؛ النمذجة.

Résumé

Nous présentons dans ce travail, une étude qui consiste à employer de nouveaux matériaux permettant non seulement de réguler les échanges thermiques dans les différentes parties du bâtiment, mais aussi de réduire voire éviter le recours aux systèmes conventionnels de chauffage et de climatisation. Nous avons intégré deux types de paraffine (27 et 58) dans des plaques en plâtre et béton, en vue de proposer leur utilisation dans des planchers et murs chauffants. Une modélisation du comportement thermique des plaques préparées a été aussi réalisée, en fonction des paramètres thermo-physiques de différents matériaux utilisés. Les résultats trouvés, montre l'effet positif de la paraffine dans l'amélioration du comportement thermique des plaques préparées (plâtre et béton), en matière d'emmagasinement d'énergie et confort thermique. Le modèle trouvé a montré un bon accord avec les essais expérimentaux et a permis d'avoir une estimation des températures des surfaces de plaques ainsi de celles des surfaces intermédiaires.

Mots clés : Béton ; plâtre ; confort thermique ; paraffine ; matériaux à changement de phase ; emmagasinement d'énergie ; modélisation.

Abstract

This work presents a study that shows the use of new materials does not only allow the regulation of thermic exchange in the different parts of the building, but also the reduction or even more the avoidance of using conventional heating and cooling systems. Two types of paraffin have been integrated (27 & 58) in concrete and plaster plates in order to use them in heated floors and walls applications. A modeling of the thermal behavior of the prepared plates was applied, respecting the thermal and physical parameters of the different incorporated materials. The outcome explained the positive effect of paraffin in the improvement of the earlier behavior of the prepared plates (plaster and concrete), considering the storage energy and the thermal comfort. The model found has shown a good agreement with the experiments and allowed to estimate the temperature of the plate surfaces as well as the intermediate surfaces.

Key words: Concrete, plaster, thermic comfort, phase change material, storage energy, modeling

Introduction générale

Le confort thermique et la réduction de la consommation d'énergie dans le secteur du bâtiment sont des soucis majeurs de nos jours. L'amélioration de ces facteurs est donc le but que se fixent les ingénieurs en génie civil. Un des moyens possibles d'atteindre ces objectifs est l'utilisation d'une technique innovante, en se basant sur la propriété des matériaux de stocker de l'énergie thermique au moment de la faible demande, et la restituer lors des pics de consommation.

Le matériau à changement de phase (MCP) possède cette propriété, et représente une alternative durable pour réduire la consommation énergétique et par conséquent améliorer le confort thermique des occupants. L'incorporation des MCP à température de changement de phase proche à celle du confort, pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments a suscité l'intérêt particulier de nombreux scientifiques, car il permet de stocker et de libérer de grandes quantités d'énergie sous forme de chaleur lors du processus de fusion et de solidification du matériau. Dans les pays développés, les MCP ont pris beaucoup d'intérêt et ont été très avancés que se soit sur le plan technique ou sur le plan recherche (du nano-matériau aux granulats et plaques). L'un des matériaux les plus utilisés est la paraffine, qui a été choisie dans notre cas comme MCP, pour sa disponibilité en Algérie, utilisée généralement comme produit de base dans la production cosmétique et sa température de fusion proche à la température du confort.

Dans ce travail, nous avons choisi d'intégrer une paraffine dans des plaques de plâtre et de béton, afin d'améliorer le comportement thermique des planchers et murs chauffants qui représentent actuellement une nouvelle technique de chauffage. A cet effet, deux types de paraffine ont été incorporés dans des plaques de béton et de plâtre : la première dont la température de fusion est de l'ordre de 58°C et la seconde paraffine dont la température de fusion est de l'ordre de 27°C

L'objectif de cette étude est de connaître l'effet de chaque paraffine (incorporée dans des plaques de plâtre ou béton) sur le confort thermique, en effectuant en premier lieu une série de mesures des températures dans les deux faces des plaques, afin de suivre l'évolution des températures en fonction du temps, et en deuxième lieu développer un modèle sur la base des propriétés physico-thermiques de ces matériaux (telles que : Capacité thermique massique, conductivité thermique, masse volumique).

Introduction générale

Pour la réalisation de notre travail, nous avons organisé le présent manuscrit en quatre chapitres :

- Le premier chapitre est consacré à l'effet des matériaux des constructions sur le confort thermique. Nous nous intéressons aux notions du confort thermique et aux critères de choix des matériaux de construction en fonction de ce dernier, ainsi leurs propriétés physico-thermiques. Nous présentons aussi les systèmes de chauffage par planchers et murs chauffants et leur fonctionnement.
- Le deuxième chapitre concerne l'état de l'art sur les MCP, nous allons essayer d'explicitier dans ce chapitre le principe de stockage d'énergie, la classification et les critères de sélection des MCP et enfin leurs différentes applications.
- Le troisième chapitre décrit les caractéristiques des matériaux de base et les méthodes expérimentales utilisées durant cette étude.
- Le quatrième chapitre présente les résultats et leurs interprétations. Nous avons présenté et développé en premier lieu le modèle utilisé dans notre étude pour comprendre l'évolution de la température en fonction des paramètres physico-thermiques des matériaux utilisés y compris les MCP.

Enfinement on complète notre travail par une conclusion générale qui résume les principaux résultats concernant l'effet de l'utilisation des MCP de type paraffine dans des plaques en béton et plâtre, avant de terminer par des recommandations et des perspectives.

Chapitre I

Effet des matériaux sur
le confort thermique
des bâtiments

I.1 Introduction

Aujourd'hui, 50 % de la population mondiale vit dans des villes et passe près de 90 % de son temps à l'intérieur des bâtiments [Thellier et al, 2012]. Les bâtiments deviennent de vraies machines thermiques dont l'objectif est le maintien des conditions climatiques favorables à l'être humain. L'individu réagit en permanence à cet environnement de manière consciente et inconsciente. C'est grâce à la définition des propriétés physiques des matériaux utilisés dans la construction, et de leur effet, que l'on peut approcher une définition du confort thermique.

Le présent chapitre traitera des différentes propriétés thermo-physiques des matériaux de construction, parmi lesquels on peut citer la chaleur spécifique, conductivité, capacité de stockage d'énergie... etc., et de leurs effets sur le confort thermique des bâtiments. Nous présentons aussi dans ce chapitre la technique de chauffage par planchers et murs isolants et son principe de fonctionnement.

I.2 Notions générales sur le confort thermique dans les bâtiments

La notion du confort n'a pas cessé d'évoluer à travers les temps, en suivant l'évolution de l'humanité et les exigences de l'homme. Aujourd'hui le confort thermique peut être défini comme une sensation complexe produite par un système de facteurs physiques, physiologiques et psychologiques conduisant l'individu à exprimer le bien être de son état. Plusieurs recherches ont été élaborées dans ce sens pour définir la notion du confort thermique.

La notion de confort thermique, désigne l'ensemble des multiples interactions entre l'occupant et son environnement où l'individu est considéré comme un élément du système thermique [Cantin et al, 2005]. Avant de citer les différentes définitions du confort thermique, nous devons tout d'abord présenter les premiers principes de l'architecture soucieuse du confort de ses occupants. Vitruve dans son célèbre traité « De architectura » [Vitruve, 2004] : « s'agit-il de construire une ville ? La première chose à faire est de choisir un endroit sain. Il doit être élevé, à l'abri des brouillards et du givre, situé sous la douce température d'un ciel pur, sans avoir à souffrir ni d'une trop grande chaleur ni d'un trop grand froid ».

Nous remarquons à travers la définition de Vitruve que, la notion de confort thermique a été toujours parmi les principales exigences et préoccupations des ingénieurs de construction,

et il définit le confort par l'absence d'inconfort ; c'est-à-dire que si l'utilisateur ne souffre ni d'une trop grande chaleur ni d'un trop grand froid, il est dans une ambiance confortable.

Selon la réglementation, le confort thermique est défini par : état d'esprit qui exprime la satisfaction quant à l'ambiance thermique. Givoni, [2009] définit le confort comme : « les conditions sous lesquelles les mécanismes autorégulateurs du corps sont dans un état d'activité minimum ». Une ambiance confortable est une ambiance pour laquelle l'organisme humain peut maintenir constante sa température corporelle (Homéothermie) sans mettre en jeu d'une manière perceptible (donc désagréable) ses mécanismes instinctifs thermorégulateurs de lutte contre le chaud ou le froid [Mansouri, 2003].

La définition la plus classique du confort thermique n'est autre qu'une absence d'inconfort : toute déviation par rapport à l'absence de sensation, au moment où l'on oublie les conditions ambiantes, est un élément d'inconfort. Le confort n'est pas déterminé par les paramètres physiques de l'ambiance mais par la réaction du corps aux conditions ambiantes, l'inconfort étant la conséquence de l'effort fourni pour résister à ces dernières. Donc, les paramètres essentiels qui expriment le confort thermique global ne sont pas relatifs à l'ambiance mais à l'organisme [Mansouri, 2003].

Le confort thermique des constructions est l'ensemble des conditions optimales nécessaires au développement de la vie physiologique de l'homme à l'intérieur des différentes pièces d'habitat et en fonction de la destination des locaux [Merzg, 2010].

I.3 Choix des matériaux de construction

L'objectif du choix du type de matériaux est d'améliorer les performances d'une construction jusqu'à ce que le niveau du besoin de chauffage soit suffisamment bas pour que l'ambiance puisse maintenir une situation permanente de confort sans réseau de chauffage ou de refroidissement, mais sans aller inutilement à une consommation excessive d'énergie. Le prix de construction sera ainsi optimisé et le confort s'installe par conséquent dans le bâtiment. [Passiv act, 2019].

La connaissance des isolants, les raisons pour isoler un bâtiment, les différentes méthodes d'isolation, le fait que l'isolation protège aussi de la chaleur en association avec l'inertie thermique permettent de comprendre la manière pour améliorer d'avantage le confort thermique dans un bâtiment. L'objectif essentiel est de limiter la consommation énergétique en optimisant le prix de construction avec, pour principal corollaire, un confort

maximum tout au long de l'année. Ce confort peut être amélioré, en choisissant un isolant extérieur certes sans pont thermique, mais, de plus, à forte inertie de transmission, et des matériaux intérieurs à forte inertie d'absorption. [Passiv act, 2019].

Pour être en mesure de juger de leur utilité réelle d'un point de vue thermique, il n'y a pas d'autre solution que de connaître les caractéristiques physiques qui influencent principalement leur qualité thermo-physique :

- La capacité d'un matériau à conduire la chaleur, sa conductivité, est caractérisée par le coefficient de conductivité λ (Lambda). Mesuré en laboratoire, il doit être certifié par des organismes indépendants.
- La masse volumique ρ et de la chaleur spécifique massique C_p .

La connaissance des qualités thermo-physiques d'un matériau ne peut résulter que de la comparaison de ses caractéristiques avec celles de matériaux déjà connus pour leur efficacité dans un domaine particulier.

Les matériaux les plus efficaces sont le polyuréthane pour sa conductivité, la fibre de bois pour son inertie thermique par transmission et le béton pour l'inertie thermique par absorption. Les points de comparaison sont fournis par la suite dans le titre « Qualités thermiques comparées des matériaux ». [Passiv act, 2019].

I.4 Qualités et défauts thermiques des matériaux de construction

Le béton est probablement le matériau de maçonnerie le plus couramment utilisé en construction. Armé d'acier, il peut être 100 fois plus conducteur que les meilleurs isolants. Un tel écart de conductivité signifie que, du seul point de vue des déperditions par transmission, un seul petit centimètre des meilleurs isolants est aussi efficace qu'un mètre de béton armé.

Sa diffusivité, qui caractérise la vitesse de transfert de la chaleur, est six à sept fois plus forte que celle des isolants à base de bois, mais à peine légèrement plus faible que celle du polystyrène expansé ou de certaines laines de verre. [Passiv act, 2019]

La connaissance de la conductivité et de la diffusivité du béton permet de confirmer que les possibilités de transmission des flux de chaleur et leur vitesse de transfert sont suffisamment élevées pour limiter considérablement l'intérêt thermique de son usage à

l'extérieur, en contact direct avec le climat, pour son défaut d'isolation et son manque d'inertie par transmission. [Passiv act, 2019].

Il est toutefois important de souligner que les épaisseurs d'isolant nécessaires aux maisons passives, parfois 30cm ou plus en façade, diminue l'intérêt du déphasage qui pourra être suffisant même avec les matériaux les moins performants de ce point de vue. [Passiv act, 2019].

Tous les isolants ont par contre une effusivité largement inférieure à celles des matériaux de structure maçonnés. Elle est de 17 à 50 fois plus faible que celle du béton. La fibre de bois est seulement trois fois plus effusive que le polystyrène. La connaissance de cette caractéristique des isolants permet de confirmer que leurs possibilités d'absorber les variations de température intérieures, et de les répartir dans leur masse, pour les stabiliser, sont tellement faibles que leur usage à l'intérieur devrait être proscrit. [Passiv act, 2019]

I.5 Propriétés thermo-physiques des matériaux

La détermination des propriétés thermo-physiques usuelles telle que la conductivité et la diffusivité thermique contribue à une meilleure connaissance du comportement thermique et des caractéristiques techniques des matériaux utilisés dans un grand nombre de domaines à savoir, domaine de génie civil, construction et isolation, industriel, agriculture, et aussi dans le domaine de poterie, pharmaceutique... etc.

I.5.1 Conductivité thermique (λ)

La conductivité thermique (λ) est le flux de chaleur, traversant un matériau d'un mètre d'épaisseur pour une différence de température de 1 degré entre les deux faces. Elle s'exprime en watts par mètre et par degré Celsius ($W/m.^{\circ}C$). Cette valeur permet de quantifier le pouvoir isolant de chaque matériau. Plus elle est faible, plus le matériau sera isolant [Merzeg, 2010].

La conductivité thermique est l'une des propriétés thermo-physiques la plus recherchée, elle mesure donc la faculté qu'a la chaleur de traverser plus ou moins aisément un corps en régime permanent. Elle dépend de la nature du corps, de la quantité et de la qualité des pores, du degré d'humidité et de la température.

Les facteurs influençant la conductivité thermique d'un matériau sont :

- Son poids volumique ;
- Sa teneur en eau ;
- La taille de ses pores d'air ;

- La nature du solide.

	sec	hum.		Conductivité thermique λ des matériaux en W/m.K
Matériaux isolants	0,028		polyuréthane	
	0,040		laine minérale, liège	
	0,058		vermiculite	
	0,065		perlite	
Bois et dérivés	0,17	0,19	feuillus durs	
	0,12	0,13	résineux	
Maçonneries	0,27	0,41	briques 700-1 000 kg/m ³	
	0,54	0,75	briques 1 000-1 600 kg/m ³	
	0,90	1,1	briques 1 600-2 100 kg/m ³	
Verre	1,0	1,0		
Béton armé	1,7	2,2		
Pierres naturelles	1,40	1,69	tuft, pierre tendre	
	2,91	3,49	granit, marbres	
Métaux		45	acier	
		203	aluminium	
		384	cuivre	

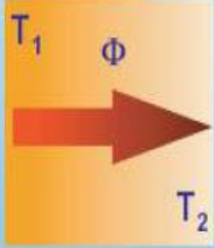


Figure I. 1 : Valeurs de la conductivité thermique pour quelques matériaux [Liebard et De Herde, 2005].

La présence d'eau à l'intérieur du matériau influence sa conductivité thermique. La porosité intrinsèque des matériaux, conjuguée à leur exposition à l'eau, peut faire varier sensiblement leur conductivité thermique. La Figure I. 1 indique, pour quelques matériaux du bâtiment, les valeurs λ en condition sèche et en condition humide. Celle des matériaux isolants n'est donnée qu'en condition sèche car il est déconseillé de les utiliser là où ils pourraient s'humidifier (condensation, vapeur d'eau, ... etc.). Leur performance isolante décroîtrait alors très sensiblement. Les métaux, matériaux non poreux, ont une conductivité thermique constante.

I.5.2 Résistance thermique (R)

La résistance thermique (R) est l'inverse de la conductivité thermique (d/λ) du matériau. La conductivité et la résistivité sont toutes les deux indépendantes de la dimension et de l'épaisseur du matériau.

Le flux instantané de chaleur qui traverse un élément de construction donné ne dépend pas seulement de la conductivité thermique du matériau, mais aussi de l'épaisseur (d) de l'élément.

Ainsi la résistance thermique de l'élément est définie par [Liebard et De Herde, 2005] :

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (I.1)$$

R = résistance thermique ($m^2.K/W$)

d = épaisseur de l'isolant (m)

λ = conductivité thermique ($W/m.K$)

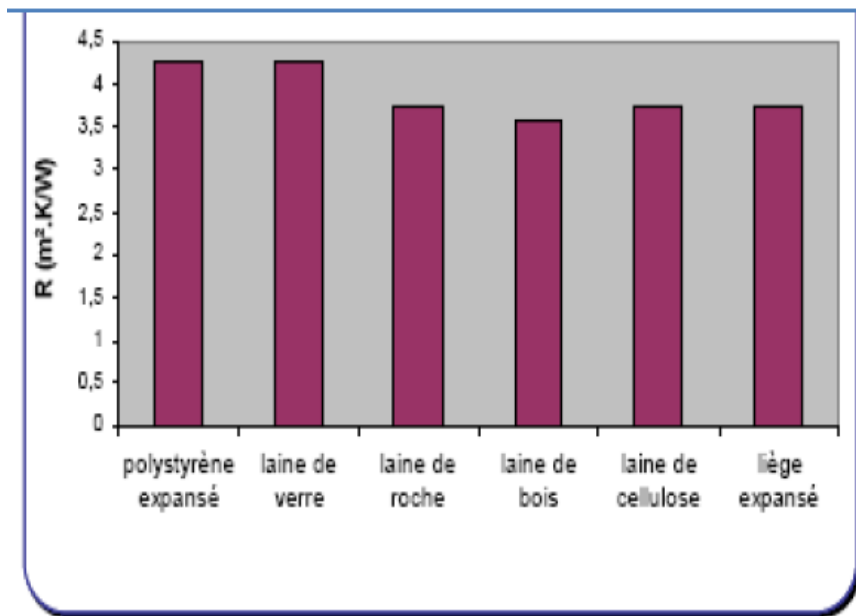


Figure I. 2 : Résistances thermiques de quelques isolants pour une épaisseur de 15 cm [Benhouhou, 2012].

De la même manière, la conductance thermique (c) de l'élément est donnée par :

$$C = \frac{x}{d} \quad (I.2)$$

Le flux de chaleur en régime permanent qui traverse un élément de mur de surface (A), d'épaisseur (d), constitué par un matériau ayant une conductivité thermique donnée (λ) et soumis à un gradient de température ($T1 - T2$) peut être exprimé de la formule :

$$Q = A \frac{\lambda}{d} (T1 - T2) \quad (I.3)$$

Où Q est le flux de chaleur résultant après passage de la surface chaude vers la surface froide.

I.5.3 Chaleur spécifique (Cp)

La chaleur spécifique massique (Cp) d'un corps correspond à la quantité de chaleur dont il a besoin pour que la température d'une unité de masse s'élève d'un degré. Ceci met en évidence l'importance de la chaleur massique pour tous les calculs de stockage de chaleur ou de transport de chaleur. D'autre part, la chaleur massique intervenant dans la diffusivité thermique, sa mesure est souvent nécessaire.

$$C_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (I.4)$$

Où : Q : quantité de chaleur J ;

m : masse du corps ;

ΔT : différence de température °C.

I.5.4 Diffusivité thermique (a)

La diffusivité thermique exprime la capacité d'un matériau à transmettre (rapidement) une variation de température. C'est la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Elle s'exprime en m²/h. Plus la valeur de diffusivité thermique est faible, plus le front de chaleur mettra du temps à traverser l'épaisseur du matériau, et donc, plus le temps entre le moment où la chaleur parvient sur une face d'un mur et le moment où elle atteindra l'autre face est important. On parle également de déphasage. (Un déphasage de 10 à 12 h permet d'atténuer les différences de température entre le jour et la nuit). La diffusivité thermique est le rapport de la conductivité d'un corps à sa capacité thermique.

Où :

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad (I.5)$$

a : diffusivité thermique en m²/s ;

λ : conductivité thermique en W/m °C ;

ρ : masse volumique en kg/m³ ;

Cp : chaleur spécifique en kJ/kg °C.

I.5.5 Effusivité thermique (b)

L'effusivité thermique (b) des matériaux, parfois dénommée « chaleur subjective », représente la rapidité avec laquelle la température superficielle d'un matériau se réchauffe.

Plus le coefficient d'effusivité thermique est bas, plus le matériau se réchauffe vite. L'effusivité caractérise la capacité des matériaux à réagir plus ou moins rapidement à un apport de chaleur intérieur au logement, que cet apport soit le fait d'une source interne ou du rayonnement solaire. Plus l'effusivité est grande, plus la chaleur interne à la pièce sera absorbée rapidement par le mur, et donc, plus l'élévation de température dans le local sera limitée. On privilégiera les matériaux ayant une grande effusivité. Elle est donnée par la formule suivante et s'exprime en $W.s^{0,5}/m^2. ^\circ C$ [Izard, 1993].

$$E = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot Cp^2} \quad (I.6)$$

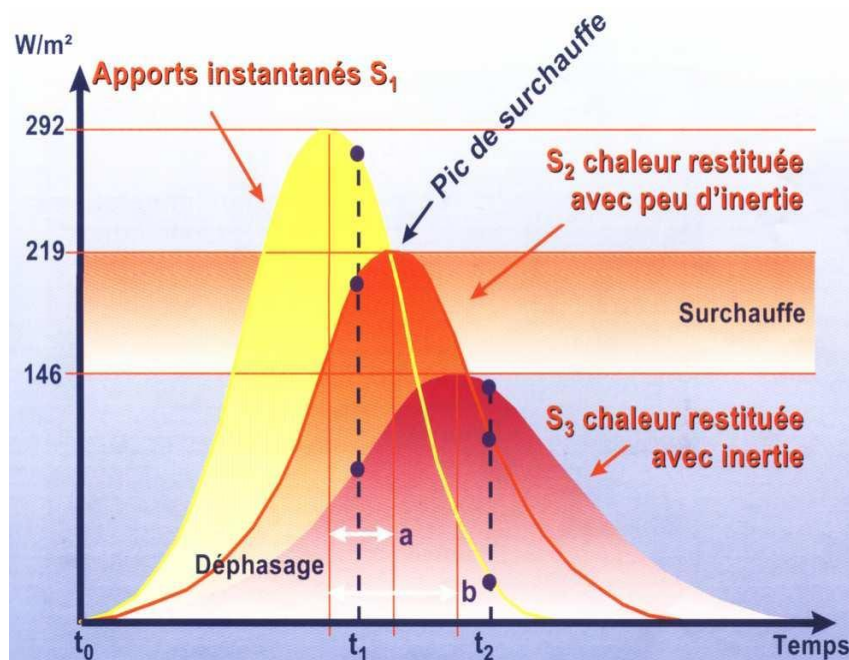


Figure I. 3: Réaction d'un local à inertie forte et d'un local à inertie faible en présence d'apports solaires [Liebard et De Herde, 2005].

Cette capacité ne signifie pas que la température du mur s'élève rapidement, puisqu'une grande effusivité implique une valeur élevée de la capacité thermique, ce qui garantit de faibles variations de température de paroi et une grosse quantité d'énergie stockée.

