



**UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT D'ARCHITECTURE**

MEMOIRE DE MASTER

Spécialité : **Architecture**

Option : **Architecture et environnement**

**Contribution à l'étude du confort thermique
dans le bâtiment : élaboration d'un béton à
haute performance énergétique intégrant
des MCPs**

Présenté Par :

Mme. LAZRI Lydia

Encadré par : **M^r DEHMOUS .M**

Soutenu le : 24/06/2019

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre du développement de nouveaux matériaux et principes constructifs permettant d'allier confort thermique et efficacité énergétique. Notre choix s'est porté sur un type de matériaux innovants, en l'occurrence ; les matériaux à changement de phase dits MCP. La solution que nous proposons consiste en la macro-incorporation de MCP au mortier destiné à la réalisation des bétons. Concrètement, des expériences mécaniques et thermiques ont été menées sur trois types de matrices minérales absorbantes (Gel de silice, sépiolite et bentonite) et une graisse végétale (huile de coprah 23-26).

Un nombre considérable de travaux de recherches ont montré que ces matériaux constituent une solution prometteuse pour les constructions futures. Ceci nous a motivé à entreprendre l'étude du comportement d'un type de MCP lorsqu'il est associé au béton. Dès lors, un protocole expérimental a été mis en place et des expériences ont été réalisées au laboratoire. Une comparaison de la résistance mécanique et de la valeur de la conductivité thermique a été faite sur des échantillons de béton ordinaire et de béton composite comprenant des MCPs.

En définitive, notre objectif est d'évaluer l'impact des MCPs sur les propriétés thermiques et mécaniques du béton et par conséquent leur répercussion sur l'association sur le confort thermique des habitations.

Mots-clés : Matériaux innovants, efficacité énergétique, matériaux à changement de phase, confort thermique, conductivité thermique.

Remerciements

Au terme de ce modeste projet ; je tiens à remercier le bon DIEU pour le courage qu'il m'a offert pour arriver au bout de ce travail.

Je tiens à remercier sincèrement mon encadreur Monsieur M.DEHMOUS, pour avoir accepté de diriger ce travail ; et de m'avoir accompagné tout au long de sa réalisation avec beaucoup d'intérêt et de disponibilité, je le remercie également pour son encouragement, et ses critiques constructives qui m'ont permis d'avancer, et particulièrement pour la confiance qu'il a mis en moi.

Mon respect aux membres de jury, qui me font l'honneur d'accepter et de juger ce travail, d'apporter leurs réflexions et leurs critiques scientifiques.

Mes vifs remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'architecture et tout le personnel de la bibliothèque du département d'architecture à « l'habitat » et à Tamda pour leur compréhension et leur disponibilité.

Je remercie affectueusement toute ma famille en particulier mon père et mes sœurs pour leurs encouragements à poursuivre cette longue route.

Je voudrais remercier particulièrement ma chère mère et mon mari pour leur amour et leur soutien, la confiance et les espoirs qu'ils ont mis en moi, je leurs dois toute ma réussite.

Enfin je remercie toutes personnes ayant participé de près ou de loin a ce travail.

Merci a tous

Table des matières

Remercîments.....	i
Résumé	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures et tableaux.....	vi
Introduction Générale	1
Chapitre I. Corpus theorique	
Introduction	5
I.1 : Développement durable.	5
I.1.1 : Les piliers du développement durable.....	7
I.1.2 : Naissance et évolution du concept de développement durable.....	8
I.1.3 : Les objectifs du développement durable.....	9
I.2 : Politique d'efficacité énergétique.....	10
I.2.1 : Définition générale.....	10
I.2.2 : L'efficacité énergétique dans le bâtiment.....	10
I.3 : Notions d'architecture bioclimatique.....	12
I.3.1 : Généralités sur L'architecture bioclimatique.....	12
I.3.2 : Les principes bases de l'architecture bioclimatique.....	12
I.4 : Le Confort thermique.....	15
I.4.1: Définition du confort thermique.....	15
I.4.2 : Différents types d'échange thermiques	16
I.4.3 : Les facteurs influençant le confort thermique.....	18
I.4.3.a. La température ambiante (ou de consigne).....	18
I.4.3.b. La température des parois.....	18
I.4.3.c. Le mode chauffage.....	19
I.4.3.d. Les mouvements d'air.....	20
I.4.3.e. L'occupant.....	21
Conclusion.....	21
Chapitre II. Utilisation des MCPs dans le bâtiment ; état des connaissances	