I.5.6 Inertie thermique

C'est la propriété d'un matériau lui permettant de stocker l'énergie dans la masse du bâtiment et d'amortir les variations de température [Salomon et Bedel 2004]. Elle est caractérisée par la capacité thermique. Ce comportement des matériaux est un principe

fondamental pour la conception bioclimatique des bâtiments. Elle contribue au confort thermique de l'habitation en atténuant les variations de pointes de températures. En hiver, une forte inertie thermique permet d'emmagasiner la chaleur de la journée due aux apports solaires puis de la restituer plus tard dans la journée lorsque la température extérieure commence à chuter. En été, une forte inertie thermique liée à une ventilation nocturne permet d'atténuer les surchauffes durant la journée.

Associée à l'isolation thermique des bâtiments, l'inertie thermique est un critère majeur du confort hygrométrique, car, à eux deux, elles favorisent à la fois le bien-être des personnes et les économies d'énergie grâce aux matériaux qui emmagasinent et restituent petit à petit chaleur ou fraîcheur, permettant un réchauffement ou un refroidissement progressif.

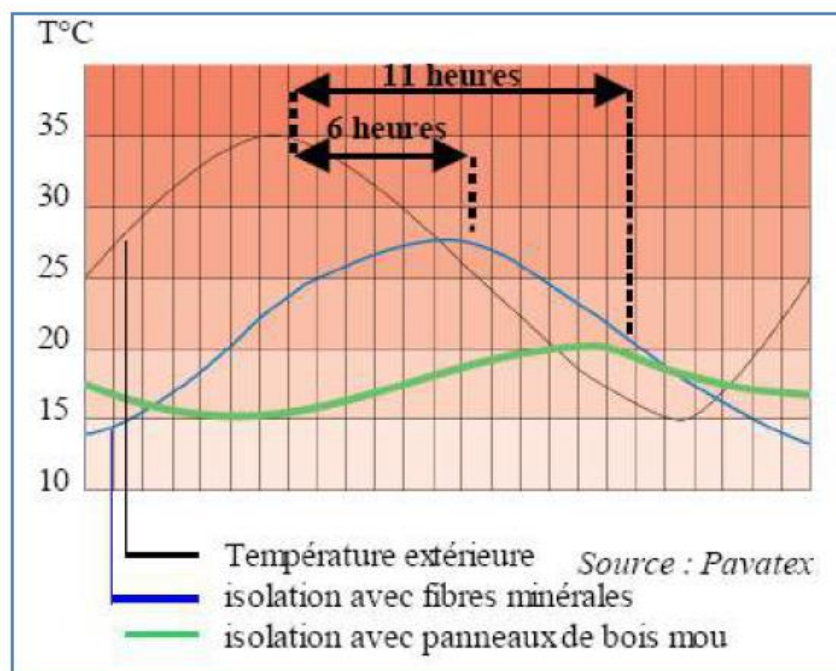


Figure I. 4 : Évolution des températures sous toiture pour des structures isolantes différentes [Benhouhou, 2012].

I.6 Matériaux thermiquement isolants

Les isolants sont, le plus souvent, constitués d'une carcasse solide emprisonnant des cellules d'air (l'air immobile étant l'un des meilleurs isolants).

Outre la faible conductivité, d'autres qualités sont à rechercher dans un isolant comme la résistance mécanique, la neutralité vis-à-vis des matériaux qui l'entourent, l'inflammabilité et la résistance aux attaques des rongeurs [Belkowsky, 1978]. De nombreux produits isolants existent aujourd'hui, aussi bien au niveau de leur composant (laines minérales ; laines végétales ; isolants minces ; ...) que de leur conditionnement (vrac, panneaux, rouleaux...) et de leur épaisseur. Comme le montre la Figure I.5 [Langlais et Klarsfeld, 1997].



Figure I. 5 : Différents matériaux isolants [Mazari. M, 2012].

On distingue plusieurs types d'isolants, présents sur le marché sous différentes formes :

- Matériaux minéraux : la laine de verre, la laine de roche,
- Matériaux fibreux organiques : chanvre, cellulose, mousse organique (le polystyrène expansé ou extrudé).
- Mousse inorganique : mousse de verre, vermiculite la perlite, béton cellulaire,
- Matériaux ligneux : liège, bois léger, paille agglomérée,
- Matériaux à changement de phase.

I.7 Technique de chauffage par planchers et murs isolants

Afin de compenser les pertes de chaleur d'une ou plusieurs pièces dans un bâtiment, On utilise la masse du plancher ou/et d'un mur comme corps de chauffe, on peut l'utiliser aussi comme rafraîchissant dans certaines conditions.

I.7.1 Plancher chauffant

C'est un système confortable, aussi appelé plancher radiant, le système de plancher chauffant est considéré comme l'une des options de chauffage la plus efficace pour assurer un confort thermique maximal dans un logement. En plus, étant parfaitement intégré au bâti, il permet une grande liberté d'aménagement des pièces. Une solution discrète et efficace par excellence. [Gaz métr la vie en bleu, 2019] ; (voir l'exemple dans la Figure I. 6).



Figure I. 6 : Exemple d'une installation d'un plancher chauffant [Le monde.fr, 2019].

Le plancher chauffant est composé d'un réseau de tuyaux flexibles, intégrés au plancher et alimentés en eau chaude. La chaleur du plancher est transmise doucement par rayonnement aux éléments exposés dans la pièce (personnes et objets), plutôt que d'être diffusée à l'air ambiant, sans créer de mouvement d'air. À noter que pour fonctionner de manière optimale, le système entier, composé d'un générateur de chaleur et du plancher, doit être soigneusement conçu et installé. Aussi, il est fortement conseillé d'obtenir un devis spécifique d'installation de la part du fabricant ou de son distributeur pour assurer une installation optimisée. [Gaz métro la vie en bleu, 2019].

Les principaux avantages des murs chauffants sont [Gaz métro la vie en bleu, 2019] :

- Procure un chauffage haut de gamme et un confort supérieur.
- Permet le contrôle indépendant de la température de la pièce.
- Idéal pour les pièces où les planchers en bois, en céramique ou en béton sont plus courants (ex. : salle de bains, cuisine, solarium).
- Procure des planchers chauds et une température sans stratification au plafond.
- Génère des économies d'énergie, car le même niveau de confort est atteint avec une température de consigne plus basse.
- Permet d'utiliser un seul et même chauffe-eau pour fournir l'eau chaude sanitaire et celle du plancher radiant, ce qui nécessite une seule sortie d'évacuation.

I.7.2 Mur chauffant

Le mur chauffant, comme le plancher chauffant, offre pourtant de nombreux avantages. Il se compose d'un réseau de tuyaux reliés au circuit de chauffage central. Il peut ainsi être alimenté par une chaudière ou une pompe à chaleur. (Voire l'exemple dans la Figure I.7) Le

principe de fonctionnement de mur chauffant est comme suit : L'eau chaude circule dans les tuyaux en circuit fermé à l'intérieur d'un serpentin en cuivre, en polyéthylène ou en aluminium et polyéthylène et transmet sa chaleur au mur. Cette chaleur est ensuite transmise à la pièce. [Oreka maison, 2019].

Le mur chauffant est intégrable en construction comme en rénovation :

- En construction, les tuyaux peuvent être intégrés directement dans le mur grâce à des briques alvéolées.
- En rénovation, les tuyaux sont :
 - Soit fixés directement au mur grâce à des rails de fixation ;
 - Soit intégrés dans des panneaux fixés ensuite dans le mur.
- Le mur peut ensuite être alors recouvert d'un enduit en vue de le peindre, le tapisser, le carrelé, ... etc. Toutes les solutions sont possibles. [Oreka maison, 2019].

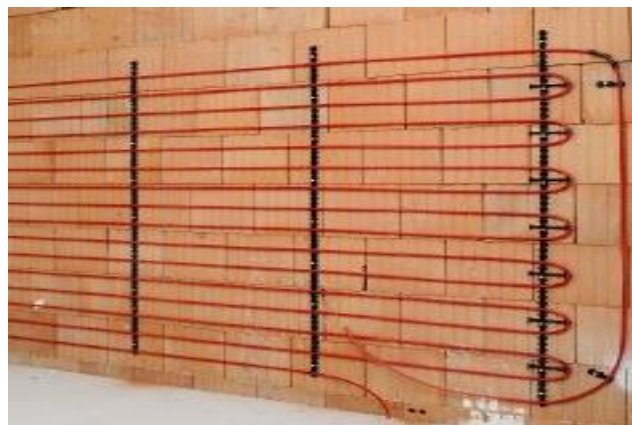


Figure I. 7 : Exemple d'une installation d'un mur chauffant [Système D, 2019].

Le mur chauffant offre de nombreux avantages, tant en matière de confort que de facilité d'installation. [Vos économies d'énergie, 2019].

- Comme le plancher chauffant, un mur chauffant permet de délivrer une chaleur homogène dans toute la pièce grâce à sa diffusion de chaleur par rayonnement. Le confort thermique est donc excellent.
- En revanche, l'installation d'un mur chauffant ne demande pas autant de travaux que l'installation d'un plancher chauffant. Il est possible par exemple de fixer des panneaux supplémentaires sur les murs, sans avoir à refaire entièrement le mur.
- Par ailleurs, comme le chauffage au sol, c'est un système invisible et très économique.

- Son mode de diffusion de la chaleur n'engendre pas de circulation d'air, donc pas de poussières ou d'acariens.
- Il nous fait faire des économies en nous offrant le même confort thermique à 18°C que des convecteurs à 20-21°C.
- Couplé à une pompe à chaleur, il peut être réversible et rafraîchir votre intérieur.
- Enfin, il permet d'améliorer l'isolation phonique de la pièce.

I.8 Conclusion

D'après ce chapitre nous pouvons conclure que le bâtiment est considéré comme un secteur économique clé, fortement consommateur d'énergie et émetteur de gaz à effet de serre. Pour un meilleur confort thermique des bâtiments, nous devons prendre en considération des stratégies et techniques telles que le bon choix de l'orientation, la forme et la compacité du bâtiment, les matériaux de construction de l'enveloppe du bâtiment...etc. Un bâtiment performant sur le plan thermique permettra d'atteindre trois objectifs: la protection de l'environnement extérieur, l'économie de l'énergie, ainsi que l'amélioration du confort thermique.

Chapitre II

Matériaux à
changement de phase
(MCP)

II.1 Introduction

Les matériaux à changements de phase (MCP) sont des composés qui stockent et libèrent de la chaleur lors d'une transformation de phase (solide-liquide) à température constante. Leur principe de fonctionnement est simple et est illustré par la Figure II.1. Comme pour la transformation de la glace en eau qui se produit lorsque la température dépasse les 0 °C, les MCP changent d'état (solide-liquide) en fonction de leur température de fusion. [Guichard, 2013]. Ils sont capables de changer d'état physique sur une large plage de température et leur réactivité repose sur un principe physique simple [Ahmad, 2004] : Lorsque la température ambiante est égale à la température de fusion des MCP, ces derniers changent de phase en se liquéfiant et absorbent l'énergie par chaleur latente. Lorsque la température ambiante chute, les MCP se solidifient en restituant l'énergie qu'ils ont stockée.

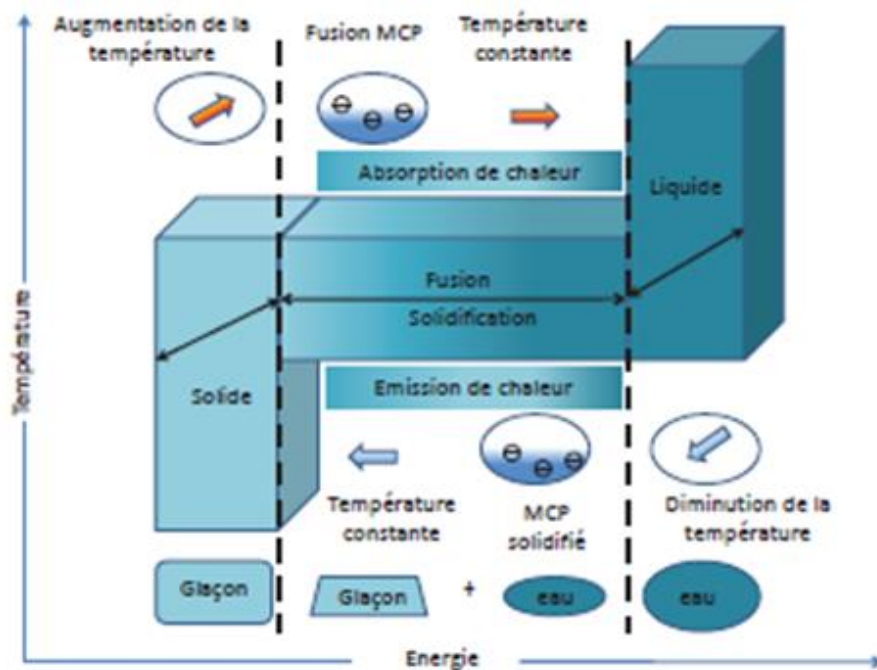


Figure II. 1 : Principe de fonctionnement des matériaux à changement de phase [Guichard, 2013].

Dans les bâtiments, il s'agit du même principe. Dès que la température du matériau à changement de phase atteint sa température de fusion, il commence à fondre et va absorber une partie de l'énergie qui l'entoure afin de la stocker en grande quantité et, dès que la température devient inférieure, l'énergie stockée est restituée. Cette transition de phase est facilitée par l'augmentation de la surface d'échange entre le MCP et l'air ambiant. Généralement, il est intégré au sein des constituants d'une paroi (selon plusieurs procédés, qui

seront détaillés à la fin de ce chapitre) pour faire diminuer les pics de température d'une pièce et de limiter l'utilisation de systèmes coûteux en énergie.

II.2 Historique des MCP

Depuis le premier choc pétrolier des années 70, des études sur les MCP ont été entreprises avec les sels hydratés. Ils étaient testés initialement pour stocker l'énergie solaire. Or, de nombreux problèmes se sont présentés et la communauté scientifique se rendit rapidement compte que ce type de MCP ne pouvait être utilisé. Les principaux problèmes rencontrés étaient :

- La toxicité ;
- La mauvaise transition de phase ;
- La propension à la surfusion ;
- Le mauvais conditionnement (poches, capsules, barres ...) ;
- La durée de vie très faible (limitation du nombre de cycles).

Beaucoup de ces désavantages ont mis à l'écart l'étude de ces matériaux. Ce n'est que dans le cadre du « Grenelle de l'Environnement » qu'un intérêt nouveau s'est manifesté, avec de nouvelles substances et de nouveaux modes de conditionnement. En effet, l'apparition de nouveaux MCP solide/liquide à forme stabilisée a permis de relancer les applications dans de nombreux domaines.

La majorité des MCP à forme stabilisée sont des composites comportant une matrice solide inerte dont la porosité est remplie par le MCP. Cette matrice inerte assure la stabilité structurelle de l'ensemble et évite l'écoulement de la phase liquide du MCP à travers le conteneur [Dauvergne, 2008]. A basse température (< 120 °C), les développements suivants sont rencontrés :

- La micro-encapsulation de la paraffine dans des polymères ;
- Les matrices inertes qui sont imbibées de paraffine pour améliorer la conductivité thermique du MCP ;
- Les matériaux polymères/MCP qui sont obtenus par fusion et par un mélange d'un polymère (exemple : polyéthylène à haute densité) et des paraffines ;
- L'intégration des paraffines micro-encapsulées dans des composites en utilisant des procédés d'imprégnation et d'imbibition.

II.3 Principe de stockage de l'énergie thermique

Le stockage de l'énergie thermique consiste à emmagasiner une quantité d'énergie durant laquelle celle-ci est abondante ou moins coûteuse, en un lieu donné afin de la restituer ultérieurement lorsqu'elle est rare ou plus chère [Dumas, 2002]. A titre d'exemple, il est nécessaire pour les énergies renouvelables intermittentes, telles que le solaire ou l'éolien, de stocker l'énergie immédiatement disponible car celle-ci est variable avec le temps. Ainsi, le principal intérêt d'une unité de stockage est la réduction de la consommation d'énergie. Le stockage de la chaleur peut se faire de trois façons différentes, soit par :

- Stockage thermique sensible
- Stockage thermochimique
- Stockage thermique latent

L'énergie doit être stockée pour qu'elle puisse être disponible à tout moment. Les matériaux sont capables d'accumuler de l'énergie et de la restituer plus tard [Ahmad, 2004, Hongois, 2011].

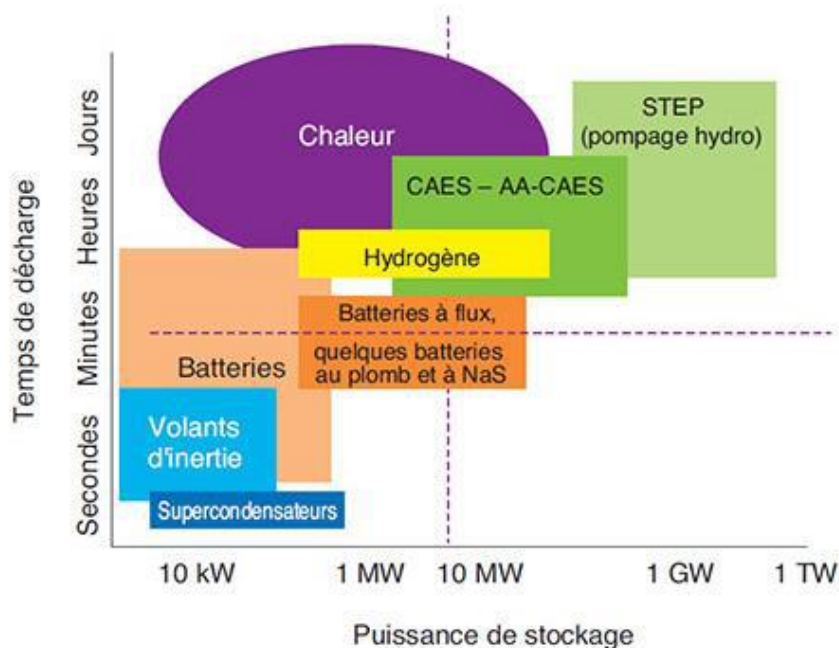


Figure II. 2 Différents systèmes de stockage de l'énergie [Jacquin et Bertrand, 2013].

Les différents systèmes adaptés au stockage (Figure II. 2) devront stocker le surplus d'énergie (phase de charge) et la produire au bon moment (phase de décharge). Le stockage de l'énergie peut se faire par une simple variation de température (stockage à chaleur sensible), par un changement de phase (stockage à chaleur latente), par une transformation physique (adsorption) ou une réaction chimique (stockage thermochimique) [Ahmad, 2004 ;

Jacquin et Bertrand 2013]. C'est le type de transformation de matériaux qui désigne le mode de stockage de l'énergie. A noter que ces systèmes doivent aussi répondre à des problèmes de non-toxicité et d'excellente tenue dans le temps. [Laghzaoui, Peerhossaini, 2010 ; Odru, 2013].

II.3.1 Stockage thermique sensible

Dans le stockage de chaleur sensible de l'énergie thermique est stockée en élevant la température d'un solide ou d'un liquide ; la température du matériau de stockage varie avec la quantité d'énergie stockée.

Les cycles de stockage et de récupération de la chaleur accumulée, peuvent être répétés plusieurs fois en utilisant le système de stockage de chaleur sensible sans aucun problème. C'est le plus important avantage de cette méthode.

Cependant, l'exigence d'un volume important du support de stockage peut être considéré comme un inconvénient pour ce système [Lane, 1983 ; Sharma et al, 2009]. Dans ce système, la quantité de chaleur dépend de la capacité calorifique du support de stockage, du changement de température et de la masse du matériau de stockage. La chaleur sensible peut être stockée à l'aide d'un lit de roches ou galets, dans le sol, la brique, le sable, l'eau, l'huile et l'air [Dinçer et Rosen, 2002 ; Mazman, 2006].

Ainsi, si à pression constante l'on réchauffe un corps solide ou liquide de masse m et de capacité thermique massique C_p de la température initiale T_1 , à la température finale T_2 , on peut stocker une quantité d'énergie donnée par sa variation d'enthalpie.

Cette quantité de chaleur est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\Delta H = H_{\text{finale}} - H_{\text{initiale}} = \int_{T_1}^{T_2} m \times C_p dT \quad (\text{II.1})$$

Si la chaleur spécifique peut être considérée comme constante dans l'intervalle de températures entre T_1 et T_2 ($C_p = \text{cte} = c$) alors :

$$\Delta H = m \times c \times (T_2 - T_1) \quad (\text{II.2})$$

On remarque que la quantité d'énergie stockée est proportionnelle à l'écart de température : ce type de stockage serait donc intéressant uniquement pour des grands écarts de température.

On distingue les deux cas suivants :

- Si $T_2 > T_1$ on parlera de stockage du chaud.
- Si $T_2 < T_1$ on parlera de stockage du froid.

Chapitre II : Matériaux à changement de phase (MCP)

Pour le stockage par chaleur sensible on utilise principalement des corps ayant des chaleurs spécifiques importantes comme par exemple des liquides tels que l'eau et des solides tels que des pierres.

On peut classer les supports de stockage de chaleur sensible comme suit :

- Les supports de stockage liquide (eau, fluides à base d'huile, sel fondu, ... etc.).
- Les supports de stockage solides (roches, les métaux et autres).

Certaines propriétés des substances utilisées comme matériau de stockage de chaleur sensible sont données dans le Tableau II. 1.

Tableau II. 1 Propriétés des matériaux de stockage de chaleur sensible à 20 °C [Dinçer et Rosen, 2002].

Matériaux	Densité (Kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/kg.K)	Capacité thermique volumétrique (J/m ³ K)
Argile	1458	879	1.28
Briques	1800	837	1.51
Grés	2200	712	1.57
Bois	700	2390	1.67
Béton	2000	880	1.76
Verre	2710	837	2.27
Aluminium	2710	896	2.43
Ferre	7900	452	3.57
Acier	7840	465	3.68
Eau	988	4182	4.17

II.3.2 Stockage thermochimique

L'énergie thermochimique est la chaleur absorbée ou libérée au cours d'une réaction chimique endothermique ou exothermique. Le stockage d'énergie thermochimique est basé sur l'énergie des liaisons des composés chimiques mise en jeu au cours des réactions chimiques réversibles [Paksoy, 1992 ; Öztürk, 1997 ; Mazman, 2006]. Dans ce système, la capacité de stockage de chaleur est généralement élevée parce qu'une énergie chimique élevée se produit au cours de la rupture et de la recombinaison des liaisons moléculaires dans une réaction chimique réversible [Öztürk, 1997]. Le stockage d'énergie thermochimique peut être effectué à l'aide de caloduc chimique ou d'une pompe à chaleur chimique. Ce système est plus compliqué que le stockage de la chaleur sensible et latente. Pour ce système, la réaction

chimique doit être réversible et les composés chimiques utilisés doivent être inoffensifs et non corrosifs [Lane, 1983 ; Öztürk, 1997].

II.3.3 Stockage thermique latent

La chaleur latente est l'énergie mise en jeu lors des changements d'état de la matière. Elle intervient aussi dans les changements allotropiques.

La chaleur fournie au repos pendant la fusion se traduit non par un accroissement de la vitesse des molécules, mais par une augmentation de leur énergie potentielle leur permettant de quitter leur position d'équilibre. C'est la raison pour laquelle la température reste constante pendant toute la transformation. Cette température correspondant à la température de la transition de phase.

Dans le cas d'un changement d'état (fusion), la quantité de chaleur mise en jeu s'écrit :

$$Q = m \times (h_f - h_i) = m \times \Delta h_f \text{ (J)} \quad (\text{II.3})$$

Où Δh_f est l'enthalpie spécifique de fusion.

Généralement, il faut porter le matériau de sa température initiale T_i à sa température de fusion T_f et l'on écrit :

$$Q = m \times (h_f - h_i) = m \times c_p \times (T_f - T_i) + m \times \Delta h_f \text{ (J)} \quad (\text{II.4})$$

Dans le cas d'un corps pur on trouve une courbe de variation des températures analogue à celle présentée (Figure II. 3). Pendant le chauffage du matériau avant sa température de fusion, on observe une variation linéaire de la température en fonction du temps tandis que pendant le changement d'état la température reste constante.

Si T_f est la température de changement de phase d'un corps pur qui passe de la température T_1 à la température T_2 , avec $T_1 \leq T_f \leq T_2$ alors l'énergie stockée lors de cette transformation est :

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_f} m \times c_S(T) dT + m \times L + \int_{T_f}^{T_2} m \times c_L(T) dT \quad (\text{II.5})$$

$c_S(T)$: Chaleur spécifique du corps à l'état solide

$c_L(T)$: Chaleur spécifique du corps à l'état liquide

L : Chaleur latente de changement de phase

On retrouve dans l'équation (II.5) deux termes de chaleur sensible en plus du terme mL représentant la chaleur latente due à la masse m .

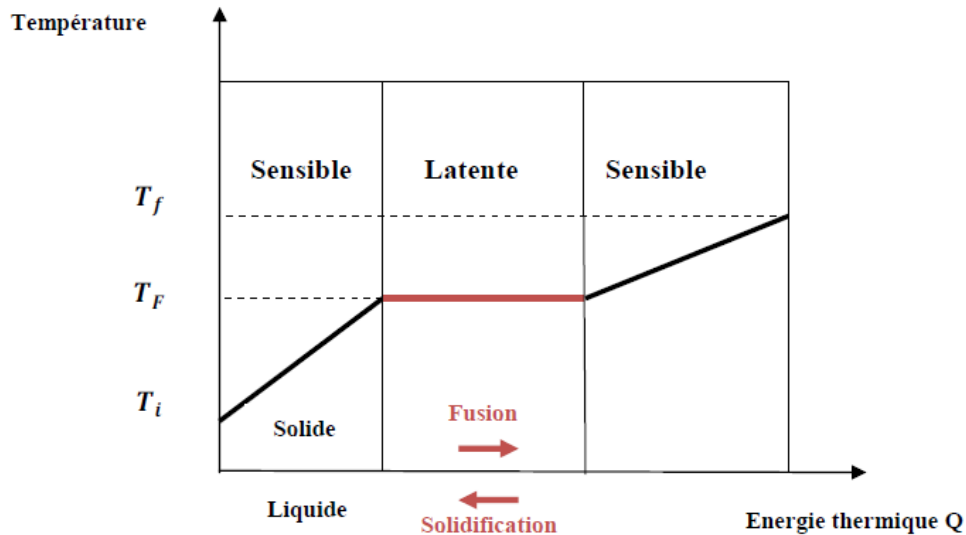


Figure II. 3 : Evolution de la température d'un corps pur homogène avec changement d'état [Akrouche, 2011].

Si l'on représente l'enthalpie spécifique en fonction de la température, on obtient donc la courbe (a) de la Figure II.4. On remarque la discontinuité due au changement d'état (pas de variation de température).

Dans le cas d'un mélange (alliage), la variation d'enthalpie ne présente plus de discontinuité (courbe (b) Figure II. 4) sauf dans le cas où l'on a formation d'un composé défini avec fusion (ou solidification) congruente.

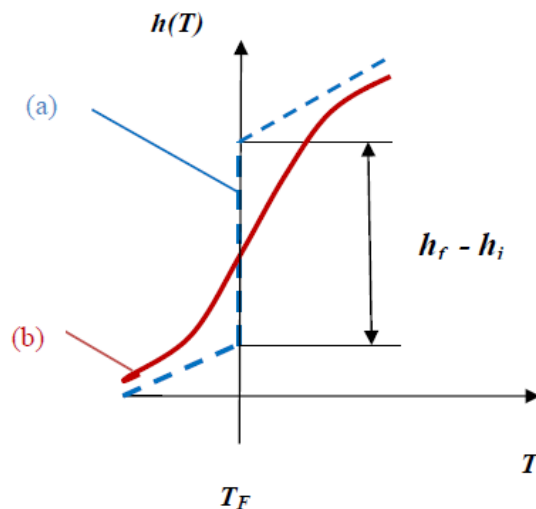


Figure II. 4: Variation de l'enthalpie spécifique en fonction de la température : (a) pour un corps pur (b) pour un mélange [Ahmad, 2004].

En résumé, les avantages de la chaleur latente sont donc :

- Des densités importantes de stockage,

Chapitre II : Matériaux à changement de phase (MCP)

- Une température de changement de phase (cristallisation et fusion) quasiment constante pour les corps purs ou les composés définis.

Parmi les trois types de stockages présentés précédemment, le stockage par chaleur latente semble être le plus adapté pour stocker l'énergie thermique. Les matériaux utilisant ce type de stockage sont qualifiés de « Matériaux à Changement de Phase (MCP) ».

II.4 Classification des MCP

Les matériaux à changements sont nombreux et disponibles dans n'importe quelle gamme de température souhaitée. Les MCP peuvent être classés selon leur nature chimique, en trois catégories (organiques, inorganiques et eutectiques) qui sont illustrés sur la Figure II.5

Un grand nombre de matières chimiques organiques et inorganiques peuvent être identifiées comme MCP d'un point de vue température et chaleur latente de changement de phase. En revanche, le point de transition de phase dans une plage de fonctionnement pour la majorité d'entre eux, ne permet pas de satisfaire aux critères requis pour un support de stockage adéquat.

Afin de pallier ces inconvénients, des solutions seront proposées après avoir passé en revue les différentes familles de matériaux à changements de phase. [Guichard, 2013].

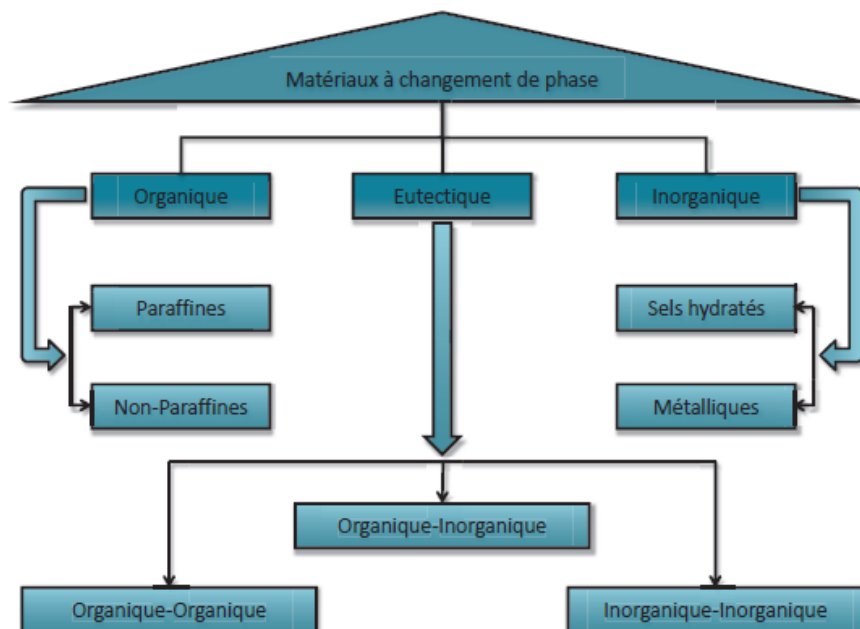


Figure II. 5 : Classification des matériaux à changement de phase [Guichard, 2013].

II.4.1 MCP organiques

Dans les matières organiques, on distingue les paraffines et les non-paraffines [Sharma et al, 2009]. Les matières organiques ont des mélanges congruents, c'est-à-dire qu'elles peuvent être solides et liquides à plusieurs reprises sans entraîner la ségrégation des phases et la dégradation de leur chaleur latente. La cristallisation se fait avec une surfusion quasi-nulle, et dans la majeure partie des cas elle est non corrosive.

II.4.1.1 Paraffines

Les paraffines normales du type C_nH_{2n+2} sont une famille d'hydrocarbures saturés dont les propriétés physiques sont assez semblables. Les paraffines possédant un nombre d'atomes de carbone situé entre 5 et 15 sont caractérisés de liquides, et les autres de solides cireux. La cire de paraffine est un mélange issu des chaînes n-alcanes $CH_3 - (CH_2) - CH_3$. Lors de la cristallisation de la chaîne (CH_2) , une quantité importante de chaleur latente est libérée. Plus la longueur de cette chaîne ne sera grande, plus la température et la chaleur latente de fusion seront élevées. La paraffine est très utilisée car elle est : sûre, fiable et non réactive [Hasnain, 1998], possède un long cycle de fusion, non-corrosive, chimiquement inerte et stable (< 500 °C) [Lane, 1983]. Elle est compatible avec tous les conteneurs en métal et s'incorpore facilement dans les systèmes de stockage de l'énergie thermique [Lane, 1983]. Lors du changement de phase, sa variation en volume et sa pression en vapeur sont faibles. En revanche, elle possède également des propriétés non désirables à son utilisation. En effet, la paraffine est inflammable, possède une faible conductivité thermique et n'est pas compatible avec les conteneurs en plastiques (elle infiltre et adouci ces derniers [Lane, 1983]. Néanmoins, ces inconvénients peuvent être réduits en modifiant légèrement ses propriétés thermo-physiques et l'unité de stockage [Veraj et al, 1999].

D'après [Sharma et al, 2009], les plus prometteuses sont résumées dans le Tableau II. 2 :

Tableau II. 3 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques paraffines.

Les paraffines		
Nombre d'atome de carbone	Température de mélange (C°)	Chaleur latente de fusion (kJ.kg-1)
16	16.7	237.1
18	28	244
20	36.7	246

II.4.1.2 Non-paraffines

Il s'agit de la plus grande famille de matériaux à changement de phase dont les propriétés sont très différentes. Elles sont considérées comme la plus grande catégorie pouvant servir de stockage de l'énergie thermique. Des études ont été menées par [Abhat, 1978 ; Abhat et al, 1981 ; Buddhi et Sawhney, 1994 ; Lane, 1983] pour identifier les candidats potentiels pour le stockage de l'énergie thermique. Ces recherches portaient principalement sur un certain nombre d'esters, d'acides gras, d'alcools et de glycols. Elles ont conclu que ces matières sont extrêmement inflammables et ne doivent en aucun cas être exposées à une forte température, à des flammes ou à des agents oxydants. Ces matières organiques peuvent être divisées en sous-groupes : les acides gras et autres non-paraffines organiques. Pour le sous-groupe « autres non-paraffines organiques », les caractéristiques de ces matériaux sont les suivantes :

- Chaleur de fusion élevée ;
- Inflammabilité ;
- Faible conductivité thermique ;
- Niveau de toxicité variable ;
- Instabilité en hautes températures.

Selon [Sharma et al, 2009], les meilleurs candidats sont donnés par le Tableau II.3 :

Tableau II. 4 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques non-paraffines.

Les non-paraffines		
Matériau	Température de mélange (C°)	Chaleur latente de fusion (KJ.kg-1)
Acide D-Lactique	26	284
Trimyristine	33-57	201-213

II.4.1.3 Acides gras

Le sous-groupe « acides gras » possède des chaleurs de fusion comparables avec celles des paraffines. De plus, ils sont peu ou pas concernés par la surfusion [Lane et Glew, 1975] et ils présentent une faible corrosion. Les acides gras peuvent être considérés comme matériaux de stockage de l'énergie thermique. A basse température, le Tableau II.4 indique quelques acides gras les plus prometteurs [Sharma et al, 2009] :

Tableau II. 5 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques acides gras.

Les acides gras		
Matériau	Température de mélange (C°)	Chaleur latente de fusion (kJ.kg-1)
Acide acétique	16.7	184
Polyéthylène glycol 600	20-25	146
Acétamide	81	241

II.4.2 MCP inorganiques

Dans cette catégorie on distingue les sels hydratés et les métaux.

II.4.2.1 Sels hydratés

Ils peuvent être considérés comme des alliages de sels inorganiques et de l'eau formant un solide cristallin. Les sels hydratés sont le groupe qui a été largement étudié pour leurs utilisations en tant que MCP dans les systèmes thermiques de stockage de la chaleur car ils présentent de nombreux avantages tels que :

- Une forte chaleur latente de fusion par unité de volume (diminution de la taille du système de stockage);
- Une conductivité thermique élevée (augmentation du transfert de chaleur) ;
- Une faible variation de volume lors du changement de phase ;
- Un faible pouvoir corrosif ;
- Une compatibilité avec les conteneurs en plastique ;
- Un faible coût.

En revanche, ils sont concernés par de forts inconvénients comme le mélange incongruent, (le sel n'est pas totalement soluble dans l'hydratation de l'eau lors du point de mélange) et la ségrégation (formation d'hydrates ou des sels déshydratés qui ont tendance à se déposer et réduire le volume actif disponible pour le stockage de la chaleur). [Abhat, 1983] montre une diminution de la chaleur de fusion de plus de 73 % en $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ après 1000 cycles. Des solutions ont été proposées pour contourner ces inconvénients [Lane, 1983]. Également, le phénomène de surfusion est observé lorsque commence la cristallisation au point de changement de phase.

Afin d'éviter ce problème, des matériaux appropriés de nucléation peuvent être utilisés pour que la croissance des cristaux débute dans le milieu de stockage. Le choix du conteneur

est également essentiel pour contenir le matériau et ne pas laisser l'eau y pénétrer. En effet, dans [Abhat, 1983] la dégradation des matériaux tels que le $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ survient après seulement deux cycles lorsque l'échantillon n'était pas hermétiquement fermé. De plus, comme les systèmes de stockage thermique utilisent généralement des conteneurs en métal, les sels hydratés peuvent provoquer la corrosion dans ces derniers. Citons par le biais du Tableau II.5, quelques exemples de sels hydratés les plus prometteurs [Sharma et al, 2009] :

Tableau II. 6 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques sels hydratés.

Les sels hydratés		
Matériau	Température de mélange (C°)	Chaleur latente de fusion (kJ.kg-1)
$\text{CaCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	29.8	174
$\text{LiNO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	30	296
$\text{LiNO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	30	189
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	37	223

II.4.2.2 Métaux

Il s'agit essentiellement des métaux à fusions basses et des métaux eutectiques. Cette catégorie n'a pour l'instant pas été envisagée pour la technologie de MCP en raison de leur poids. Leurs caractéristiques principales sont : une faible chaleur de fusion par unité de poids, une forte chaleur de fusion par unité de volume, une conductivité thermique élevée, une chaleur spécifique faible et une pression en vapeur relativement élevée. Les plus prometteurs des métalliques [Sharma et al, 2009] sont donnés par le Tableau II.6 :

Tableau II. 7 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques matériaux métalliques.

Les matériaux métalliques		
Matériau	Température de mélange (C°)	Chaleur latente de fusion (kJ.kg-1)
Gallium	30	80.3
Cerrobend eutectique	70	32.6

II.4.3 Eutectiques

Les eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs corps qui, par définition, ont des températures de fusion précises. Ils ont un comportement similaire au comportement des hydrates salins à fusion congruente.

Les eutectiques ont un potentiel important pour les applications de stockage thermique de l'énergie. Quelques eutectiques sont utilisés pour le refroidissement et dans les systèmes passifs de stockage de l'énergie solaire.

Les eutectiques sont classés en eutectiques inorganiques, eutectiques organiques et eutectiques organiques –inorganiques.

Sur le Tableau II.7, on donne quelques eutectiques déjà utilisés pour les applications de stockage thermique.

Tableau II. 8 : Liste de quelques eutectiques [Hasnain ,1998].

Eutectiques inorganiques	Point de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [kJ/kg]
49.3% MgCl ₂ .6H ₂ O+50.7%Mg(NO ₃).6H ₂ O	58	132.3
61.5%Mg(NO ₃)6H ₂ O+38.5%NH ₄ NO ₃	51	131.1
58.3%Mg(NO ₃)6H ₂ O+41.7%MgCl ₂ .6H ₂ O	58	106
CaCl ₂ .6H ₂ O+CaBr ₂ .H ₂ O	14	140
Eutectique organique	Point de fusion [°C]	Chaleur latente de fusion [kJ/kg]
Acides Caprique-Laurique	18	120
Acides Palmitique-Laurique	33	145
Acides Stéarique Laurique	34	150

II.5 Critères de choix d'un matériau à changement de phase.

Le choix d'un MCP doit être fait selon plusieurs critères dont les principaux pour le stockage de l'énergie thermique sous forme de chaleur latente sont :

II.5.1 Propriétés thermiques

- Une température de transition de phase doit être conforme au domaine d'application.
- Une chaleur latente de transition élevée.

Chapitre II : Matériaux à changement de phase (MCP)

- Une bonne qualité de transfert de chaleur. Par exemple, une conductivité thermique élevée faciliterait la charge et la décharge du stockage de l'énergie.

II.5.2 Propriétés physiques

- Une densité importante du corps permettra un volume de stockage très faible et donc un réservoir de stockage petit. Durant le processus du changement de phase, il faudra étudier la variation de la densité (exemple : les MCP aqueux).
- Pour réduire les contraintes mécaniques dans le conteneur, la tension en vapeur doit être minimale et l'expansion volumique petite.
- Une stabilité des phases favorable pour le stockage et le déstockage de la chaleur.

II.5.3 Propriétés cinétiques

- Une surfusion doit être réduite. Le recours à l'utilisation d'additif est nécessaire.
- Un taux de cristallisation important.

II.5.4 Propriétés chimiques

- Une stabilité chimique à long terme des cycles de fusion/solidification.
- Une compatibilité avec les matériaux de construction.
- Une étude de la dangerosité du produit (toxicité, inflammabilité, explosion,) passant par les réglementations et normalisations en vigueur. La dangerosité du produit doit être minimisée.
- Recyclable.

II.5.5 Aspects économiques

- Le coût est un critère également très important. Celui-ci sera différent selon les utilisations. Par exemple, les utilisations domestiques demandent quelques kilogrammes alors que les utilisations industrielles quelques tonnes.
- Disponible en grande quantité.

II.5.6 Critères technologiques

- La fiabilité des matériels de confinement passe par une compatibilité avec les matériaux du conteneur.

II.6 Applications des MCP dans le secteur du bâtiment

L'enveloppe du bâtiment possède des surfaces importantes et donc un grand potentiel pour le stockage de l'énergie thermique [Ortiz et al, 2010]. L'intégration d'un MCP adapté aux murs, aux plafonds et aux planchers des bâtiments peut rendre possible la capture directe de l'énergie facilitant ainsi, le stockage de quantités importantes en énergie thermique dans l'enveloppe du bâtiment. [Madjoudj et Imessad, 2016].

Les MCP sont appliqués dans les enveloppes de bâtiment pour leur bonne performance thermique et leur stabilité pendant la fusion et la solidification. Intégrés à l'enveloppe du bâtiment (murs, plafond et plancher).

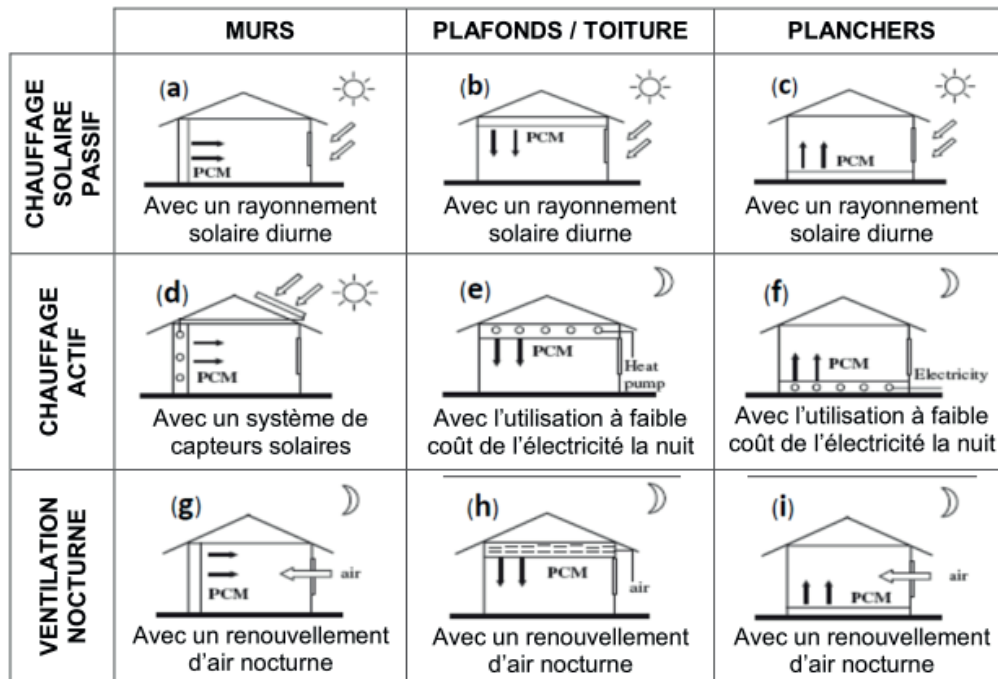


Figure II. 6 : Emplacement des MCP dans l'enveloppe du bâtiment [Yinping et al, 2006].

Les MCP utilisés pour être incorporés au béton sont essentiellement des MCP organiques, paraffiniques ou non.

Le recours aux MCP encapsulés permet de maîtriser la consommation de l'énergie. En effet, actuellement les constructeurs cherchent à diminuer les coûts de la construction et à augmenter à la fois la surface habitable en optimisant au mieux l'enveloppe des bâtiments. En effet, une paroi de plâtre de 3 cm d'épaisseur seulement contenant 30% du MCP absorbe autant de calories qu'une paroi en béton d'épaisseur 18 cm et qu'une paroi en brique de 23 cm d'épaisseur [Ahmad, 2004].

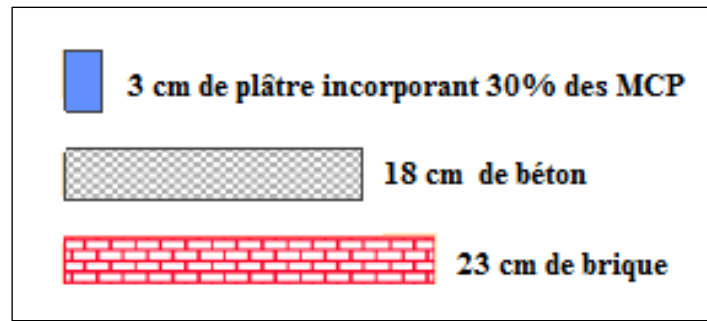


Figure II. 7 : Equivalence thermique de quelques parois d'épaisseurs différentes en fonction de leurs matériaux constitutifs [BASF, 2014].

Généralement l'incorporation des MCP dans le béton est effectuée selon trois procédés. :

- Incorporation directe.
- Immersion (ou imprégnation).
- Encapsulation.