Conclusion.....	47
-----------------	----

Chapitre III Essais pratiques sur l'incorporation des MCP à un échantillon de béton et étude des résultats

Introduction	48
III.1 : Essais pratiques.....	48
III.1.1 : Méthodologie d'élaboration et essais physico-thermiques.....	48
III.1.2 : Description des matériaux et produits utilisés.....	49
III.1.2.1 : MCP (graisse végétal : huile de coprah 23-26).....	49
III.1.2.2 : Support solide (matière minérale : Sépiolite).....	50
III.1.2.3 : Matrice : béton.....	50
III.1.3 : Description du matériel utilisé.....	51
III.1.3.1: Appareils utilisés lors de l'imprégnation du MCP.....	51
III.1.3.1.a: Bains thermostatés.....	51
III.1.3.1.b: Balance analytique.....	51
III.1.3.2: Appareil utilisé pour le calcul de la conductivité thermique des bétons brut et composite (le CT mètre).....	51
III.1.4 : Elaboration du MCP composite par la technique de l'imprégnation.....	53
III.1.5. Essais mécaniques	54
III.1.5.a. Caractéristiques des bétons étudiés.....	54
III.1.5.b: Essais mécaniques.....	55
III.1.6 : Caractéristiques thermiques	56
III.1.6.a : La composition des échantillons étudiés (pour la caractérisation thermique). 56	
III.1.6.b : Etapes De Déroulement De L'expérience.....	57
III.2 : Résultats	58
III.3 : Discussion.....	60
Conclusion.....	61
Conclusion générale.....	62
Références bibliographiques.....	63

Le secteur du bâtiment représente aujourd'hui un peu plus de 43% de la consommation d'énergie nationale, ce qui en fait le premier consommateur d'énergie, loin devant le transport et l'industrie (respectivement 32 et 23% de la consommation d'énergie nationale).¹ De plus, 23% des émissions de gaz à effets de serre sont imputables au secteur du bâtiment d'après le Grenelle de l'environnement. Le constat est le même en Algérie où le bâtiment est le domaine qui consomme le plus d'énergie avec plus de 40% de la consommation énergétique finale.

Il est nécessaire de gérer la production et l'utilisation de l'énergie consacrée au chauffage et à la climatisation des bâtiments en limitant les déperditions et récupérant au maximum les apports passifs. Pour cela, il est judicieux de penser à la conception d'enveloppes économes en énergie et de limiter les émissions de gaz à effet de serre afin de réduire les besoins énergétiques. L'utilisation de sources d'énergie intermittentes telles que le chauffage solaire, le rafraîchissement par ventilation naturelle nous incite à réfléchir sûrement au choix des matériaux de construction.

Pour atteindre ces objectifs, il existe un certain nombre de principes de base dont les plus importants sont l'isolation et l'inertie thermiques des enveloppes des bâtiments. Ces dernières doivent avoir les facultés de la résistance et du stockage thermiques. Les MCPs figurent parmi les moyens passifs d'accroître la masse thermique de ces enveloppes. Ces dispositifs peuvent être utilisés pour le stockage seulement ou servir également d'isolants. Pour un confort thermique optimal, la capacité thermique d'un bâtiment doit être suffisante pour stabiliser de grandes variations quotidiennes de température et pour augmenter le déphasage entre les pics des températures intérieure et extérieure.²

Les façades constructions actuelles utilisent de plus en plus des structures légères et modulables. L'idéal serait d'allier cette légèreté à un haut potentiel de stockage calorifique. Ceci peut être réalisé en y incorporant des MCP en profitant de leur grande chaleur latente de changement d'état qui permet de stocker/déstocker une grande quantité d'énergie dans un volume réduit. Intégrés dans les parois de bâtiment, la présence de MCP joue le rôle de régulateur de température grâce à sa capacité à stocker et restituer la chaleur de manière déphasée : durant la saison estivale et aussi hivernale.

¹ ADEME (agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), édition 2008.

² MAHA Ahmed. *Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments*. Thèse de doctorat, 2004. Université Joseph Fourier, Grenoble, France.

Leurs caractéristiques permettent de ralentir la montée en température intérieure d'un local par le stockage de la chaleur au fur et à mesure de la journée permettant d'éviter les pics de chaleur ainsi la diminution des amplitudes des températures. Le confort thermique sera ainsi amélioré.³

La crise énergétique a mené des scientifiques, des politiques ou autres spécialistes du bâtiment à mettre l'accent sur l'importance et la nécessité de rationaliser les quantités d'énergie utilisées pour le chauffage et la climatisation. La consommation irréfléchie des énergies influe sur la charge d'exploitation des immeubles mais également sur l'ensemble de l'économie du pays. C'est pour cela que les spécialistes du bâtiment et particulièrement les architectes doivent plus que jamais prendre en considération l'aspect climatique et tenir compte des facteurs utiles du site tels que l'orientation, la pente du terrain, l'ensoleillement, la protection contre les intempéries, les vents dominants, les matériaux et leurs caractéristiques thermo-physiques...etc. À cet effet, l'architecture dite bioclimatique et à bas profil énergétique insiste sur l'optimisation de la relation du bâtiment avec le climat en vue de créer des ambiances confortables par des moyens spécifiquement architecturaux.

De nos jours, force est de constater qu'il y'a une profusion de techniques constructives et de matériaux proposés dans le secteur de la construction. Ils s'appuient pour la plupart et d'une manière ou d'une autre, sur une avancée technologique particulière. Cela nous mène à repenser l'architecture bioclimatique autrement en la repositionnant dans le contexte actuel des temps modernes par l'intégration entre autres des nouveaux matériaux caractérisés par une performance énergétiques sans égal naturel.

C'est ce qui nous mène à nous poser les questionnements suivants :

- Tout en sachant que l'architecture vernaculaire et bioclimatique répondent grandement aux attentes et aux objectifs de confort thermique et de consommation énergétique, par quel moyen peut-on parvenir à concevoir aujourd'hui des bâtiments économes en énergie, respectueux de l'environnement et offrant un haut degré de confort thermique, avec des solutions simples où les principes anciens peuvent être remis au goût du jour tous en y intégrant la technologie de l'époque avec un apport d'innovation par un choix judicieux et intelligent des matériaux nouveau tel que les matériaux à changement de phase ?

³ 1er séminaire international sur le soutien de la simulation à l'innovation technologique, Ghardaïa (Algérie), mars, 07-08-2017

- Peut on faire du béton ; matériaux phare dans la construction connu pour sa rigidité ses épaisseurs considérable et des propriétés mécaniques et thermiques importante, un matériau plus souple avec plus de légèreté et des épaisseurs moindre, en lui intégrant des MCPs et maintenant ses caractéristiques qui en font le N°1 des matériaux de construction ?
- Quelle est la catégorie des MCPs qui peut répondre au mieux a ces attentes ; qui puisse être disponible et qui soit attractif économiquement en terme de qualité /prix ? Comment intégrer ces matériaux a changement de phase dans l'enveloppe d'un bâtiment tout en préservant l'esthétique ; la solidité ; les caractéristiques physique du béton et apporter confort thermique au bâti ?