II.6.1 Incorporation directe

On incorpore directement le MCP au mélange lors de la fabrication du béton. C'est le procédé le plus pratique et le moins cher. Le succès de ce procédé dépend de deux conditions essentielles [Hawes et Feldman, 1992].

L'introduction du MCP dans le béton ne doit pas interférer avec le processus d'hydratation ni affecter la résistance du liant dans le béton ni provoquer de réaction entre les composants du mélange et/ou avec le MCP.

Pour ne pas interférer avec le processus d'hydratation les MCP peuvent être introduits sous forme solide, soit en poudre soit en granulés, en prenant garde que leur température ne dépasse pas la température de fusion lors du mélange. Il faut également prévoir que la cure du béton n'élimine pas le MCP déjà introduit.

II.6.2 Immersion

Le procédé consiste à plonger les blocs de béton dans le MCP liquide. C'est un procédé flexible qui permet une production en série et qui permet d'utiliser des blocs usuels. Néanmoins cette technique est plus onéreuse que l'incorporation directe.

La température d'immersion optimale dépend du couple béton-MCP et ne doit pas être trop importante (de l'ordre de 80°C), les bétons imprégnés absorbant moins l'humidité que les non-imprégnés [Hawes et al, 1993].

II.6.3 Encapsulation

L'encapsulation est une technique largement utilisée dans de nombreux domaines industriels et scientifiques. Dans la plupart des cas, les MCP doivent être encapsulés. En effet, ce procédé permet d'éviter la fuite de la matière encapsulée au moment de changement de phase, d'améliorer les échanges thermiques avec le milieu environnant, de limiter le contact entre la matière active encapsulée et la matrice, de protéger les MCP de leur milieu environnant et de faciliter l'incorporation de ces produits dans des matériaux comme le béton [Vandamme, 2007]. Ainsi, le conteneur de conditionnement doit être compatible avec les MCP en lui assurant une bonne étanchéité et une stabilité lors du changement de phase [Akrouche, 2011 ; Gharssallaoui et al, 2007]. Il existe deux procédés d'encapsulation des MCP : la macro-encapsulation et la micro-encapsulation [Akrouche, 2011].

II.6.3.1 Macro-encapsulation

Cette technique consiste à conditionner les MCP dans des conteneurs dont le volume varie de 1 ml à plusieurs litres. Ces conteneurs sont généralement des nodules, des sacs plastiques ou des briques plastiques. La Figure II. 8 présente quelques exemples des MCP macro-encapsulés [Akrouche, 2011 ; Gharssallaoui et al, 2007].

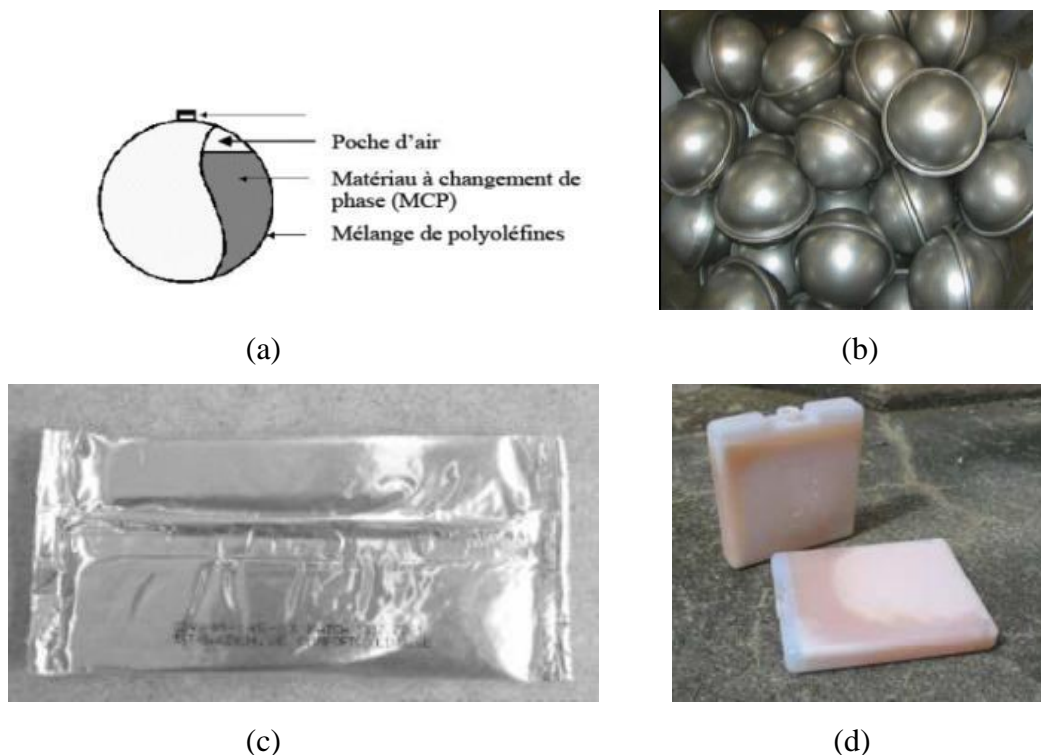


Figure II. 8 : Exemple des MCP macro-encapsulés : (a) conditionnement en nodule, (b) en balle inoxydable, (c) en sac plastique et (d) en briquettes plastiques [Akrouche, 2011 ; Gharssallaoui et al, 2007].

II.6.3.2 Micro-encapsulation

C'est une technique simple et efficace permettant d'encapsuler la matière active dans un matériau enrobant [Belouadeh, 2012]. La taille des particules micro-encapsulées varie entre 1 μm et 1 mm. Les microparticules ainsi formées contiennent généralement entre 1 et 90 % en masse de la matière active.

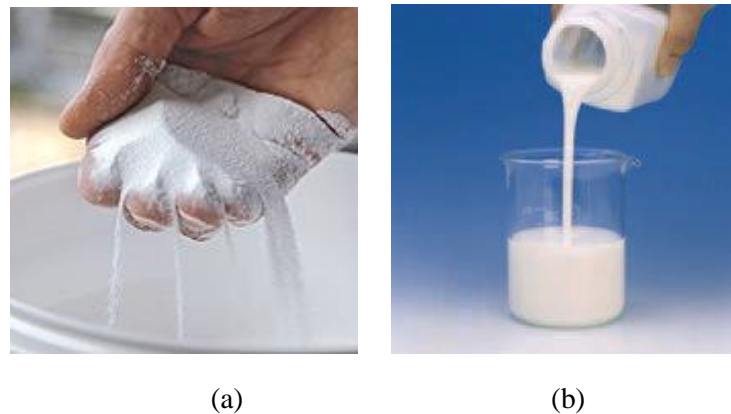


Figure II. 9 : Exemple des MCP micro-encapsulés : (a) à l'état poudre et (b) à l'état liquide [BASF, 2014].

Cette matière active doit être encapsulée par un polymère étanche afin d'éviter sa fuite pendant la liquéfaction. Des polymères d'origine naturelle, hémisynthétique ou synthétique ont été utilisés dans l'industrie de micro encapsulation. La Figure II. 9 présente quelques exemples des MCP micro-encapsulés. Actuellement, seuls les MCP hydrophobes sont micro-encapsulés [Mehling et Cabeza, 2008].

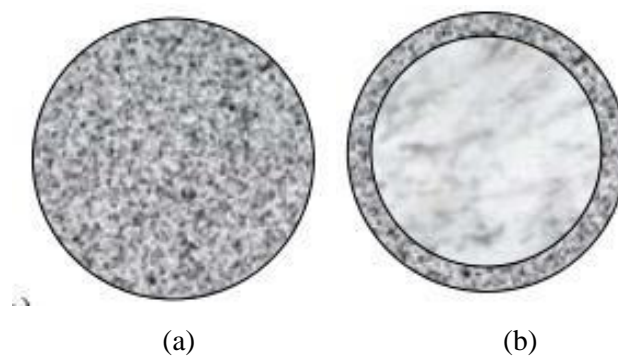


Figure II. 10 : Structure de microparticules : (a) Microsphère (b) microcapsule [Legrand, 2007].

II.7 Conclusion

Les matériaux à changement de phase (MCP) ont la capacité de réduire la température maximale de l'environnement intérieur, de réduire les températures excédentaires au-delà de la gamme de confort thermique, d'améliorer les performances énergétiques globales du bâtiment et d'augmenter la résistance thermique comme une couche isolante.

Les matériaux de stockage de chaleur latente avec un changement de phase liquide-solide fournissent une solution prometteuse pour le développement des systèmes de stockage thermique efficaces dans les bâtiments. Le comportement thermique des structures du bâtiment peut être amélioré par l'incorporation du MCP dans les matériaux de construction en vue d'augmenter le confort des occupants et de réduire la consommation énergétique.

L'incorporation d'un MCP approprié dans l'enveloppe, constitue une solution efficace pour la réduction de la consommation énergétique pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments.

Chapitre III

Matériaux et méthodes

III.1 Introduction

Les caractéristiques des matériaux de construction déterminent leur domaine d'application. Ainsi l'évaluation des qualités des matériaux, c'est-à-dire leurs propriétés les plus importantes, est primordiale et indispensable pour discuter et comprendre les comportements thermiques et physico-mécaniques des matériaux ainsi élaborés en cours de notre étude.

A ce stade, la caractérisation des matériaux est l'étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, pour cela, on a fait un certain nombre d'essais normalisés.

Pour la réalisation des essais, nous avons réalisé un nouveau dispositif d'essai, afin de s'adapter aux objectifs fixés, concernant l'effet de l'utilisation de la paraffine avec deux types de matériaux : béton et plâtre, sur le confort dans un bâtiment. Les plaques ont été préparées d'une manière à simuler leurs utilisations comme plancher et/ou murs chauffants dans les bâtiments. Les mesures thermiques ont été effectuées en utilisant un thermomètre infrarouge qui facilite l'enregistrement instantané des températures de surfaces.

III.2 Matériaux utilisés

Dans le but de faire la confection des plaques étudiées, on a utilisé les matériaux suivants :

III.2.1 Granulats

Pour la réalisation des plaques en béton, nous avons utilisé :

- Un sable alluvionnaire de classe granulaire (0/5) de la région de Laghouat.
- Des graviers concassés de classe granulaire 3/8 et 8/15 respectivement, de la région de Laghouat.



Figure III. 1 : Granulats utilisés.

III.2.2 Ciment

Le ciment utilisé dans ce travail est un ciment portland CPJ CEM II d'une classe de résistance de 42.5 N, il est produit par la cimenterie de Lafarge sise à M'sila.



Figure III. 2 : Ciment utilisé.

III.2.3 Eau de gâchage

L'eau utilisée dans cette partie expérimentale est l'eau de robinet de laboratoire de département de Génie Civil de Laghouat.

III.2.4 Plâtre

Le plâtre utilisé pour la fabrication des plaques est celui de la société Algérienne « TOUAB », de BOU-SAADA, Algérie.

III.2.5 Paraffine

Dans le présent travail nous avons réalisé les plaques de béton et de plâtre en utilisant deux types de paraffine en combinaison avec le béton et le plâtre : l'une dont la température de fusion est de l'ordre de 27°C et l'autre paraffine dont la température de fusion est de l'ordre de 58°C, en provenance de la Chine (destinée initialement pour des fins cosmétiques).

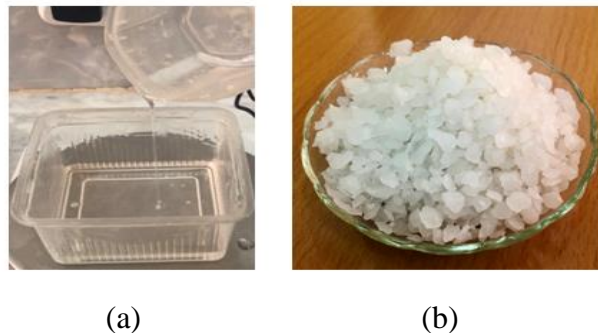


Figure III. 3 : (a) Paraffine 27, (b) paraffine 58.

III.3 Caractéristiques des granulats utilisés

III.3.1 Masse volumique apparente

La masse volumique apparente est calculée d'après la norme **NFP18-555**.

C'est le rapport entre la masse d'échantillon (M) sec et le volume total apparent (V_{tot})

V_{tot} = volume des grains + volume de vide

La masse volumique apparente (γ_{app}) est donnée par la relation suivante :

$$\gamma_{app} = \frac{M}{V_{tot}} \quad (III.1)$$

Mode opératoire

- On pèse un récipient vide (soit M1 son poids).
- On remplit le récipient avec du matériau dont on veut déterminer sa masse volumique.
- On arase sans tasser à l'aide d'une spatule.
- On pèse le récipient plein (soit M2 son poids).
- On déduit la masse de l'échantillon M=M2-M1.



Figure III. 4 : Essai de la masse volumique apparente.

Les résultats de la masse volumique apparente sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III. 1 : Masses volumiques apparentes des granulats utilisés.

Granulats	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15
γ_{app} (kg /m ³)	1510	1183	1200

III.3.2 Masse volumique absolue

La masse volumique absolue est calculée d'après la norme **NFP18-555**.

C'est et le rapport entre la masse d'échantillon (M) et le volume absolu de l'ensemble des grains.

La masse volumique absolue (γ_{abs}) est donnée par la relation suivante :

$$\gamma_{abs} = \frac{Ma}{V_2 - V_1} \quad (III.2)$$

Mode opératoire

- Peser et noter le poids Ma .
- Remplir l'éprouvette avec de l'eau jusqu'au volume V_1 .
- Introduire l'échantillon dans l'éprouvette graduée.
- Noter le volume V_2 .
- Calculer la masse volumique absolue à partir de la relation (III.2).



Figure III. 5 : Masse volumique absolue.

Les résultats de la masse volumique absolue sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III. 2 : Masses volumiques absolues des granulats utilisés.

Granulats	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15
γ_{abs} (kg /m ³)	2430	2460	2570

III.3.3 Capacité d'absorption d'eau

On détermine un coefficient d'absorption, qui est défini comme le rapport de l'augmentation de la masse de l'échantillon à surface sèche après imbibition dans l'eau, à la masse sèche de l'échantillon. Cette imbibition est obtenue par immersion de l'échantillon dans l'eau pendant 24 heures.

Le coefficient d'absorption (Abs) est défini par la relation :

$$Abs = \frac{M_h - M_s}{M_s} * 100 \quad (III.3)$$

Mode opératoire

- Imbiber une masse suffisante dans l'eau (24 h),
- Etaler l'échantillon sur une surface plane non absorbante et le séché afin d'éliminer l'eau de la surface des grains.



Figure III. 6 : Essai d'absorption des granulats.

Les résultats de coefficient d'absorption sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III. 3 : Coefficients d'absorption des granulats utilisés.

Granulats	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/15
Abs (%)	0.99	4.85	3.01

III.3.4 Equivalent de sable

L'essai a été fait conformément à la norme **NFP 18-598**.

L'équivalent de sable permet de contrôler la propreté d'un sable et de déterminer sa valeur en mode piston et en mode visuel.

Deux valeurs sont déterminées : Es à vue et Es à piston.

L'équivalent de sable est donné par :

$$ESp = \frac{h_2}{h_1} * 100 \quad (III.4)$$

$$ESv = \frac{h'^2}{h_1} * 100 \quad (III.5)$$

Mode opératoire

- Verser la solution lavant dans l'éprouvette jusqu'au premier repère, puis verser 120 g de sable sec.
- Laisser reposer 10 min l'éprouvette avant de l'agiter par la machine d'agitation à 90 cycles en 30 s puis la laisser au repos 10 min une deuxième fois.
- Laver le mélange jusqu'à ce que le niveau atteigne le deuxième repère.
- Laisser reposer 20 min avant de procéder aux mesures.

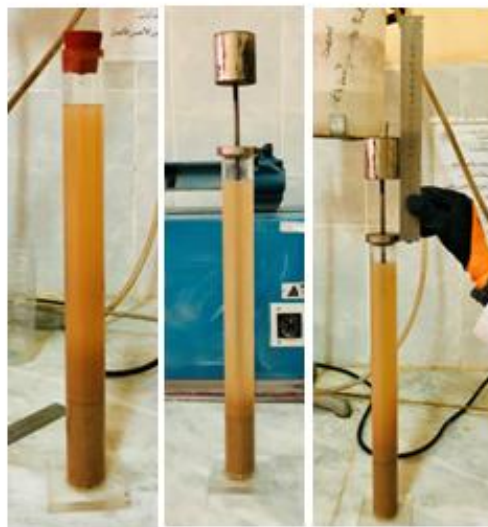


Figure III. 7 : Essai d'équivalent de sable (visuel et à piston).

Les résultats de l'équivalent de sable sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III. 4 : Résultats d'équivalent de sable.

Matériau	Sable alluvionnaire
ES Visuel	91
ES Piston	90.62

Tableau III. 5 : Préconisations en matière de propreté pour les sables [Festa, Dreux].

ES	Nature de sable
ES < 60	Sable argileux
$60 \leq ES < 70$	Sable légèrement argileux
$70 \leq ES < 80$	Sable propre
ES > 80	Sable très propre

D'après le tableau ci-dessus, on peut conclure que le sable utilisé est un sable très propre.

III.3.5 Analyse granulométrique

L'analyse granulométrique a été réalisée conformément à la norme **NFP18-560** ou les granulats passent à travers une série des tamis décroissante des mailles en (mm) 16,12.5, 10, 8,6.3, 5, 4, 3.15, 2.5, 2, 1, 0.8, 0.63, 0.4, 0.25, 0.16, 0.1, 0.08.

Mode opératoire

- On dessèche l'échantillon.
- On pèse la masse sèche MS de l'échantillon.
- On met du granulat sec sur la série des tamis.
- On met l'ensemble de la série des tamis sur la machine vibrante.
- On met en marche la machine jusqu'au moment où on considère que chaque tamis n'a retenu que la fraction granulométrique qui lui est due.
- On pèse les refus dans chaque tamis.

Résultats

Gravier 3/8

La préparation des échantillons se fait suivant la norme **NFP 18-553**.

Selon cette norme la masse de l'échantillon étudié doit vérifier la condition suivante

$$M > \frac{D^2 \max}{100} \quad (\text{III.6})$$

Où :

M : la masse de l'échantillon.

D : la dimension maximale exprimée en millimètre. Dans ce cas on a $D = 8$ mm.

$$M \geq \frac{8^2}{100} = 0.64 \text{ kg} \quad (\text{III.7})$$

On prendra dans notre cas $M = 1$ kg



Figure III. 8 : Série des tamis utilisée pour l'analyse granulométrique par tamisage à sec du gravier 3/8.

Tableau III. 6 : Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 3/8.

Echantillon : Gravier 3/8				
Température : 20°C				
M = 1 kg				
Dimension des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)
10	2	2	0.2	99.8
8	50	52	5.2	94.8
6.3	230	282	28.2	71.8
5	292	574	57.4	42.6
4	210	784	78.4	21.6
3.15	112	896	89.6	10.4
2.5	60	956	95.6	4.4

Gravier 8/15

La préparation des échantillons se fait suivant la norme **NFP 18-553**

Selon cette norme la masse de l'échantillon étudié doit vérifier la condition suivante

$$M > \frac{D^2 \max}{100} \quad (\text{III.8})$$

Où :

M : la masse de l'échantillon.

D : la dimension maximale exprimée en millimètre. Dans ce cas on a $D = 15 \text{ mm}$.

$$M > \frac{15^2}{100} = 2.25 \quad (\text{III.9})$$

On prendra dans notre cas $M = 2.5 \text{ kg}$



Figure III. 9 : Série des tamis utilisée pour l'analyse granulométrique par tamisage à sec du gravier 8/15.

Tableau III. 7 : Résultats de l'analyse granulométrique du gravier 8/15

Echantillon : Gravier 8/15				
Température : 20°C				
M= 2.5 kg				
Dimension des tamis (mm)	Refus partiel (g)	Refus cumulé (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)
16	0	0	0	100
12.5	214	214	8.56	91.44
10	856	1070	28.2	57.2
8	922	1992	57.4	20.32
6.3	382	2374	8.4	5.04

Sable

La préparation des échantillons se fait suivant la norme **NFP 18-553**.

Selon cette norme la masse de l'échantillon étudié doit vérifier la condition suivante :

$$200 D > M \quad (\text{III.10})$$

Où :

M : la masse de l'échantillon.

D : la dimension maximale exprimée en millimètre. Dans ce cas on a $D = 5 \text{ mm}$.

$$200 * 5 > 1000 \quad (\text{III.11})$$

On prendra dans notre cas $M = 1 \text{ kg}$



Figure III. 10 : Série des tamis utilisée pour l'analyse granulométrique par tamisage à sec du sable alluvionnaire.

Tableau III. 8 : Résultats de l'analyse granulométrique du sable alluvionnaire.

Echantillon : sable alluvionnaire				
Température : 20°C				
M = 1 kg				
Dimension des tamis (mm)	Refus partielle (g)	Refus cumulée (g)	Refus cumulé (%)	Passant (%)
5	0	0	0	100
3.15	6	6	0.6	99.4
2	17	23	2.3	97.7
1	49	72	7.2	92.8
0.8	28	100	10	90
0.63	80	180	18	82
0.4	184	364	36.4	63.6
0.250	374	738	73.8	26.6
0.16	168	906	90.6	9.4
0.1	60	966	96.6	3.4
0.08	12	979	97.6	2.4

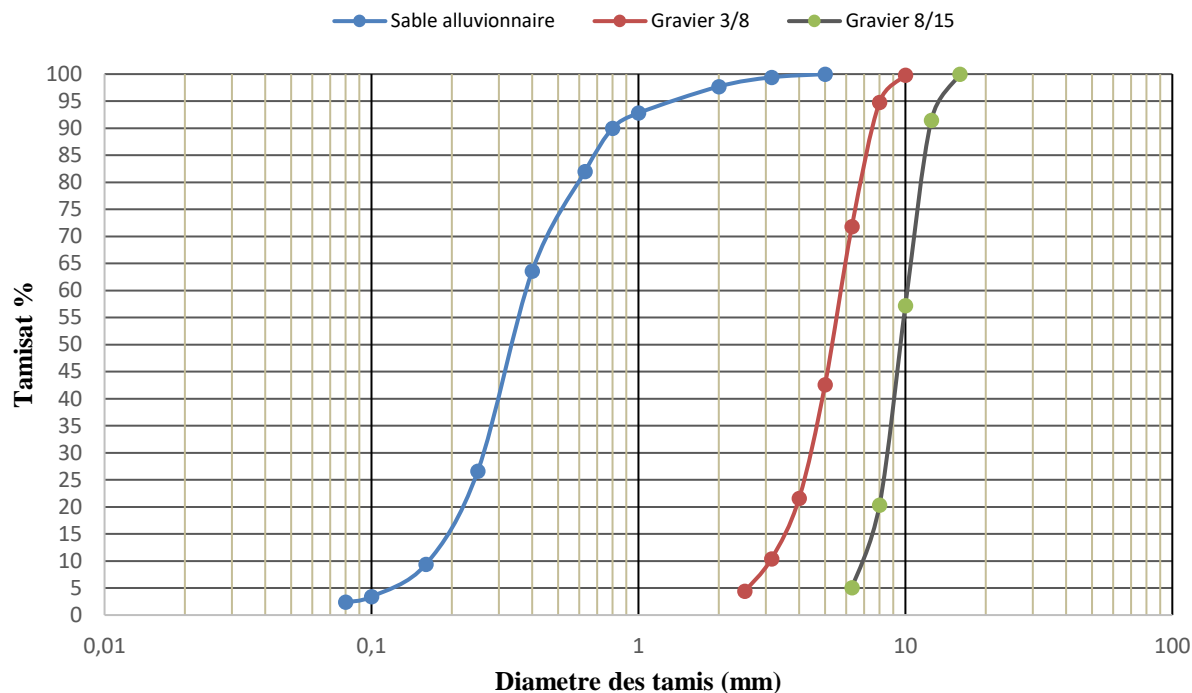


Figure III. 11 : Courbe d'analyse granulométrique des granulats.