Pour répondre à la problématique, posée nous avons émis les hypothèses suivantes :

- L'usage et l'intégration de cette catégorie de matériaux (MCP) dans les enveloppes des bâtiments leurs attribueraient des conditions thermiques équilibrées durant toute l'année sans recourir systématiquement aux appoints mécaniques pour le chauffage et le rafraichissement qui sont bien souvent sur-consommateur d'énergie. Cette alternative nouvelle aux matériaux à forte inertie thermique conventionnels permettrait un gain sur les points de vue financier, un apport considérable sur les aspects qualitatifs et d'esthétique architecturale, de durabilité et de respect de l'environnement ;
- Les investigations relatives à la conductivité thermique dans le cas où cette dernière connaîtrait une baisse considérable suite à l'intégration de MCP dans le béton, traduirait la réduction des flux de chaleur transmis qui seraient dus à une absorption par le MCP ou bien renvoyés en raison de l'isolation.

Les objectifs principaux tracés dans ce travail de recherche sont :

- Contribuer aux études consacrées au traitement des problèmes thermiques dont pâtissent les bâtiments consécutivement aux pratiques architecturales privilégiant la rigidité, l'esthétique et l'usage des matériaux à bon prix en ignorant l'ensemble des aspects qualitatifs dont confort et le respect de l'environnement ;
- Apporter un regard nouveau sur l'architecture bioclimatique par l'intégration dans l'enveloppe des constructions des matériaux à changement de phase connus comme des matériaux haute performance énergétique ;

- Réduire la conductivité thermique des parois en bétons intégrant des MCPs et ainsi améliorer leur capacité d'isolation thermique par absorption de chaleur par le MCP.

Structure du mémoire

Ce mémoire se scinde en trois grands chapitres ; le premier relate les fondements théoriques liés à l'architecture bioclimatique et à la thermique, qui nous ont permis de lancer la recherche, au second chapitre nous définirons la chaleur sensible et latente ainsi que l'intérêt de stocker la chaleur sous l'une de ces formes pour la restituer à un temps ultérieur ,dans cette optique nous parlerons des MCPs et leurs caractéristiques , formes, types et capacités à créer un déphasage de restitution de chaleur.

Enfin au dernier chapitre nous procéderons à des essais expérimentaux sur un échantillon de béton intégrant des MCPs, et nous étudierons ses caractéristiques mécaniques et thermiques en les comparant à un échantillon de béton ordinaire ; ces derniers n'ayant aucun rôle porteur mais conçu comme paroi faisant parti de l'enveloppe d'un bâtiment.

Introduction

Développement durable, efficacité énergétique, architecture bioclimatique et confort thermique tant de notions complémentaires et d'actualité qui nous ont mené à établir cette partie théorique de la recherche. Dans ce chapitre consacré à la compréhension de notre domaine d'étude, nous avons commencé par relater l'évolution dans le temps de l'architecture bioclimatique et déterminer les conséquences de cette évolution sur la consommation énergétique, puis, nous avons passé en revue les moyens d'atteindre un confort thermique idéal inscrit dans l'esprit de l'architecture bioclimatique et dans l'enjeu de l'efficacité énergétique.

I.1 : Développement durable

Qu'est-ce que le développement durable ? En 1987, ce concept a été défini par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement (dans le Rapport Brundtland) comme « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs ». ⁴ Malheureusement, cette définition était vague et les pays n'avaient guère d'indications sur la façon d'élaborer des politiques cohérentes au service du développement durable. De l'avis général, le développement durable suppose un meilleur équilibre entre les objectifs économiques, sociaux et environnementaux dans le cadre de la formulation des politiques, et une vision à long terme des conséquences des activités d'aujourd'hui. En outre, il est admis qu'il exige une coopération planétaire pour créer partout dans le monde les conditions de la viabilité économique, écologique et sociale. Cependant, aujourd'hui encore, le développement durable reste un concept difficile à mesurer et à rendre opérationnel.