Module de finesse

Le module de finesse M_f d'un sable est égal au centième (1/100) de la somme des refus cumulés exprimé (en % sur les tamis 0.16, 0.315, 0.63, 1.25, 2.5 et 5 mm)

Ce paramètre utilisé pour caractériser la finesse de sable.

Le module de finesse d'un granulat est donné par la relation suivante :

$$M_f > \frac{\Sigma \text{ refus cumulée } \%}{100} \quad (\text{III.12})$$

Le module de finesse du sable alluvionnaire obtenu de l'essai effectué est :

$$M_f = 2.05.$$

D'après ce résultat on peut dire que le sable utilisé est un sable fin à moyen, selon [Festa, Dreux]

III.4 Caractéristiques du ciment utilisé

III.4.1 Masse volumique

L'essai masse volumique absolue au densitomètre le Châtelier a été fait selon la norme **NF EN 196-6**. Il s'agit de mesurer la masse volumique absolue de ciment anhydre qui varie en fonction de la composition de ciment, tout en restant comprise entre 3 et 3,2 g/cm³.

Mode opératoire

- Remplir l'appareil de Toluène jusqu'à un volume voisin du zéro soit V1.
- Peser le tout soit M1.
- Introduire environ 60 g de ciment jusqu'à ce que le liquide soit dans la partie utile de la graduation supérieure.
- Bien chasser les bulles d'air, noter V2.
- Peser soit M2.
- La masse spécifique est donnée par :

$$\rho_s = \frac{M2 - M1}{V1 - V2} \quad (\text{III.13})$$



Figure III. 12 : Essai de la masse volumique du ciment utilisé.

Les résultats des masses volumiques du ciment sont récapitulés dans le tableau suivant :

Tableau III. 9 : Masse volumiques du ciment utilisé

Essais	Résultats (g/cm ³)
Masse volumique absolue	3
Masse volumique apparente	1.1286

III.4.2 Consistance

La consistance est évaluée en mesurant le degré d'enfoncement de la sonde de consistance de l'appareil de Vicat sous l'effet d'une charge constante.

Les résultats de la consistance du ciment sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau III. 10 : Consistance du ciment utilisé.

E/C	Ciment (g)	Quantité d'eau (g)	L'enfoncement : d (mm)
0.25	500	$0.25 \times 500 = 125$	22.25
0.28	500	$0.28 \times 500 = 140$	7
0.29	500	$0.29 \times 500 = 145$	4

A partir des résultats du tableau ci-dessus, la consistance trouvée est de 28 %.

III.5 Caractéristiques du plâtre utilisé

Les caractéristiques physiques de ce dernier sont affichées dans le tableau suivant :

Tableau III. 11 : Caractéristiques du plâtre utilisé.

Masse volumique apparente	0.80 g/cm ³
Masse volumique absolue	2.5 g/cm ³
Finesse de mouture	Plâtre moyen
Surface spécifique de Blaine	2533.27 g/cm ²
Taux de gâchage E/P	0.75
Temps de durcissement	8 à 12 minutes
Stockage	Stocker au sec

III.6 Caractéristiques de la paraffine utilisée

III.6.1 Préparation de la paraffine

Pour ce qui est de la paraffine à 58°C, nous l'avons trouvée prête à l'utilisation dans son état brut.

En revanche, pour l'obtention de la paraffine à 27°C, il nous a fallu mélanger 75% d'huile de paraffine avec 25% de gel de paraffine (Figure III.13).

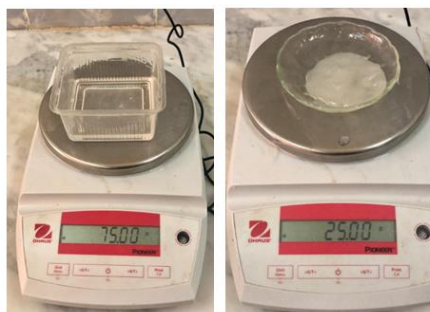


Figure III. 13 : Préparation de la paraffine 27.

III.6.2 Essai de point de fusion de la paraffine 58

Nous avons utilisé l'instrument de mesure du point de fusion de la marque Buchi modèle B-545 qui est conçu pour la détermination du point de fusion et du point d'ébullition de diverses substances. De plus, cet appareil offre une mémoire permettant de stocker 10 méthodes différentes.

La technique utilisée pour mesurer la température de fusion consiste à utiliser des tubes capillaires (d'un diamètre de 1mm environ et d'une épaisseur de 0.1 mm / 0.2 mm), remplis à hauteur de 2 – 3 mm du matériau testé à l'état solide. [Mettler-Toledo, 2019].



Figure III. 14 : Mesure de la température de fusion de la paraffine 58°.

Tableau III. 12 : Caractéristiques de la paraffine 58.

Formule brute	C_nH_{2n+2}
T° fusion	58 C°
Masse volumique	0.9 g/cm ³
Viscosité à 100 °C 3 cst	3 cst
Pénétration à 25 °C	17 1/10 ^{ème} mm

III.6.3 Essai de température de fusion de la paraffine 27

Pour la détermination de la température de fusion de la paraffine à 27 ° C, nous avons utilisé un bain Marie et un thermomètre. Les étapes du protocole de mesure sont les suivantes :

- Mettre la paraffine 27 dans un tube mince,
- Mettre le tube et le thermomètre dans le bain Marie réglé à environ 40 °C,
- Une fois la paraffine commence à changer de la phase solide à la phase liquide (visuellement à la température de fusion, la paraffine change du blanc au transparent), on note la température indiquée par le thermomètre qui correspond à la température de fusion de la paraffine, dans notre cas, nous avons trouvé que la température de fusion de la paraffine préparée égale à 27 ° C.

Tableau III. 13 : Caractéristiques de la paraffine 27 [Aadmi et al, 2013].

Matériaux		Conductivité thermique (W/m°K)	Capacité thermique massique (J/kg°K)	Masse volumique (kg/m ³)
Paraffine 27	Solide	0.24	2400	870
	Liquide	0.15	1800	760

III.7 Composition du béton

Pour la composition du béton, nous avons eu recours à la méthode de formulation de Dreux Gorisse. (Voir l'annexe).

Pour 1 m³ de béton, les dosages sont les suivants :

- C = 440 Kg/m³
- S = 560.98 Kg/m³
- g = 141.99 Kg/m³
- G = 906.43 Kg/m³

III.8 Résistance à 28 jours

Les résultats de l'écrasement à 28 jours des éprouvettes de béton et de plâtre sont regroupés dans les tableaux suivants :

Tableau III. 14 : Ecrasement à 28 jours des éprouvettes de béton.

Béton (MPa)		
Type de l'écrasement	Flexion (7*7*28)	Compression (7*7*28)
28 jours	4.48	113.4

Tableau III. 15 : Ecrasement à 28 jours des éprouvettes de plâtre.

Plâtre (MPa)		
Type de l'écrasement	Flexion (4*4*16)	Compression (4*4*16)
28 jours	1.58	13.30

III.9 Méthodes d'essais

III.9.1 Dispositif de mesure

Pour faire les essais thermiques, nous avons réalisé un dispositif en bois, qui s'adapte aux plaques fabriquées, d'une manière à mesurer la température (imposer initialement à 50°C) d'un côté et de mesurer sa variation (finale) de l'autre côté. Les dimensions du boîtier réalisé sont représentées sur la Figure III. 15 :

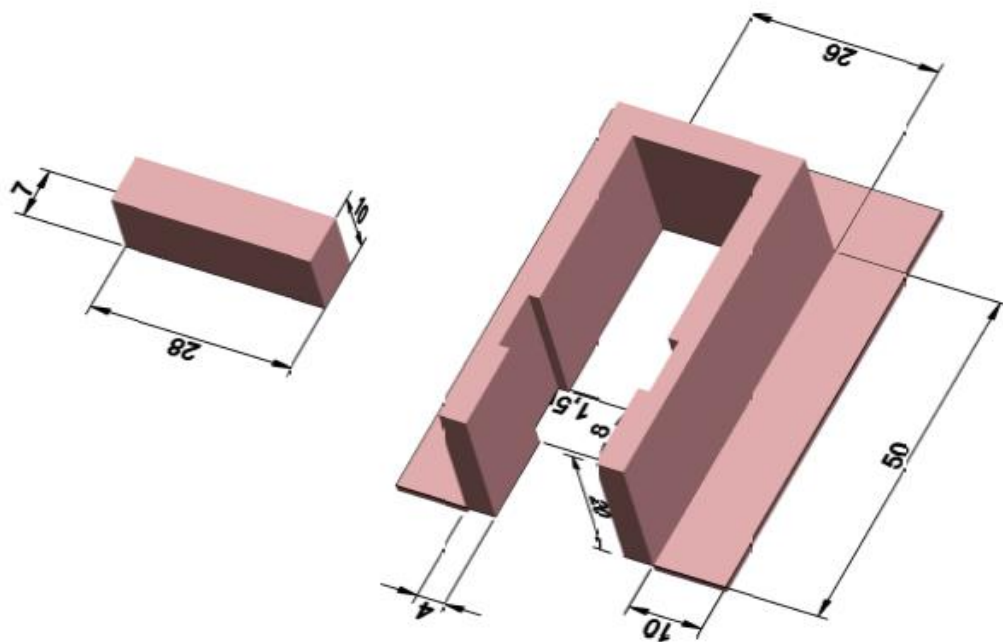


Figure III. 15 : Dimensions (en cm) du dispositif en bois.



Figure III. 16 : Dispositifs en bois utilisés pour l'essai.

III.9.2 Préparation des plaques

Après avoir calculé la formulation du béton, nous avons utilisé les deux tiers d'un moule $7*7*28\text{ cm}^3$. La partie utilisée du moule pour la préparation des échantillons, est d'une longueur de 28 cm, une largeur de 15 cm et une épaisseur de 7 cm (Figure III. 17).



Figure III. 17 : Moule utilisé pour la confection des plaques de béton et de plâtre.

Dans un premier temps, nous avons versé le béton frais au fond du moule, à une hauteur de 4cm. Pour créer une partie creuse, dans laquelle on placera la paraffine par la suite, nous avons utilisé une plaque en bois de dimensions de $1*13*26\text{ cm}^3$. Le mélange est laissé durcir pendant 24h avant d'entamer la deuxième étape.



Figure III. 18 : Préparation de l'échantillon avant la mise en place de la paraffine.

Dans la deuxième étape, nous avons placé la paraffine dans la partie creuse (après l'enlèvement de la plaque en bois). La mise en place de la paraffine (liquide) est effectuée d'une manière à éviter toute infiltration de cette dernière et cela à l'aide d'un papier film en plastique. Une fois la paraffine refroidie, nous avons ajouté la dernière couche du béton (3cm). Pour finir, nous avons laissé les plaques durcir pendant 48h avant de les démouler et les laisser aux conditions du laboratoire. L'opération s'est effectuée de la même manière pour les deux types de paraffine (27°C et 58°C).



Figure III. 19 : Préparation des plaques de béton avec la paraffine.

Le même procédé a été appliqué pour la fabrication des plaques de plâtre (plâtre-paraffine-plâtre).



Figure III. 20 : Préparation des plaques de plâtre avec la paraffine.

Une plaque de béton et une autre de plâtre ont été préparées comme échantillon de référence (sans paraffine).

III.9.3 Protocole de l'essai

- Placer la plaque dans le dispositif.
- Placer des sacs plastiques dans le boîtier pour éviter l'infiltration de l'eau vers la plaque de mesure.
- Chauffer préalablement l'eau par un thermo-plongeur jusqu'à une température de 50°C.
- Verser l'eau dans les sacs placés dans le dispositif (Figure III.21).
- Commencer les prises de température dans les deux faces de la plaque par un thermomètre infrarouge.

Ci-dessous sont listées les différentes étapes d'utilisation du dispositif, que nous illustrerons comme suit :

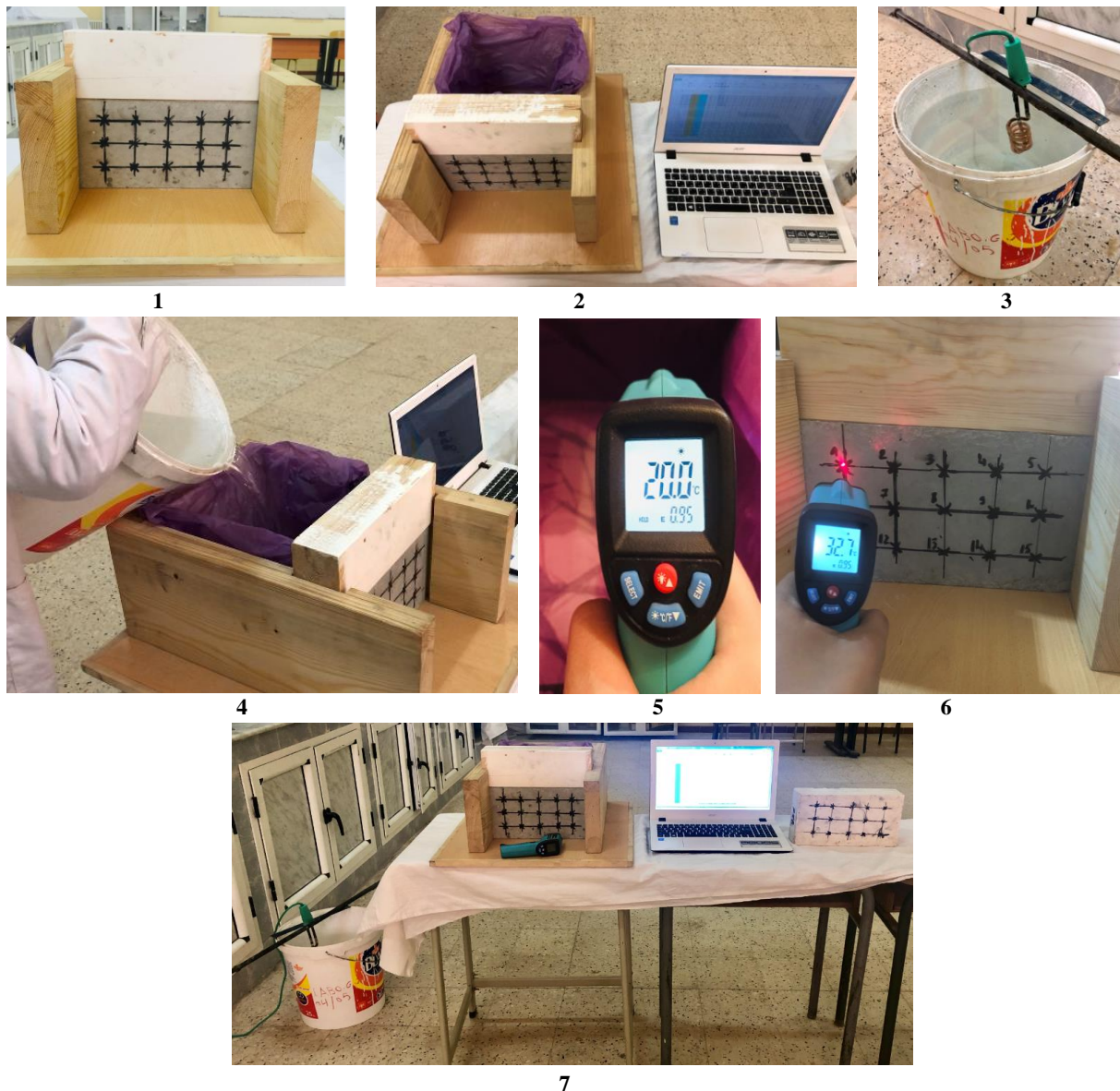


Figure III. 21 : Etapes de préparation de l'essai.

III.9.4 Mode de mesure

III.9.4.1 Présentation du thermomètre infrarouge

Le thermomètre infrarouge est largement utilisé pour mesurer la température de la surface des objets. Il comporte une mesure sans contact sûre, rapide, et précise, idéale pour une utilisation industrielle.

III.9.4.2 Caractéristiques du thermomètre

- Température de mesure sans contact + pointeur laser pour une visée précise, idéale pour mesurer un objet chaud, dangereux ou difficile à atteindre ;
- Emissivité réglable selon différents matériaux ;
- Conversion de l'unité de température C / F (-50 ° C ~ 550 ° C / -58 ° F ~ 1022 ° F) ;
- Mise hors tension automatique en 7 secondes sans aucune opération ;
- Taille compacte, poignée ergonomique, facile à utiliser d'une seule main ;
- Précision de mesure de 12cm de distance.



Figure III. 22 : Thermomètre infrarouge.

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre les essais expérimentaux nous ont fait connaître les caractéristiques ainsi que les propriétés de chaque matériau utilisé, notamment l'essai de point de fusion de la paraffine qui s'est montré très utile car l'utilisation de l'appareil de point de fusion c'est avéré, pour nous une expérience nouvelle et bénéfique. Bien que, nous n'avons pas pu effectuer quelques essais, faute de moyens techniques et de courte durée du projet de fin d'études, tels que : l'essai de la conductivité thermique des matériaux par l'utilisation de la DSC et les essais de l'analyse chimique de la paraffine.

Après réflexion, nous avons pu concevoir un dispositif en bois qui nous a été d'une aide appréciable dans la réalisation des essais thermiques effectués sur les plaques de béton et de plâtre que nous avons préparé par la suite. Ce dispositif a été un outil pour la simulation de notre cas (murs et sols chauffants) et qui va nous aider à contrôler l'évolution de la température en fonction du temps.

Grace au thermomètre infrarouge nous avons pu mesurer les températures surfaciques des plaques d'une manière instantanée et avec une bonne précision.

Chapitre IV

Résultats et
interprétations

IV.1 Introduction

La technique de chauffage ou de refroidissement par murs et/ou planchers chauffants est actuellement en vogue, en raison de l'économie de l'énergie qu'elle offre et de sa façon de diffuser la sensation du confort d'une manière agréable et homogène. Le présent chapitre fait l'objet d'une étude expérimentale sur l'effet de la paraffine sur le comportement thermique des plaques de béton et de plâtre, en vue de leur utilisation dans les murs et/ou planchers chauffants. En plus de l'aspect économique de cette technique, l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP) comme la paraffine contribue à l'emmagasinement ou à la restitution de la chaleur dont on a besoin dans un bâtiment.

Dans notre travail, nous avons eu recours à la préparation de différentes plaques en béton et en plâtre (avec et sans paraffine). Les mesures prises représentent les températures des deux faces de plaques ainsi que la température ambiante. Nous avons aussi développé un modèle numérique pour estimer l'évolution de la température des deux faces (initiale et finale) des plaques étudiées en fonction du temps, l'exploitation et l'interprétation des résultats des mesures seront présentées par la suite.

IV.2 Développement du modèle numérique

Les températures intérieures et extérieures des murs/planchers dans un bâtiment sont deux des plus importantes propriétés physiques et ce sont des paramètres critiques dans la conception technique de tous les processus thermiques qui caractérisent le confort thermique par la suite. Il existe deux approches de base pour estimer la variation de la température des matériaux en fonction de leurs caractéristiques thermiques et physiques. La première approche est basée sur le calcul de flux de chaleur, en s'appuyant sur les résistances thermiques du béton, plâtre et paraffine et en supposant que le transfert thermique se fait perpendiculairement aux échantillons étudiés et d'une manière unidirectionnelle. La deuxième approche est celle d'un transfert de chaleur en fonction de la variation de température et de la capacité thermique massique des matériaux constitutifs des plaques étudiées.

Un modèle numérique a été développé à l'aide des relations des deux approches citées ci-dessus, en utilisant des équations algébriques qui ont été dérivées des équations différentielles de base pour modéliser la courbe de température du système itérativement. Le modèle sera utilisé pour prédire la courbe de température en fonction de leurs propriétés thermiques et physiques.

Étant donné que les résultats d'un modèle simulé varieront en fonction de la quantité du matériau testé, il est nécessaire de déterminer le coefficient de perte de chaleur global pour chaque plaque

Chapitre IV : Résultats et interprétations

testée. Le coefficient de perte de chaleur global (UA) fait référence à la manière dont l'énergie est transférée à travers les matériaux. Une valeur UA doit être calculée pour les états solides et liquides de la paraffine en raison des propriétés différentes du matériau en fonction de l'état physique. Des valeurs vérifiées dans la littérature et des variables spécifiques au système doivent être utilisées pour calculer la valeur UA. Pour commencer, nous devons d'abord calculer le taux de perte de chaleur dans une plaque, comme le montre l'équation IV.1 :

$$Q_p = UA \cdot \Delta T \quad (IV.1)$$

L'équation IV.2 définit ΔT comme la différence de température. Considérons θ_i comme la différence de température.

$$\Delta T = \theta_i \quad (IV.2)$$

L'équation IV.3 représente l'énergie stockée dans un système. En raison de la loi de conservation de l'énergie, on peut affirmer que l'énergie stockée dans un système équivaut à l'énergie émise par ce système, comme le montre l'équation IV.4.

$$Q_s = mC_p \frac{dT}{dt} \quad (IV.3)$$

$$mC_p \frac{dT}{dt} = -UA \Delta T \quad (IV.4)$$

Où C_p est la chaleur spécifique massique du matériau, m est la masse du matériau. L'équation IV.5 est obtenue par considération de l'équation IV.2 dans l'équation IV.4. L'équation IV.5 est réorganisée pour donner l'équation IV.6.

$$mC_p \frac{d\theta}{dt} = -UA \theta \quad (IV.5)$$

$$\frac{d\theta}{\theta} = -\frac{UA}{mC_p} dt \quad (IV.6)$$

Par intégration de l'équation IV.6, on retrouve l'équation IV.7. La représentation graphique de cette équation ($\ln\theta$ en fonction du temps t) peut se corréler selon une ligne droite, comme il est représenté dans la Figure IV.1. La pente de la ligne ajustée peut être calculée comme présenté dans l'équation IV.8. Donc, on obtient l'équation du coefficient de perte de chaleur global du système dans l'équation IV.9.

$$\ln\theta = -\frac{UA}{mC_p} t + \ln\theta_i \quad (IV.7)$$

$$\text{pente} = -\frac{UA}{mCp} \tag{IV.8}$$

$$UA = mCp \cdot \text{pente} \tag{IV.9}$$

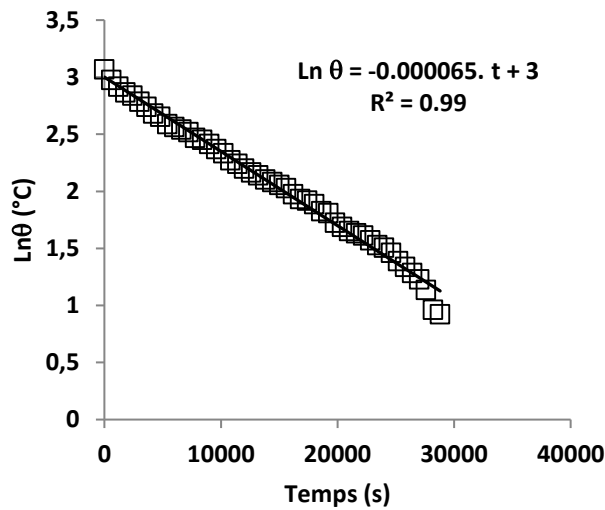


Figure IV. 1 : Représentation graphique de la variation de $\ln\theta$ en fonction du temps (exemple du plâtre).

L'équation algébrique qui sera utilisée pour réaliser le modèle numérique (en utilisant Microsoft Excel) est déterminée selon l'équation IV.4. Nous devons ensuite manipuler cette dernière pour produire l'équation IV.10.

$$T_{t+1} = T_t + \frac{UA}{mCp} \Delta t (\theta_i) \tag{IV.10}$$

Où T_t est la température à l'instant t , et T_{t+1} est la nouvelle température après un intervalle de temps, Δt qui représente le pas du temps, L'équation IV.10 peut alors être utilisée dans Microsoft Excel pour simuler les courbes de températures (initiales, finales et intermédiaires) des plaques étudiées.

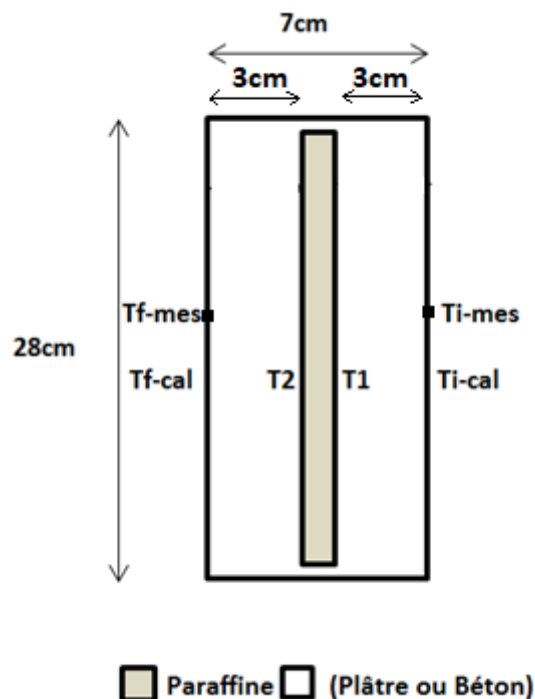
En fin, il est à noter qu'il est nécessaire de prendre en considération la variation des propriétés physiques de la paraffine 27 lors du changement de phase (c-à-dire lorsque la température de fusion de la paraffine est atteinte) dans les calculs.

Cette démarche permet d'estimer la température initiale dans les plaques. L'estimation des températures intermédiaires et finales sera effectuée à l'aide des caractéristiques physiques des matériaux (conductivité thermique et épaisseur de chaque matériau).

IV.3 Présentation des résultats

Une série de mesure des températures initiales et finales des deux faces des plaques préparées, a été effectuée. Les résultats enregistrés donnent une idée sur l'évolution des températures de surface dans un mur/plancher chauffant.

Le but de ces mesures est de voir la réponse (température) finale des plaques, en fonction des matériaux utilisés, à savoir : béton seul, plâtre seul, béton et paraffine 58, plâtre et paraffine 58, béton et paraffine 27, plâtre et paraffine 27, soient au total 6 échantillons. En plus, notre but est de mettre en évidence un modèle numérique, permettant d'estimer la température finale et les températures intermédiaires dans les plaques (la Figure IV. 2 montre la légende des températures dans une plaque quelconque).



Tf-mes, Tf-calc : Températures finales mesurées et calculées respectivement.

Ti-mes, Ti-calc : Températures initiales mesurées et calculées respectivement.

T1, T2 : Températures intermédiaires.

Figure IV. 2 : Schéma explicatif de différentes températures mesurées et calculées dans une plaque.

La variation de la température initiale a été effectuée à l'aide de l'eau chauffée préalablement avec un thermoplongeur jusqu'à une température d'environ 50°C avant de la laisser refroidir naturellement dans les conditions du laboratoire. Le choix de cette méthode est dans le but de simuler l'eau chaude qui circule dans les serpentins (mur et plancher) et d'avoir approximativement

Chapitre IV : Résultats et interprétations

les mêmes conditions initiales dans toutes les plaques testées, afin d'avoir la possibilité de faire une comparaison entre la réponse (température finale) de chaque plaque par la suite.

Les caractéristiques des matériaux utilisés dans le modèle numérique sont présentées dans le Tableau IV.1. Les paramètres lors du développement du modèle (pente, UA et coefficients de corrélations) sont récapitulés dans le Tableau IV.2. Les valeurs de ce dernier tableau sont calculées selon une régression linéaire (selon une droite de l'équation IV.7 et les équations IV.8 et IV.9).

Tableau IV. 1: Propriétés physiques et thermiques des matériaux utilisés dans le modèle [Passive Act, 2019 ; Wikipedia, 2019 ; Aadmi et al, 2013].

Matériaux		Conductivité thermique (W/m ^{°K})	Capacité thermique massique (J/kg ^{°K})	Masse volumique (kg/m ³)
Béton		1.8	1000	2300
Plâtre		0.25	1000	825
Paraffine 58		0.4	3310	1392
Paraffine 27	Solide	0.24	2400	870
	Liquide	0.15	1800	760

Tableau IV. 2: Paramètres du modèle (pente, coefficient global de perte de chaleur).

Plaque	Pente	UA	R ²
Plâtre	-0.000065	0.127	0.99
Plâtre +Paraffine 58	-0.000072	0.060	0.97
Plâtre +Paraffine27	-0.000085	0.071	0.97
Béton	-0.000090	0.490	0.96
Béton +Paraffine58	-0.000065	0.151	0.98
Béton +Paraffine27	-0.000080	0.184	0.98

IV.3.1 Cas du plâtre

La Figure IV. 3 représente la variation, en fonction du temps, des températures initiales mesurées et calculées (Ti-mes et Ti-cal) et les températures finales mesurées et calculées (Tf-mes et Tf-cal) d'une plaque fabriquée en plâtre. La ligne droite dans la figure correspond à une température constante de 27°C, qui a été choisie généralement comme une valeur moyenne caractérisant la température du confort (Tc).

Les températures finales mesurées montrent que le plâtre est un bon isolant thermique (la température finale ne dépasse pas 21°C et les deux courbes ne se coïncident plus au cours de toute la durée de mesure).

La Figure IV. 3 montre aussi que les résultats de modélisation numériques (températures calculées) sont en bon accord avec les températures mesurées. Malgré qu'on puisse déduire, d'une part, qu'un mur équipé intérieurement en plaque de plâtre est très avantageux, puisqu'il empêche la chaleur de s'échapper vers l'extérieur, il est d'autre part déconseillé dans le cas des murs chauffants, à raison de sa forte isolation thermique qui empêche la chaleur issue de l'eau chaude des serpentins de se propager vers l'intérieur de la pièce.

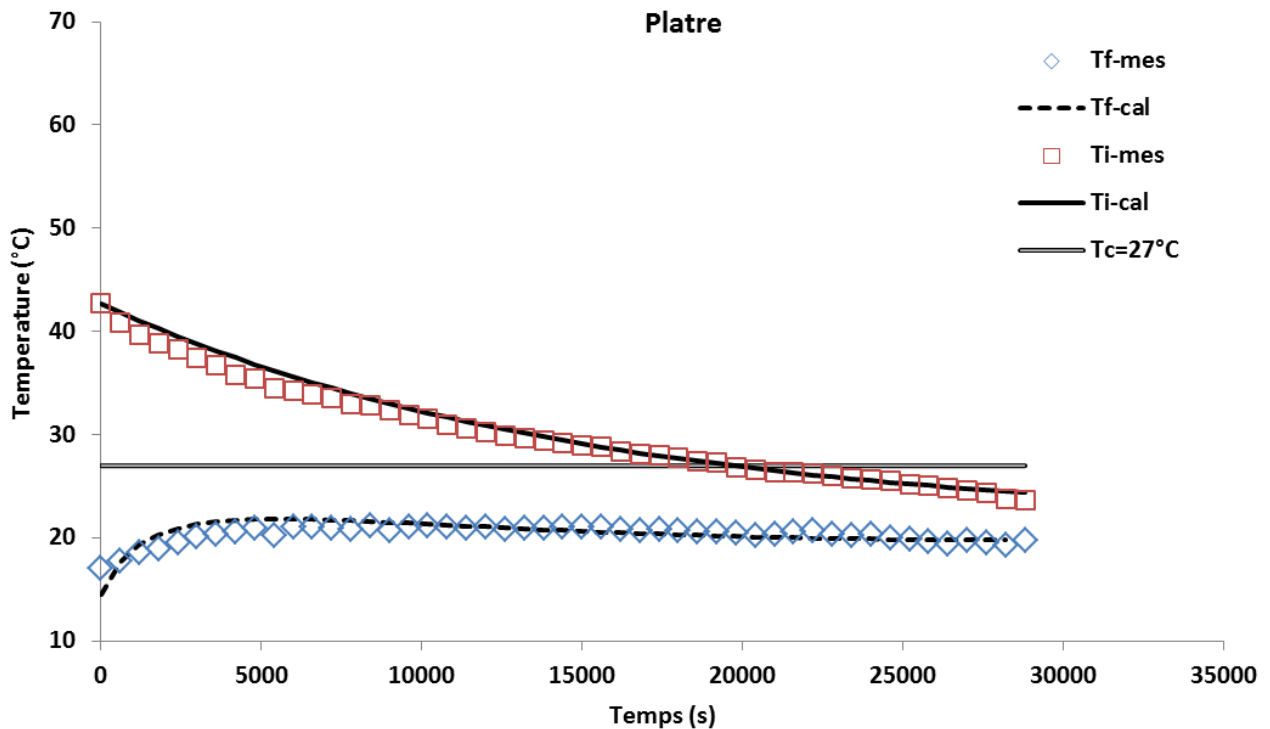


Figure IV. 3 : Variations des températures initiales et finales mesurées et calculées (Ti-mes, Ti-cal, Tf-mes et Tf-cal) d'une plaque fabriquée en plâtre.

IV.3.2 Cas du plâtre avec paraffine 58

L'évolution de différentes températures mesurées et calculées dans le cas de l'utilisation de la paraffine 58 avec le plâtre sont présentées dans la Figure IV. 4. Contrairement au comportement du plâtre seul, on remarque que les températures finales mesurées sont légèrement plus grandes (jusqu'à 24°C).

Ces résultats montrent, d'une part, que la paraffine 58 est un mauvais isolant par rapport au plâtre et d'autre part elle contribue à l'emmagasinement de l'énergie, comparativement au plâtre seul, bien que la température de fusion (58°C) n'aboutisse plus lors de notre expérience. Dans le cas du plâtre seul, la température initiale n'atteint pas 27°C qu'après environ 20000 s (5h30min), par contre dans le cas du plâtre avec la paraffine 58, cette température est achevée à environ 30000 s (8h20min).

D'autre part, on observe un bon accord entre les températures initiales et finales mesurées et celles issues du modèle numérique, sauf une certaine différence enregistrée après environ 30600 s (8h30min), probablement causée par une diminution de la température ambiante du laboratoire en fin de journée. Le modèle permet aussi d'estimer les températures intermédiaires (T1-cal et T2-cal) dans les deux côtés, entre la paraffine 58 et le plâtre.

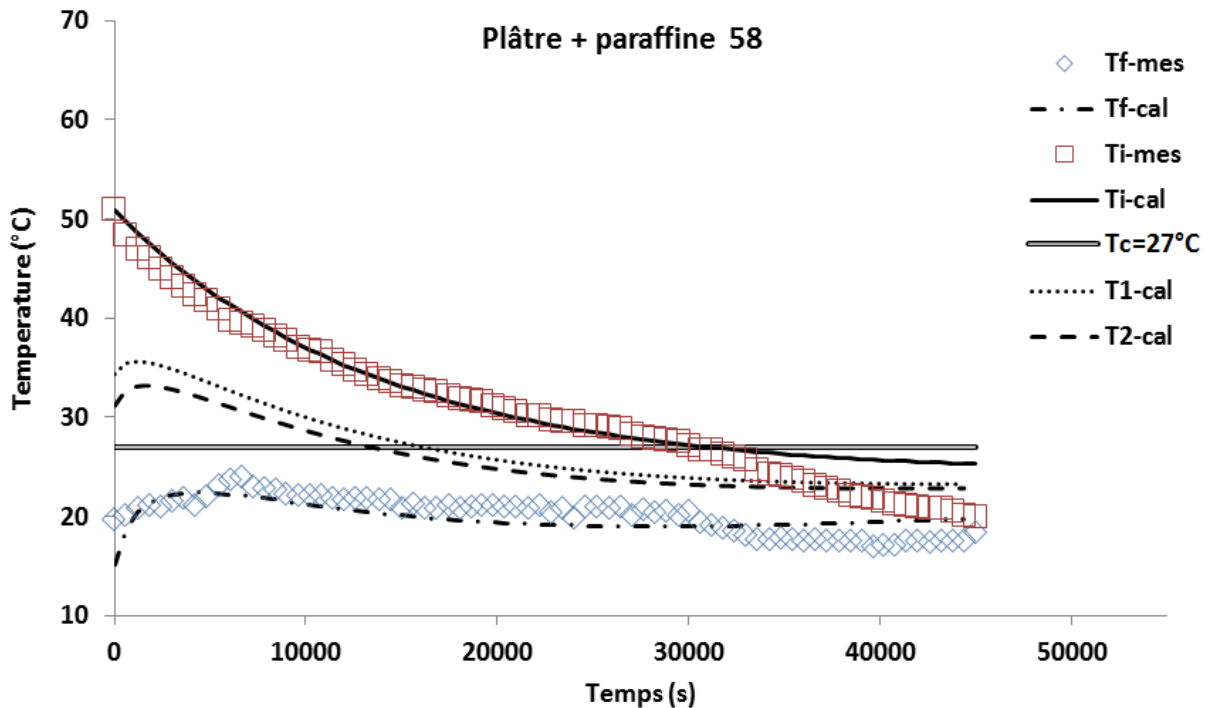


Figure IV. 4 : Variations des températures initiales et finales mesurées et calculées (Ti-mes, Ti-cal, Tf-mes et Tf-cal) et des températures intermédiaires calculées (T1-cal et T2-cal) d'une plaque fabriquée en plâtre et la paraffine 58.

IV.3.3 Cas du plâtre avec paraffine 27

Les résultats des mesures expérimentales et du modèle dans le cas de l'utilisation du plâtre avec la paraffine 27 sont présentés dans la Figure IV. 5 ci-dessous. Contrairement aux deux cas précédents, on constate qu'après environ 3600 s (une heure), la température finale atteint la valeur 27°C. On constate aussi que la température finale reste dans l'intervalle de 27 à 28 °C jusqu'à 25000 s (environ 7 heures), ce qui permet de rester dans une température de confort plus longtemps que dans les deux cas précédents.

Ces résultats montrent l'effet bénéfique de l'incorporation de la paraffine 27 dans les plaques en plâtre dans l'amélioration du confort thermique. L'utilisation de la paraffine 27 avec le plâtre a donc, amélioré son inertie thermique malgré sa grande aptitude à l'isolation. Cette amélioration est le résultat de la principale caractéristique de la paraffine, en tant que matériau à changement de phase, de stocker ou libérer de l'énergie à 27°C. Donc, l'intégration de la paraffine 27 dans les

plaques en plâtre (adaptées aux murs ou aux plafonds chauffants) peut rendre possible le stockage de quantités importantes de l'énergie thermique et la stabilisation de la température ambiante dans les bâtiments.

On remarque aussi le bon accord du modèle proposé dans l'estimation des températures initiales et finales, ainsi que l'approximation de celles intermédiaires.

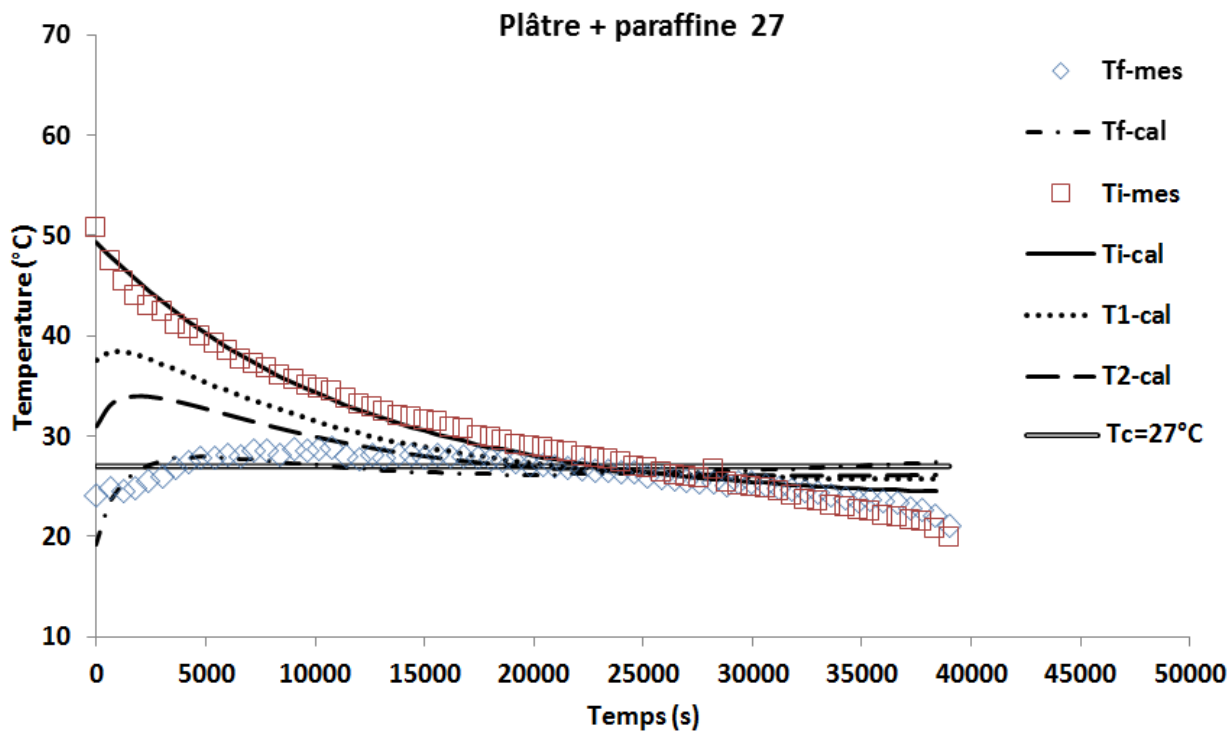


Figure IV. 5 : Variations des températures initiales et finales mesurées et calculées (Ti-mes, Ti-cal, Tf-mes et Tf-cal) et des températures intermédiaires calculées (T1-cal et T2-cal) d'une plaque fabriquée en plâtre et la paraffine 27.

IV.3.4 Cas du béton

L'évolution des températures initiales mesurées et calculées (Ti-mes et Ti-cal) et les températures finales mesurées et calculées (Tf-mes et Tf-cal) d'une plaque fabriquée en béton est donnée par la Figure IV. 6. Ces résultats montrent la mauvaise propriété d'isolation du béton en général, et donc sa faible inertie thermique vis-à-vis des changements de températures intérieures et extérieures. Malgré ce constat, l'utilisation du béton dans un plancher chauffant est par contre très avantageuse dans notre cas, vu sa grande conductivité thermique.

D'après la Figure IV. 6, on remarque que la température finale atteint rapidement la température du 27°C, au bout d'environ 1800 s (30 min), mais elle dépasse la valeur de 30°C rapidement aussi, ce qui crée une sensation d'inconfort et d'une perte inutile de l'énergie, ce qui peut être expliqué par sa faible inertie thermique. Au contraire au cas du plâtre, le matériau béton

facilite la propagation de la chaleur, issue des serpentins du plancher, vers l'intérieur. Mais il est aussi déconseillé de l'utiliser tout seul, puisque dans le cas du béton sa pose le problème de surchauffe (au-delà de 27°C).

Concernant les résultats du modèle, on constate qu'ils sont acceptables et peuvent prévoir les températures initiales et finales avec une bonne approximation.

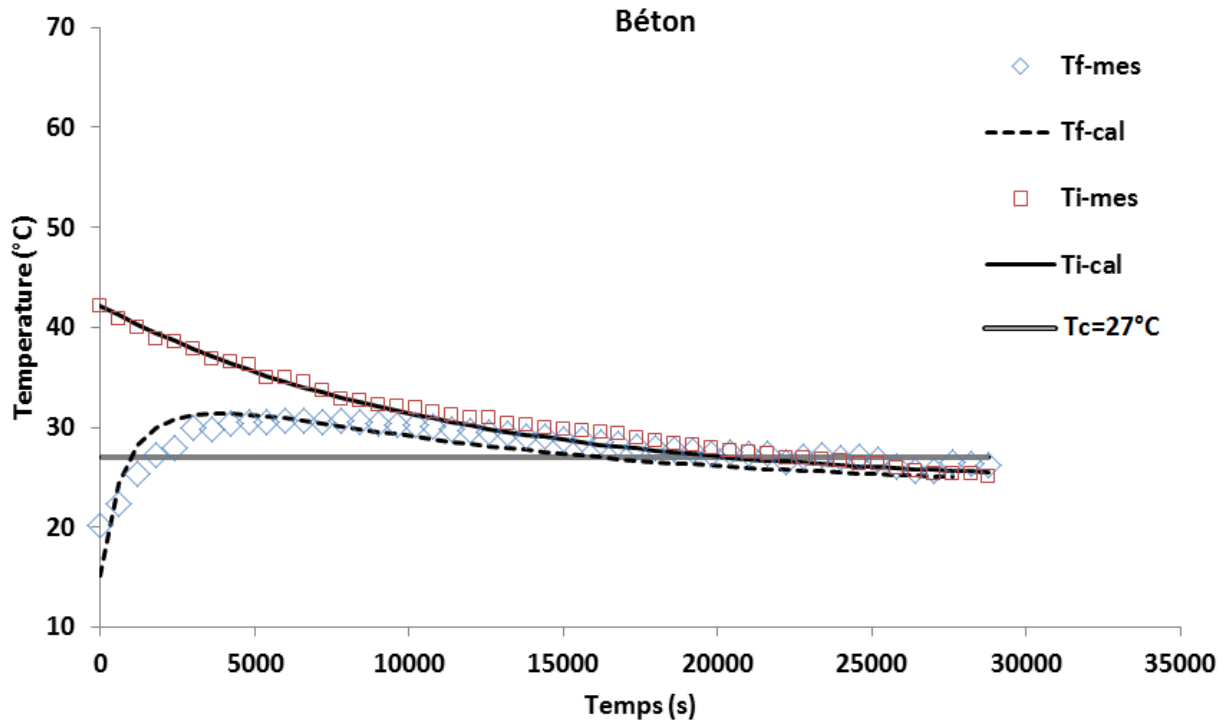


Figure IV. 6 : Variations des températures initiales et finales mesurées et calculées (Ti-mes, Ti-cal, Tf-mes et Tf-cal) d'une plaque fabriquée en béton.