Appliqué à l'économie, le développement durable intègre trois dimensions : ⁵

- **Economique (efficacité, rentabilité)** : Trouver un juste équilibre entre profit et gestion durable de l'environnement.
- **Sociale (responsabilité sociale)** : satisfaire les besoins essentiels des populations en réduisant les inégalités sociales dans le respect des différentes cultures.
- **Environnementale** (responsabilité environnementale) : maintenir l'équilibre écologique sur le long terme en limitant notre impact sur l'environnement.

⁴OCDE (1997), *Guider la transition vers le développement durable. Un rôle essentiel pour l'OCDE*

⁵Les Éditions De L'OCDE, 2, Rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16 Imprimé En France.

Il s'agit de réussir à concilier le progrès social et économique avec la sauvegarde de l'équilibre naturel de la planète, c'est l'enjeu majeur de ce début du 21eme siècle.

Appliquée au monde des entreprises, la notion de développement durable a conduit ces dernières à être plus attentives aux préoccupations de l'ensemble des parties prenantes ("stakeholders"). Il s'agit alors pour les entreprises de s'engager dans des démarches de responsabilité sociale (RSE), ayant une influence sur les pratiques et les processus mis en œuvre sur des domaines tel que, les ressources humaines, les pratiques commerciales, l'impact local, etc.

Le développement durable se résume pour certains à un concept écologique. Cela signifie que les processus d'évolution de nos sociétés doivent s'inscrire dans la durée sans altérer les capacités des écosystèmes qui subviennent à leurs besoins, pour laisser aux générations futures un capital intact. Le développement durable implique donc d'exploiter les ressources biologiques à un rythme qui n'entraîne pas leur appauvrissement, voire leur épuisement mais rend possible le maintien indéfini de la productivité biologique de la biosphère. Cette forme de développement économique respecte l'environnement par une exploitation rationnelle et modérée de la nature et de ses nombreuses ressources. C'est dans cette optique que le concept de transition énergétique a été mis en place. Il s'agit de progressivement abandonner les énergies émettrices de gaz à effet de serre au profit des énergies renouvelables.

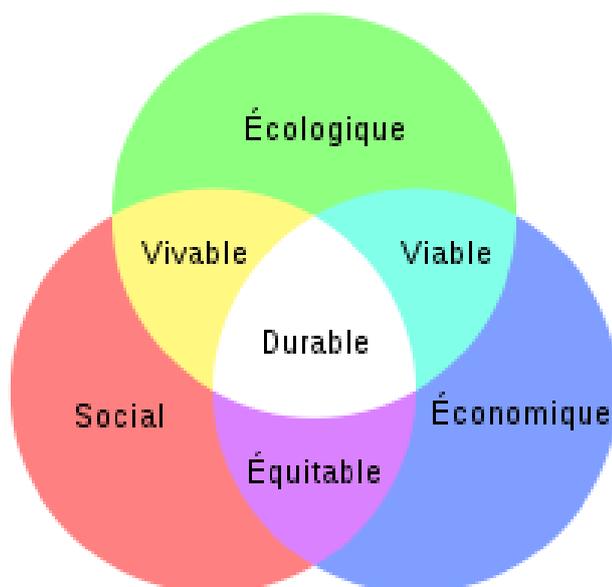
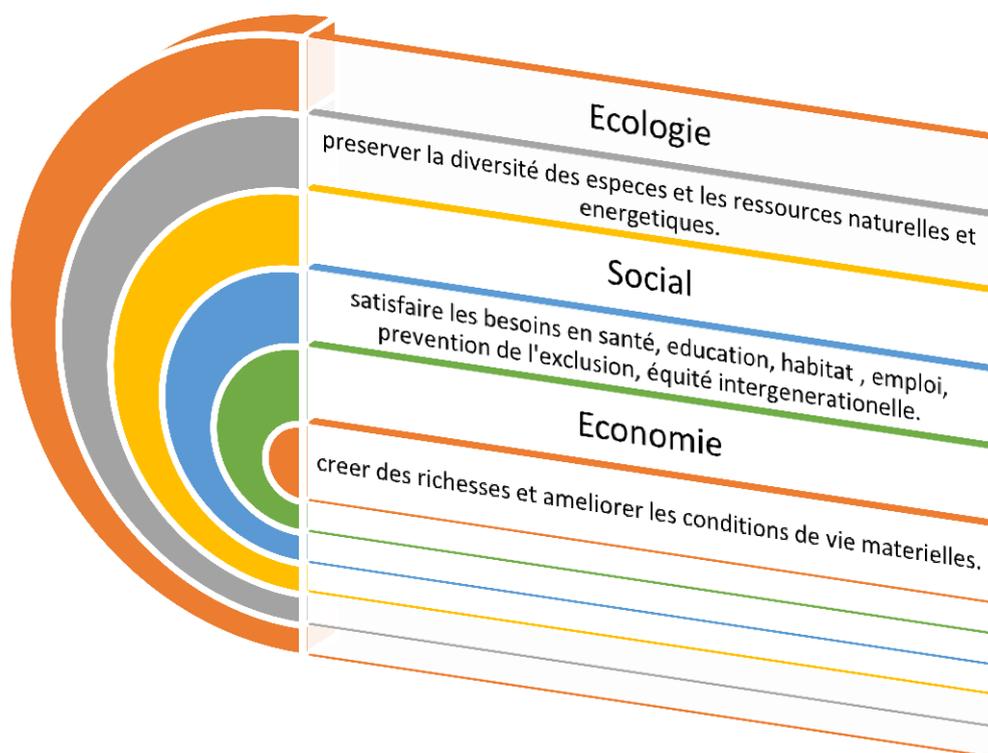