IV.3.5 Cas du béton avec paraffine 58

La Figure IV. 7 présente la variation de différentes températures mesurées et calculées et celles intermédiaires, dans le cas de l'utilisation de la paraffine 58 avec le béton. Les résultats trouvés montrent que les températures finales sont très élevées par rapport au béton seul (dans le cas du béton avec la paraffine 58, elles atteignent environ 35°C au bout d'environ 4200 s (1h10 min) et se coïncident avec les températures initiales et la température de 27°C après environ 30000 s (8h20min).

Ces résultats confirment la bonne conductivité thermique de la paraffine 58 et montrent le double effet de cette conductivité avec le béton, contrairement au plâtre. En outre, l'utilisation de la paraffine avec le matériau béton contribue d'une manière similaire dans le cas de plâtre, d'emmagasiner l'énergie.

Concernant les résultats de la modélisation numérique, nous constatons un désaccord très clair entre les valeurs mesurées et celles calculées, notamment des températures finales. On remarque qu'il y a une sous-estimation en premières heures, entre environ 1800 s (30min) et 17400 s (4h50min) et une surestimation au-delà de cette dernière valeur. Cela est peut-être due à la caractéristique de la paraffine 58 tant de matériau à changement de phase, qui a commencé le changement de phase partiel, et qu'on n'a pas pris en considération dans l'établissement du modèle. Dans notre modèle, on a pris en considération seulement le changement de la paraffine 27.

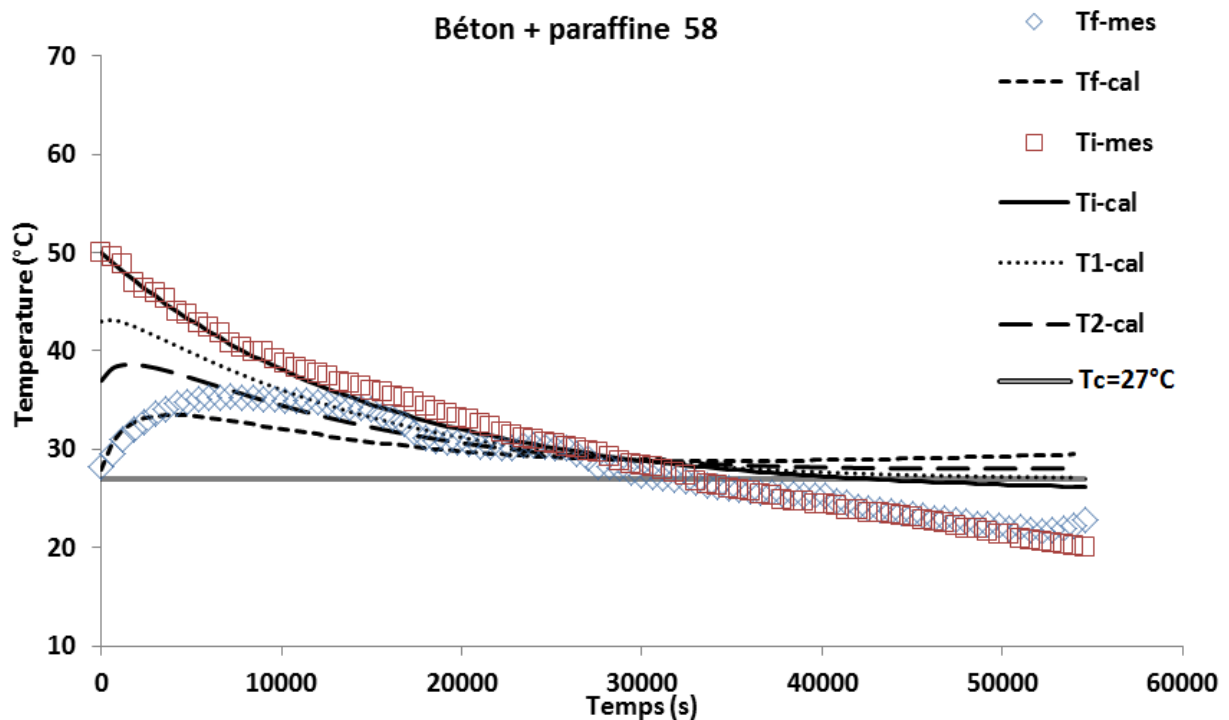


Figure IV. 7 : Variations des températures initiales et finales mesurées et calculées (Ti-mes, Ti-cal, Tf-mes et Tf-cal) et des températures intermédiaires calculées (T1-cal et T2-cal) d'une plaque fabriquée en béton et la paraffine 58.

IV.3.6 Cas du béton avec paraffine 27

En dernier lieu, nous présentons dans la Figure IV. 8 les mesures expérimentales des températures initiales, finales mesurées et calculées ainsi que les températures intermédiaires issues du modèle dans le cas de l'utilisation du béton avec la paraffine 27. Nous constatons, d'après ces résultats que la température de 27°C est atteinte rapidement par rapport au béton seul, mais les températures finales sont légèrement plus amorties par rapport aux celles au cas du béton seul et avec la paraffine 58. On remarque aussi que dans le cas de l'utilisation de la paraffine 27 avec le béton, la température finale retourne à 27°C après environ 28200 s (7h50min), par contre elle fait environ 31800 s (8h50min) pour retourner à cette valeur dans le cas du béton avec la paraffine 58, et environ 22200 s (6h10min) dans le cas du béton seul.

D'après ces résultats, on peut voir l'effet bénéfique de l'intégration la paraffine 58, par rapport à la paraffine 27 et le béton seul, dans le prolongement de la durée de chauffe d'un plancher chauffant, mais avec un inconvénient de surchauffe dans le cas de l'utilisation de la paraffine 58.

Nous remarquons aussi que le modèle développé prévoit d'une manière acceptable les températures des surfaces et intermédiaires, malgré le léger désaccord aux premières et dernières heures de l'essai.

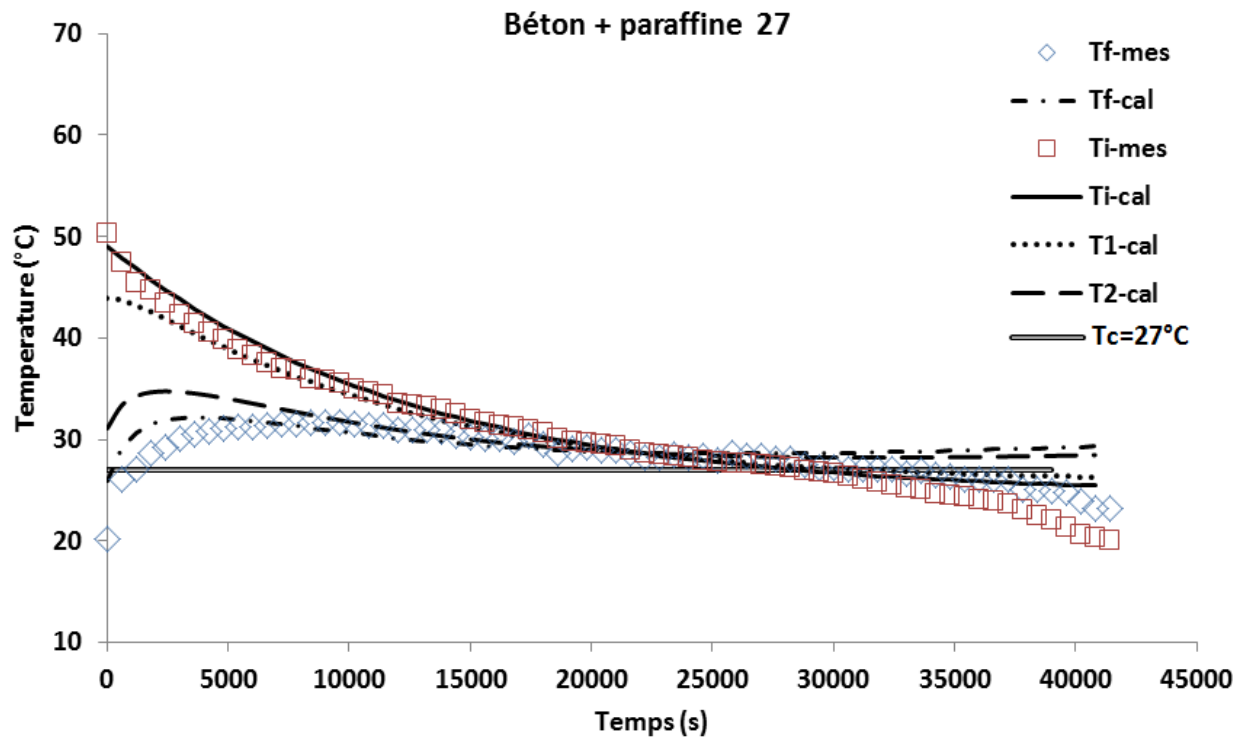


Figure IV. 8 : Variations des températures initiales et finales mesurées et calculées (Ti-mes, Ti-cal, Tf-mes et Tf-cal) et des températures intermédiaires calculées (T1-cal et T2-cal) d'une plaque fabriquée en béton et la paraffine 27.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les résultats de l'effet de chaque paraffine incorporée dans les plaques de béton et de plâtre sur le confort thermique du bâtiment. L'utilisation de la paraffine 27 dans les plaques en plâtre permet de garder leur température entre 27°C et 28°C pendant presque 7 heures, ce qui améliore son inertie thermique et ce qui confirme la capacité de cette paraffine de stocker et déstocker de l'énergie.

En intégrant la paraffine 27 dans le béton, une diminution de son taux de conductivité thermique aura lieu sans aucune perte d'énergie, ce qui est avantageux économiquement.

Le modèle développé dans cette étude nous a aidé d'établir une estimation de l'évolution des températures des deux faces (initiale et finale) des plaques étudiées en fonction du temps. Les résultats développés par ce dernier sont, généralement, en bon accord avec les mesures expérimentales dans le cas du plâtre avec et sans présence de paraffine et semblent être acceptables dans le cas du béton seul, bien qu'ils présentent quelques désaccords dans le cas du béton avec la paraffine (58 et 27).

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail avait pour objectif d'améliorer le confort thermique dans les bâtiments et cela en utilisant comme matériaux à changement de phase deux types de paraffine à températures de fusion différentes (58°C et 27°C). Notre but était d'évaluer l'effet de l'utilisation de ces paraffines sur le comportement thermique, lorsque ces dernières sont utilisées dans des planchers et murs chauffants. Une campagne expérimentale a été menée, en se basant sur des mesures de températures des surfaces des plaques fabriquées en béton et plâtre. Ensuite, une modélisation du comportement thermique de ces plaques en fonction de différentes caractéristiques thermo-physiques des matériaux utilisés.

A l'issue de cette recherche, nous avons pu aborder la notion des matériaux à changement de phase et leurs applications dans le domaine de génie civil. Nous avons aussi affronté la notion du confort thermique et les paramètres influant ce dernier tout en essayant de proposer l'utilisation des deux types de paraffine étudiées dans des murs et planchers chauffants. A cet effet, six (06) différentes plaques ont été proposées : plâtre seul, plâtre avec la paraffine 58, plâtre avec la paraffine 27, béton seul, béton avec la paraffine 58, et le béton avec la paraffine 27. Pour avoir des comparaisons entre les résultats trouvés, en termes de température, nous avons choisi la température 27°C comme température de référence du confort thermique.

Les résultats trouvés montrent que :

- L'intégration de la paraffine (58 et 27) contribue à l'emmagasinement de l'énergie en comparaison avec les plaques fabriquées avec du béton et plâtre seuls, bien qu'elle soit considérée comme un mauvais isolant.
- L'incorporation de la paraffine 27 dans les plaques de plâtre améliore son inertie thermique malgré sa grande aptitude à l'isolation. Cela est le résultat de la principale caractéristique de la paraffine en tant que matériau à changement de phase, c'est à dire sa capacité de stocker et libérer de l'énergie sous forme de chaleur à la température 27°C. Ce qui peut rendre bénéfique l'intégration de ce type de paraffine dans des planchers et murs chauffants dans les bâtiments. Dans le cas du plâtre seul, nous avons trouvé que les températures initiales restent toujours supérieures à 27°C (durant environ 5h30min), mais avec l'utilisation de la paraffine 58 cette durée se prolonge à environ 8h20min. L'utilisation de la paraffine 27 permet de garder la température des plaques en plâtre entre 27°C et 28°C pendant presque 7 heures.
- Malgré la bonne conductivité thermique du béton et aussi celle de la paraffine 58, l'intégration des paraffines 58 et 27 dans les bétons a aussi montré un comportement similaire à celui du plâtre, en termes d'emmagasinement de chaleur. D'autre part, dans le

Conclusion générale

cas des plaques avec béton seul, les températures finales atteignent rapidement 27°C (après environ 30min), elles ne retournent à cette valeur, qu'après 7h50min avec l'utilisation de la paraffine 27 et 8h50 avec la paraffine 58.

- Concernant les résultats du modèle développé, nous avons trouvé qu'ils sont, généralement, en bon accord avec les mesures expérimentales dans le cas du plâtre. Néanmoins, il est à noter qu'ils sont acceptables dans le cas du béton et ils présentent quelques désaccords dans le cas du béton avec la paraffine (58 et 27).

Finalement, le présent travail, qui traite une nouvelle thématique sur les matériaux à changement de phase, au niveau de notre département, nous a permis d'appréhender de nouvelles idées et connaissances, voire proposer une plateforme initiale aux futurs étudiants et doctorants pour développer ce type de sujets à l'avenir.

Recommandations et perspectives

Comme recommandations et perspectives, nous pensons que ce sujet reste très ouvert et nécessite des études plus vastes et complexes afin de mieux comprendre l'effet d'autres paramètres influant le confort thermique. Le développement du mode d'incorporation de la paraffine dans les matériaux cimentaires, peut-être lui aussi l'objet d'une étude approfondie afin de mettre en évidence la faisabilité de l'intégration de ce type de matériaux dans le domaine de construction dans notre pays.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Aadmi M, Karkri M, Trigui A, Elhammouti M, Magali F, 2013. Modélisation du stockage et déstockage d'énergie dans un composite chargé avec un matériau à changement de phase.
- Abhat A, 1978. Investigation of physical and chemical properties of phase change materials for space heating/cooling applications. In: Proc. of the international solar energy.
- Abhat A, 1983. Low temperature latent heat thermal energy storage: Heat storage materials. Solar energy, Vol 30, pp 313–332.
- Abhat A, Heine D, M, Heinisch. A, Malatidis N. G et Neuer. 1981. Development of a modular heat exchanger with integrated latent heat energy store. Tech. rept. BMFT FBT 81-050. Germany Ministry of Science and Technology Bonn.
- Ahmad M, 2004. Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Thèse de doctorat. Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- Akrouche A, 2011. Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase. Mémoire de Magister. Université M'Hamed Bougara, Boumerdes.
- BASF, We create chemistry. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.basf.fr/ecp2/France/fr/>.
- Belkowsky S, 1978. Déperditions calorifiques et isolation thermique des habitations. Editions. Techniques et vulgarisation, Paris.
- Belouadeh C, 2012. Contribution à l'élaboration des matériaux à changement de phase par microencapsulation (Application au textile). Master académique. Université Kasdi Merbah Ourgla.
- Benhouhou M, 2012. L'impact des matériaux sur le confort thermique, dans les zones semi-arides CAS D'ETUDE : LA VILLE DE DJELFA.
- Buddhi D, Sawhney. R. 1994. Proc: Thermal energy storage and energy conversion. School of Energy and Environmental Studies.
- Cantin R, Moujalled B, Dr HDR, Guarracino G, 2005. Complexité du confort thermique dans les bâtiments. In actes du 6ème congrès européen de science des systèmes, tenu à Paris.
- Dauvergne J.L, 2008. Réduction et inversion de modèles de conduction thermique avec changement de phase. Ph.D these. Université de Bordeaux 1.
- Dinçer et Rosen, 2002. Thermal energy storage systems and applications. Wiley and Sons Publishing Company, New York, USA.
- Dumas J. P, 2002. Stockage du froid par chaleur latente. Techniques de l'ingénieur, 10 Juillet.
- Festa J, Dreux G, Nouveau guide du béton et de ses constituants. Edition Eyroles.

Références bibliographiques

- Gaz métro la vie en bleu. « Plancher chauffant : un système confortable ». Lien : https://www.energir.com/~media/Files/Constructeurs/Plancher-chauffant_final.pdf?la=fr.
- Gharssallaoui A, Roudaut G, Chambin O, Voilley A, Saurel R, 2007. Applications of spraydrying in microencapsulation of food ingredients: An overview. Food research international.
- Givoni B, 2009. L'homme, l'architecture et le climat. Editions du Moniteur, Paris 1978. B. VU Le guide de l'habitat passif. Edition EROLLES, Saint-Germain, Paris.
- Guichard S, 2013. Contribution à l'étude des parois complexes intégrant des matériaux à changement de phase : Modélisation, expérimentation et évaluation de la performance énergétique globale. Physique générale [physics.gen-ph]. Université de La Réunion. Français.
- Hasnain S.M, 1998. Review on sustainable thermal energy storage technologies, part i: heat storage materials and techniques. Energy conversion and management, pages: 1127–1138.
- Hawes D.H, Feldman D, 1992. Absorption of phase change materials in concrete, Solar Energy Materials and Solar Cells. Vol. 27, pp. 91 – 101.
- Hawes D.W, Banu D, Feldman D, 1993. Latent heat storage in building materials, Energy and Buildings, Vol. 20, pp. 77-86.
- Hongois S, 2011. Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle. Thèse de doctorat. INSA de Lyon, France.
- Izard J-L, 1993. Architecture d'été – Construire pour le confort d'été. Editions EDISUD, France.
- Jacquin P.C, Bertrand J.F, 2013. Le stockage massif de l'énergie. Panorama. [En ligne]. Disponible sur : <http://08-VF-Panorama-2013-Le-stockagemassif-de-l-energie.pdf>.
- Laghzaoui A, Peerhossaini D, 2010. Stockage de chaleur : Energie solaire et autres applications. Etude bibliographique, Ecole des mines de Douai.
- Lane G.A, Glew D.N, 1975. Heat of fusion system for solar energy storage. In. proceedings of the workshop on solar energy storage subsystems for the heating and cooling of buildings.
- Lane G.A, 1983. Latent heat materials. Crc press, boca raton, florida., Vol 1.
- Langlais C, Klarsfeld S, 1997. Isolation thermique à température ambiante. Bases physiques. Techniques de l'ingénieur, document n° BE 9 860, France.
- Le monde.fr. « Chauffage par le sol et plancher chauffant : avantages, inconvénients ». Lien : <https://jardinage.lemonde.fr/dossier-1705-chauffage-sol-plancher-chauffant.html>
- Legrand P, Benoit J.P, Briançon S, Fattal E, Fessi H, Passirani C, 2007. Sphéroïdes et formes vectorisées. Maloine. Pharmacie Galénique : Formulation et Technologie pharmaceutique, Maloine, pp.221-250. <Hal-00385473>.

Références bibliographiques

- Liebard A, De Herde A, 2005. Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatique : Concevoir, édifier et aménager avec le développement durable. Editions Observ'ER, Paris.
- Madjoudj N, Imessad K, 2016. Matériau à changement de phase au service de la bioclimatique. Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER B.P. 62, route de l'observatoire, Bouzaréah, 16340 Algiers, Algeria (reçu le 10 Décembre - accepté le 25 Décembre 2016). Revue des Energies Renouvelables Vol. 19 N°4 (2016) 647 – 662).
- Mansouri Y, 2003. Conception des enveloppes de bâtiments pour le renouvellement d'air par ventilation naturelle en climats tempérés proposition d'une méthodologie de conception. Thèse de doctorat, à l'Ecole d'Architecture de Nantes.
- Mazari M, 2012. Etude et évaluation du confort thermique des bâtiments à caractère public, cas du département d'architecture de Tamda (Tizi-Ouzou). Université de Tizi-Ouzou.
- Mazman M, 2006. Latent Heat Storage and Applications. PhD thesis, Ç.Ü. Institute of Natural and Applied Sciences, Adana. (In Turkish) 110.
- Mehling H, Cabeza L.F, 2008. Heat and cold storage with PCM, an up to date introduction in to basics and applications. Springers.
- Merzg A, 2010. La réhabilitation thermique de l'habitat contemporain en Algérie. Mémoire de magister. Université Mouloud Mammeri, Tizi Ouzou.
- Mettler Toledo. « Point de fusion : Définition et mesure ». Lien : <https://www.mt.com/fr/fr/home/library/know-how/lab-analytical-instruments/coment-mesurer-le-point-de-fusion.html>.
- Odru P, 2013. Le stockage de l'énergie. 2eme édition, Broché.
- Oreka maison. « Choisir son mode de chauffage ». Lien : <https://chauffage.ooreka.fr/astuce/voir/748517/mur-chauffant>.
- Ortiz M, Barsun H, He H, Vorobieff P, Mammoli A, 2010. Modeling of a solar- assisted HVAC system with thermal Storage. Energy and Buildings, Vol. 42, pp. 500 - 509.
- Öztürk H.H, 1997. The research on storage of solar energy in phase change material (PCM) for greenhouse heating. PhD Thesis, Ç.Ü. Institute of Natural and Applied Sciences, Adana. (In Turkish).
- Paksoy H.Ö, 1992. Thermal analysis of heat storage materailas and integrated heat Pump and thermal energy storage system. PhD Thesis, Ç.Ü. Institute of Natural and Applied Sciences, Adana. (In English).
- Passiv act actif pour construire passif. « Caractéristiques thermiques et choix des matériaux de construction ». Lien : <https://passivact.fr/Concepts/files/QualiteThermique-CharacteristiquesPhysiques.html>.

Références bibliographiques

- Passive Act actif pour construire passif. « Qualités thermiques comparées des matériaux de construction ». Lien : <https://passivact.fr/Concepts/files/QualiteThermiqueComparaisonsMateriaux.html>.
- Salomon T, Bedel S, 2004. La maison des [mega] watts, le guide malin de l'énergie chez soi. Ed. Terre vivante. Mens. P.16.
- Sharma Atul, Tyagi V.V, Chen C.R, Buddhi D, 2009. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(2), 318 – 345.
- Système D. « Comment installer un système de mur chauffant à eau ». Lien : <https://www.systemed.fr/conseils-bricolage/installer-systeme-mur-chauffant-a-eau,4803.html>.
- Thellier F, Bedrune J.P, Monchoux F, 2012. Le Confort dans le bâtiment : n'oublions pas l'habitant ! : Enseigner l'Electrotechnique et l'Electronique Industrielle.
- Vandamme T, Poncelet D, Subra-Paternault P, 2007. Microencapsulation des sciences aux technologies. Lavoisier.
- Veraj R, Seeniraj B, Hafner B, Faber C, Schwarzer K, 1999. Heat transfer enhancement in a latent heat storage system. *Solar energy*, 65(1 Février), pages 171–180.
- Vitruve, 2004. « De Architectura ». Texte latin. Ed. Bès. Mouzeuil-Saint-Martin. Traduction française par CH. L. Maufra. Paris 1847.
- Vos économies d'énergie. « Le mur chauffant : quel est le fonctionnement d'un mur chauffant ? ». Lien : <https://www.voseconomiesdenergie.fr/travaux/radiateur/mur-chauffant>.
- Wikipédia. « Matériau à changement de phase (thermique) ». Lien : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_%C3%A0_changement_de_phase_\(thermique\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_%C3%A0_changement_de_phase_(thermique)).
- Yinping Z, Guobing Z, Kunping L, Qunli Z, Hongfa D, 2006. Application of latent heat thermal energy storage in buildings: state of the art and outlook. *Building and Environment*.
- Zhang Z.G, Shi G, Wang S, Fang X, Liu X, 2013. Thermal energy storage cement mortar containing N-Octadecane/Expanded graphite composite phase change material. *Renewable Energy* ; Vol. 50, pp. 670 – 675.

Normes

NF P 18-555 : Granulats – Mesures des masses volumiques, Coefficient d'absorption et teneur en eau des sables.

NF P 18-598 : Granulats – Equivalent de sable.

NF P18-560 : Septembre 1990 Granulats. Analyse granulométrique par tamisage.

NFP 18-553 : Granulats. Préparation d'un échantillon pour essai.

NF P 15-358 : AFNOR. Méthode d'essais des ciments – détermination de la consistance- Paris 1990.

Annexes

I. Formulation du béton par la méthode de Dreux Gorisse

La méthode de formulation de Dreux-Gorisse permet de déterminer les quantités optimales des matériaux (eau E, ciment C, sable S, gravillon g et gravier G) nécessaires à la confection d'un mètre cube de béton en Kg/m³ conformément au cahier des charges.

Plusieurs étapes de calcul successives sont nécessaires à l'obtention de la formulation théorique de béton :

- Détermination du rapport C/E.
- Détermination de C et E.
- Détermination du mélange optimal à minimum de vides.
- Détermination de la compacité du béton.
- Détermination des masses de granulats.

I.1 Résistance désirée

Le béton doit être formulé pour qu'à 28 jours sa résistance moyenne en compression atteigne la valeur caractéristique σ'_{28} .

Cette valeur doit, par mesure de sécurité, être supérieure de 15 % à la résistance minimale en compression f_{c28} nécessaire à la stabilité de l'ouvrage.

$$\sigma'_{28} = 1,15 \times f_{c28}$$

$$\sigma'_{28} = 1,15 \times 30$$

$$\sigma'_{28} = 34.5 \text{ Mpa}$$

I.2 Consistance désirée

Bien que le but soit l'étude d'un béton ordinaire, on a opté pour un béton très fluide avec un affaissement au cône d'Abrams > 16 cm (vibration faible).

I.3 Dimensions maximales des granulats

D'après l'analyse granulométrique, le $D_{max} = 15 \text{ mm}$

I.4 Dosage en ciment

Détermination du rapport E/C :

Le rapport C / E est calculé d'après la formule de Bolomey.

$$\sigma'_{28} = G' \cdot \sigma'_{c} \left(\frac{C}{E} - 0.5 \right)$$

Avec :

σ'_{28} = Résistance moyenne en compression du béton à 28 jours en MPa

$\sigma'c$ = Classe vraie du ciment à 28 jours en MPa

C = Dosage en ciment en kg par m³ de béton

E = Dosage en eau total sur matériau sec en litre par m³ de béton

G' = Coefficient granulaire (Tableau.1) fonction de la qualité et de la dimension maximale des granulats.

Tableau.1 : Coefficient granulaire G' en fonction de la qualité et de la taille maximale des granulats D_{max}.

Qualité des granulats	Dimension D _{max} des granulats		
	Fins D _{max} < 12,5 mm	Moyens 20 < D _{max} < 31,5	Gros D _{max} > 50 mm
Excellente	0,55	0,60	0,65
Bonne, courante	0,45	0,50	0,55
Passable	0,35	0,40	0,45

G' = 0.45 (Qualité des granulats bonne).

$\sigma'c = 55$ Mpa

$$\frac{C}{E} = \frac{\sigma'_{28}}{G. \sigma'c} + 0.5$$

Donc :

$$\frac{C}{E} = 1.9$$

Détermination de C :

La valeur de C est déterminée grâce à l'abaque de la (Figure 1) en fonction des valeurs de C/E et de l'affaissement au cône d'Abrams.

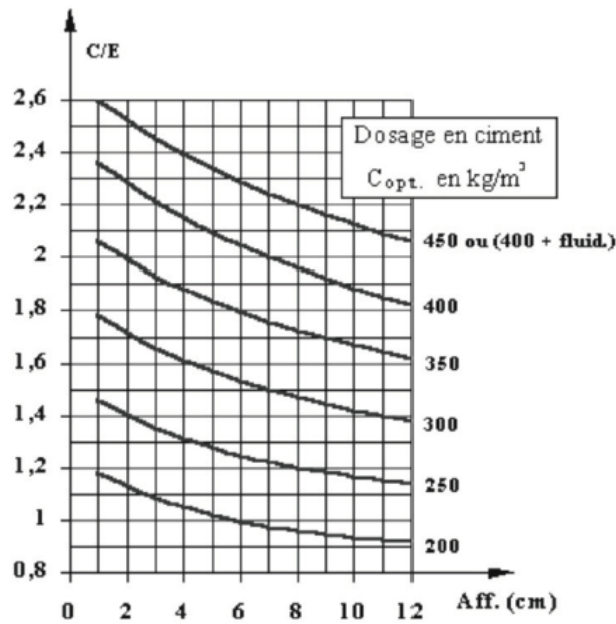


Figure 1 : Abaque permettant la détermination de Copt.

On tire de la courbe ci-dessus le dosage en ciment qui égale à 420 kg/m³

I.5 Dosage en eau

La quantité d'eau E nécessaire à la confection du béton se calcule selon les valeurs de C/E et de C.

$$\frac{C}{E} = 1.9$$

$$E = \frac{C}{1.9} = \frac{420}{1.9}$$

$$E = 221.05 \text{ L}$$

Corrections sur le dosage en ciment C et le dosage en eau E.

Tableau 2 : Correction sur le dosage de pâte en fonction de Dmax.

Dimension maximale des granulats (D_{max} en mm)	5	8	12,5	20	31,5	50	80
Correction sur le dosage de pâte (en %)	+ 15	+ 9	+ 4	0	- 4	- 8	- 12

Dmax = 15mm la correction +4.8.

Donc : C = 440.16

E = 231.66

I.6 Courbe granulaire de référence

Il s'agit de déterminer les pourcentages de sable, de gravillons et de cailloux qui vont permettre la réalisation d'un squelette granulaire à minimum de vides. Les quantités des matériaux de chaque classe granulaire doivent être judicieuses pour que les plus petits éléments viennent combler les vides laissés par les plus gros. La courbe granulométrique théorique d'un matériau à minimum de vides peut être schématisée par une droite brisée. La démarche proposée par Dreux pour déterminer le mélange optimum à minimum de vides est la suivante :

- Tracé de la droite brisée de référence.
- Détermination des pourcentages en volumes absolus de matériaux.
- Tracé de la droite de référence de Dreux.

La droite de référence de Dreux représente la courbe idéale d'un matériau à minimum de vides. C'est une droite brisée dont le point de brisure est défini par son abscisse X et son ordonnée Y :

En abscisse :

$$\text{Si } D_{\max} < 20 \text{ mm} \quad X = D_{\max} / 2$$

$$\text{Si } D_{\max} > 20 \text{ mm} \quad \text{Module}(X) = (\text{Module}(D_{\max}) + 38) / 2$$

En ordonnée :

Où

$$K' = K + K_s + K_p$$

$$Y_A = 50 - \sqrt{D} + K + K_s + K_p$$

Y est donné en pourcentage de passants cumulés.

K est un coefficient donné par le Tableau 3, K_s et K_p étant des coefficients correctifs définis.

Par :

K_s (correction supplémentaire fonction de la granularité du sable).

K_s = (6 M_{fs} - 15) avec M_{fs} le module de finesse du sable.

K_p (correction supplémentaire si le béton est pompable).

K_p = +5 à +10 selon le degré de plasticité désiré.

Tableau 3 : Fonction de la forme des granulats, du mode de vibration et du dosage en ciment.

Vibration		Faible		Normale		Puissante	
Forme des granulats (du sable en particulier)		Roulé	Concassé	Roulé	Concassé	Roulé	Concassé
Dosage en Ciment	400 + Fluide	- 2	0	- 4	- 2	- 6	- 4
	400	0	+ 2	- 2	0	- 4	- 2
	350	+ 2	+ 4	0	+ 2	- 2	0
	300	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4	0	+ 2
	250	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6	+ 2	+ 4
	200	+ 8	+ 10	+ 6	+ 8	+ 4	+ 6

Pour une vibration faible et graviers concassés et dosage en ciment $C = 440 \text{ Kg/m}^3$ on aura d'après le Tableau.3 : $K = +2$

$K_s = -2.7$

$K_p = 0$

Donc $Y_A = 50 - \sqrt{15} + 2 - 2.7 = 45.42$

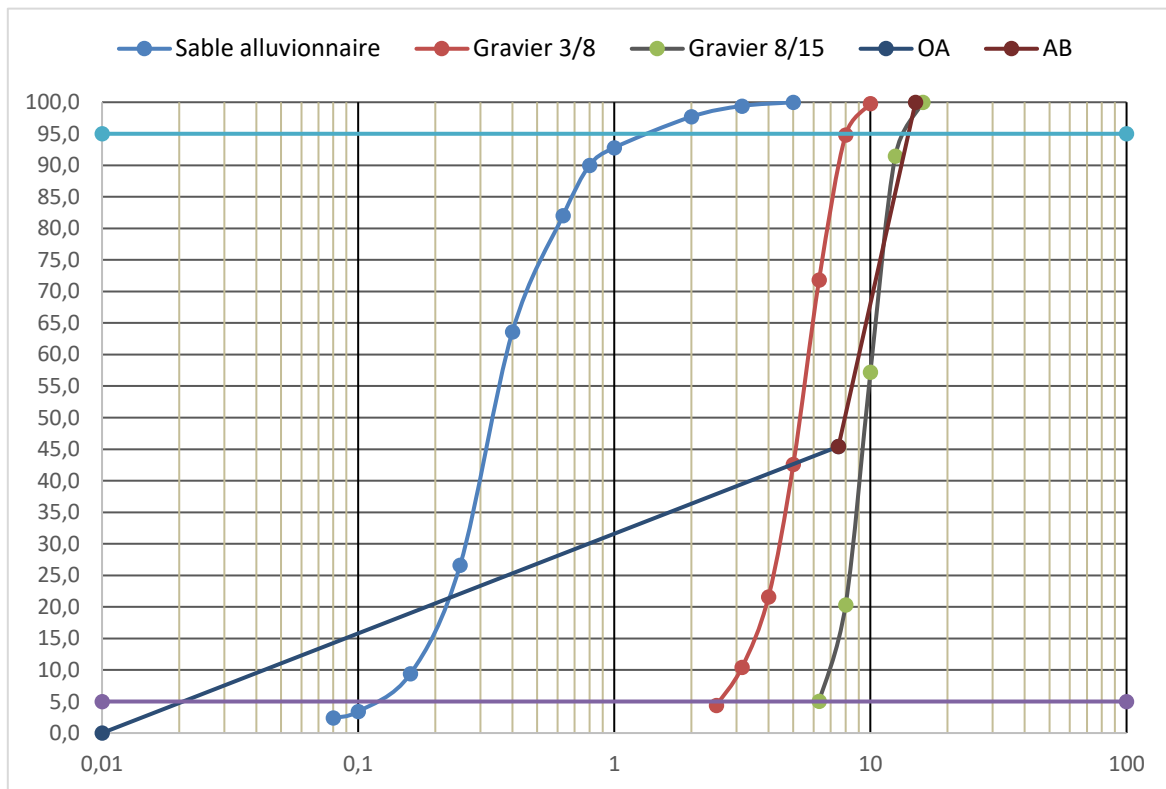


Figure 2 : Détermination des pourcentages en volumes absolus du matériau.

- Sable alluvionnaire 36%
- Gravier 3/8 9%
- Gravier 8/15 55%

I.7 Détermination de la compacité du béton

Pour déterminer les masses de granulats entrant dans la composition de béton, il est nécessaire de déterminer la compacité du béton qui correspond au volume absolu en m³ de solide contenu dans un mètre cube de béton (volumes absolus de ciment, de sable, de gravette et de gravier). Sa valeur de base c₀ est fonction de la taille des granulats, de la consistance du mélange et des moyens de vibration mis en œuvre (Tableau.7). Des corrections (c₁, c₂ et c₃) fonctions de la forme des granulats, de la masse volumique des granulats et du dosage en ciment, doivent être apportées (Tableau.7) :

$$c = c_0 + c_1 + c_2 + c_3$$

La valeur de la compacité c du béton permet de déterminer le volume total absolu V de granulats intervenant dans la formulation du béton :

$$V = (c - V_c)$$

Où

V_c est le volume de ciment défini par $V_c = C / \rho_s(c)$.

Où

$\rho_s(c)$ est la masse volumique absolue du ciment utilisé.

Tableau.7 : Compacité du béton en fonction de D_{max}, de la consistance et du serrage.

Consistance	Serrage	Compacité (c ₀)						
		D _{max} = 5	D _{max} = 8	D _{max} =12,5	D _{max} = 20	D _{max} =31,5	D _{max} = 50	D _{max} = 80
Molle (TP-FI)	Piquage	0,750	0,780	0,795	0,805	0,810	0,815	0,820
	Vibration faible	0,755	0,785	0,800	0,810	0,815	0,820	0,825
	Vibration normale	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
Plastique (P)	Piquage	0,760	0,790	0,805	0,815	0,820	0,825	0,830
	Vibration faible	0,765	0,795	0,810	0,820	0,825	0,830	0,835
	Vibration normale	0,770	0,800	0,815	0,825	0,830	0,835	0,840
	Vibration puissante	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
Ferme (F)	Vibration faible	0,775	0,805	0,820	0,830	0,835	0,840	0,845
	Vibration normale	0,780	0,810	0,825	0,835	0,840	0,845	0,850
	Vibration puissante	0,785	0,815	0,830	0,840	0,845	0,850	0,855

Nota:

* Ces valeurs sont convenables pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

Sable roulé et gravier concassé (c₁ = - 0,01) Sable et gravier concassé (c₁ = - 0,03)

* Pour les granulats légers on pourra diminuer de 0,03 les valeurs de c : (c₂ = -0.03)

* Pour un dosage en ciment C \square 350 kg/m³ on apportera le terme correctif suivant : (c₃ = (C - 350) / 5000)

$\gamma = 0.798$. Cette valeur est convenable pour des granulats roulés sinon il conviendra d'apporter les corrections suivantes :

Sable roulé et gravier concassé (c₁ = - 0,01).

$$\text{Donc } \gamma = 0.798 - 0.01 = 0.788$$

I.8 Dosage des granulats

Volume absolu des grains de ciment

$$c = \frac{C}{3} \quad c = \frac{440.16}{3} = 146.72$$

Volume absolu de l'ensemble des granulats

$$V = 1000 \gamma - c$$

$$V = 1000 * 0.788 - 146.16$$

$$V = 641.28 \text{ l}$$

Connaissant le volume total absolu des granulats (V) et les pourcentages en volume absolue de sable (S%), de gravillon (g %) et de gravier (G %), il est alors possible de déterminer les volumes de sable (Vs) de gravillon (Vg) et de gravier (VG) ainsi que leurs masses respectives (S, g et G) :

$$V_s = V * S \% \quad V_s = 641.28 * 36 \% \quad V_s = 230.86$$

$$V_g = V * g \% \quad V_g = 641.28 * 9 \% \quad V_g = 57.72$$

$$V_G = V * G \% \quad V_G = 641.28 * 55 \% \quad V_G = 352.70$$

$$S = V * S \% * \rho_s(S) \quad S = 230.86 * 2.43 \quad S = 560.98$$

$$g = V * g \% * \rho_s(g) \quad g = 57.72 * 2.46 \quad g = 141.99$$

$$G = V * G \% * \rho_s(G) \quad G = 352.70 * 2.57 \quad G = 906.43$$

Pour 1 m³ de béton

$$C = 440 \text{ Kg/m}^3$$

$$S = 560.98 \text{ Kg/m}^3$$

$$g = 141.99 \text{ Kg/m}^3$$

$$G = 906.43 \text{ Kg/m}^3$$

$$\text{Eff} = 231.66$$

$$\text{Eab} = 39.71$$

$$\text{Etot} = 271.37$$

$$- \text{E/C} = 0.52$$

$$- \text{C/E} = 1.9$$

$$- \text{G/S} = 1.86$$

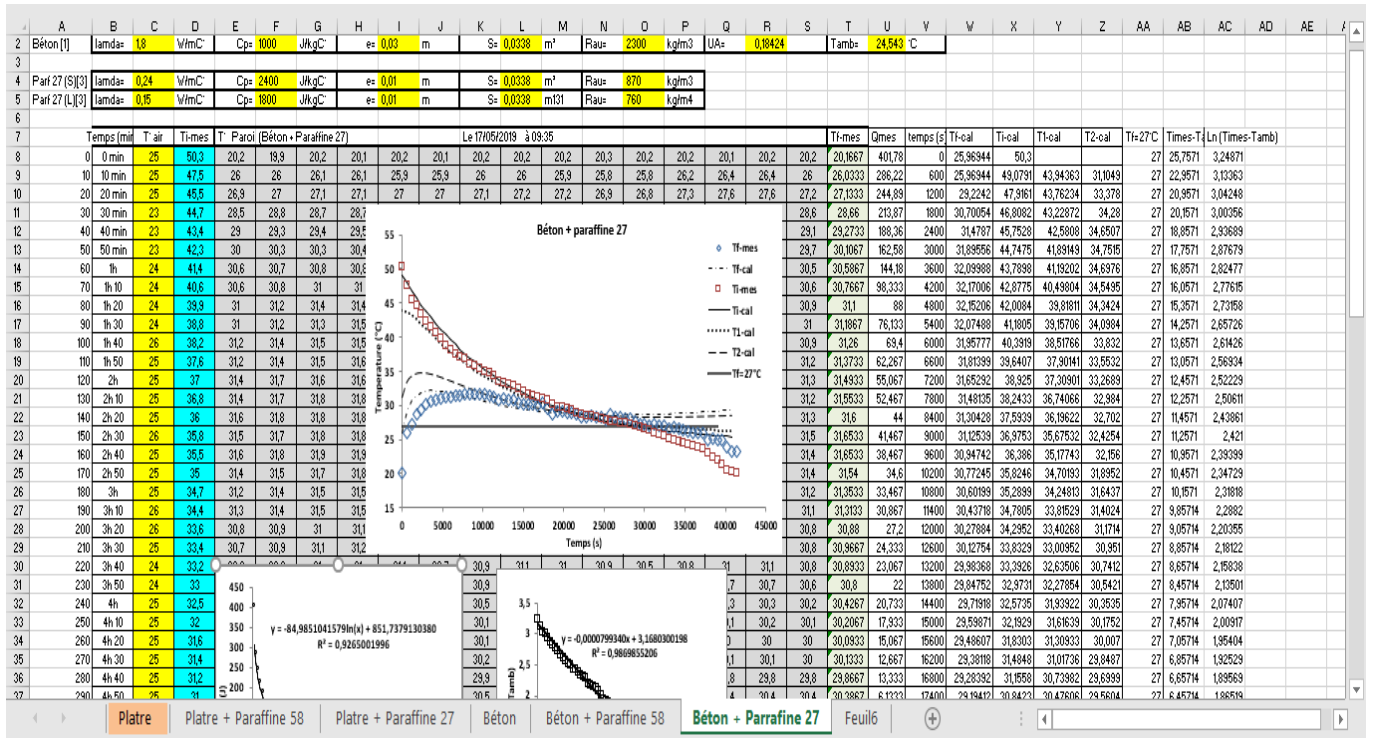


Figure 3: Exemple d'une feuille d'Excel utilisée dans l'élaboration du modèle (Cas de béton + paraffine 27).

عنوان المذكرة: تحسين الراحة الحرارية في المباني باستخدام مواد تغيير الطور

الموثر: بوزياني طيب

الطالبة : تخي كوثر

الطالبة: مراد رفيقة ايمان

ملخص: نقدم في هذا العمل، دراسة تسمح باستخدام مواد جديدة ليس فقط لتنظيم التبادل الحراري في الأجزاء المختلفة من المبنى، ولكن أيضاً لتقليل أو حتى تجنب استخدام أنظمة التدفئة والتبريد التقليدية. قمنا باستعمال نوعين من مادة البارافين (27 و58) في طبقات من الجبس والخرسانة، وذلك بغية استعمالها في الارضيات والحيطان الساخنة. قمنا أيضا باقتراح نمذجة للسلوك الحراري للطبقات المحضرة، بالإعتماد على الخصائص الحرارية والفيزيائية للمواد المستعملة. تشير النتائج المقدمة الى الأثر الإيجابي لاستعمال البارافين في تحسين السلوك الحراري للطبقات المحضرة (الجبس والخرسانة)، من ناحية تخزين الطاقة والراحة الحرارية. النماذج المقترحة تعتبر جيدة ومقبولة بالمقارنة مع النتائج المخبرية، حيث تسمح بتقدير درجات الحرارة في السطوح الخارجية للطبقات، وأيضا تلك للسطوح البينية.

كلمات مفتاحية: خرسانة؛ جبس؛ الراحة الحرارية؛ بارافين؛ مواد تغيير الطور؛ تخزين الطاقة؛ النمذجة.

Memory title : Amelioration of thermal comfort in buildings by using phase change materials

Student: Merad Rafika Imane

Student: Takhi Kaouthar

Directed by: Bouziani Tayeb

Abstract : This work presents a study that shows the use of new materials does not only allow the regulation of thermic exchange in the different parts of the building, but also the reduction or even more the avoidance of using conventional heating and cooling systems. Two types of paraffin have been integrated (27 & 58) in concrete and plaster plates in order to use them in heated floors and walls applications. A modeling of the thermal behavior of the prepared plates was applied, respecting the thermal and physical parameters of the different incorporated materials. The outcome explained the positive effect of paraffin in the improvement of the earlier behavior of the prepared plates (plaster and concrete), considering the storage energy and the thermal comfort. The model found has shown a good agreement with the experiments and allowed to estimate the temperature of the plate surfaces as well as the intermediate surfaces.

Key words: Concrete, plaster, thermic comfort, phase change material, storage energy, modeling

Titre du mémoire : Amélioration du confort thermique dans les bâtiments par utilisation des matériaux à changement de phase

Etudiante: Merad Rafika Imane

Etudiante: Takhi Kaouthar

Encadreur: Bouziani Tayeb

Résumé : Nous présentons dans ce travail, une étude qui consiste à employer de nouveaux matériaux permettant non seulement de réguler les échanges thermiques dans les différentes parties du bâtiment, mais aussi de réduire voire éviter le recours aux systèmes conventionnels de chauffage et de climatisation. Nous avons intégré deux types de paraffine (27 et 58) dans des plaques en plâtre et béton, en vue de proposer leur utilisation dans des planchers et murs chauffants. Une modélisation du comportement thermique des plaques préparées a été aussi réalisée, en fonction des paramètres thermo-physiques de différents matériaux utilisés. Les résultats trouvés, montre l'effet positif de la paraffine dans l'amélioration du comportement thermique des plaques préparées (plâtre et béton), en matière d'emmagasinement d'énergie et confort thermique. Les modèles trouvés ont montré un bon accord avec les essais expérimentaux et ont permis d'avoir une estimation des températures des surfaces de plaques ainsi de celles des surfaces intermédiaires.

Mots clés : Béton ; plâtre ; confort thermique ; paraffine ; matériaux à changement de phase ; emmagasinement d'énergie ; modélisation.