Figure I.1 : Schéma du développement durable

Source : Site internet <https://www.greenmaterials.fr/environnement-social-et-economique-les-3-piliers-du-developpement-durable/> consulté le 19/01/2019.

I.1.1 : Les piliers du développement durable

Le développement durable fait l'objet d'une attention de plus en plus importante : pensons par exemple aux nombreux articles consacrés aux pollutions engendrées par l'activité des grandes firmes, la pollution atmosphérique, aux problèmes de mobilité, aux milieux naturels, au réchauffement climatique de la planète, ... Chacun peut tirer profit d'une politique de développement durable et chacun peut facilement y contribuer.



Les trois piliers du développement durable : ⁶

- **Le pilier Économique**: l'économie est un pilier qui occupe une place prééminente dans notre société de consommation. Le développement durable implique la modification des modes de production et de consommation en introduisant des actions pour que la croissance économique ne se fasse pas au détriment de l'environnement et du social.
- **Le pilier Social** : ou encore le pilier humain. Le développement durable englobe la lutte contre l'exclusion sociale, l'accès généralisé aux biens et aux services, les conditions de travail, l'amélioration de la formation des salariés et leur diversité, le développement du commerce équitable et local.
- **Le pilier Environnemental** : il s'agit du pilier le plus connu. Le développement durable est souvent réduit à tort à cette seule dimension environnementale. Il est vrai que dans les

⁶ Site internet de l'Eco conception des matériaux : <https://www.greenmaterials.fr/environnement-social-et-economique-les-3-piliers-du-developpement-durable/> consulté le 19/01/2019

pays industrialisés, l'environnement est l'une des principales préoccupations en la matière. Nous consommons trop et nous produisons trop de déchets. Il s'agit de rejeter les actes nuisibles à notre planète pour que notre écosystème, la biodiversité, la faune et la flore puissent être préservées.

I.1.2 : Naissance et évolution du concept de développement durable.

- **Naissance du concept :**

Face à l'idée, née de la révolution industrielle du XIXe siècle, selon laquelle le progrès technique assurera une croissance indéfinie et un progrès linéaire, on a assisté à une progressive prise de conscience, à partir des années 1920, relative aux effets négatifs de l'industrialisation sur les milieux naturels, faune, flore, milieux aquatiques... Après la deuxième guerre mondiale, non seulement les constats se sont multipliés dans ce domaine, mais en même temps, de nouvelles réflexions ont montré que la croissance ignore le facteur humain.

En 1968, les travaux du Club de Rome, avec la publication du rapport "Halte à la croissance", ont été le point de départ d'un très large débat qui a conduit au concept d'écodéveloppement débattu à la conférence de Stockholm en 1972, puis "au développement durable" prôné par le rapport Brundtland, "Notre avenir à tous", publié en 1987 par la Commission mondiale sur l'environnement et le développement. La Conférence de Rio, ou Sommet de la terre, de juin 1992, avec ses avancées et ses compromis, a contribué très largement à une prise de conscience planétaire autour de l'idée de développement durable – économique, social, environnemental. Depuis cette date, les États et les acteurs économiques et sociaux, s'efforcent de mettre en œuvre le développement durable.⁷

- **Evolution du concept :**⁸

1997	• Le protocole de Kyoto est adopté; pour pouvoir entrer en vigueur, il doit être ratifié par suffisamment de pays et représenter au moins 55% des émissions totales.
2001	• Les membres de l'union européenne, réunis à Göteborg, mettent au point une stratégie européenne pour le développement durable.
2005	• Le protocole de Kyoto visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre entre en vigueur, grâce à la signature de la Russie.

⁷ Organisation des Nations Unies. *Rapport de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement*, Volume A, Rio de Janeiro, 3-14 juin 1992 (La Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement et *Action 21*).

⁸ HESSAD Ahmed, Mémoire de master en architecture (apport des matériaux nouveaux dans le confort thermique des bâtiments, session septembre 2017).

I.1.3 : Les objectifs du développement durable

Les objectifs de développement durable nous donnent la marche à suivre pour parvenir à un avenir meilleur et plus durable pour tous. Ils répondent aux défis mondiaux auxquels nous sommes confrontés, notamment ceux liés à la pauvreté, aux inégalités, au climat, à la dégradation de l'environnement, à la prospérité, à la paix et à la justice. Les objectifs sont interconnectés et, pour ne laisser personne de côté, il est important d'atteindre chacun d'entre eux, et chacune de leurs cibles, d'ici à 2030. ⁹

1. Éradication de la pauvreté ;
2. Lutte contre la faim ;
3. Accès à la santé ;
4. Accès à une éducation de qualité ;
5. Égalité entre les sexes ;
6. Accès à l'eau salubre et à l'assainissement ;
7. Recours aux énergies renouvelables ;
8. Accès à des emplois décents ;
9. Bâtir une infrastructure résiliente, promouvoir une industrialisation durable qui profite à tous et encourager l'innovation ;
10. Réduction des inégalités ;
11. Villes et communautés durables ;
12. Consommation et production responsables ;
13. Lutte contre le changement climatique ;
14. Vie aquatique ;
15. Vie terrestre ;
16. Justice et paix ;
17. Partenariats pour la réalisation des objectifs.

⁹ site internet http://www.ferdi.fr/sites/www.ferdi.fr/files/publication/fichiers/p130-garenne-difficultes_de_la_mesure_des_objectifs_du_developpement.pdf [archive] [PDF]. Consulté le 03/03/2019

I.2 : Politique d'efficacité énergétique

I.2.1 : Définition générale

L'efficacité énergétique est un état de fonctionnement d'un système pour lequel la consommation d'énergie est minimisée pour un service rendu maximal. Le groupe intergouvernemental d'experts pour l'étude du climat (GIEC) a confirmé que le relèvement de la température moyenne de l'atmosphère terrestre variera entre 1,5 et 6 °C d'ici à la fin du siècle. La valeur réelle dépendra essentiellement de l'importance et de la date d'application des politiques publiques mises en œuvre par les pays les plus consommateurs d'énergie.

Ce réchauffement a déjà provoqué des perturbations climatiques ayant des répercussions humaines gravissimes. Qui seront sans doute de plus en plus importantes dans l'avenir. Pour limiter celles-ci et assurer le développement durable de nos sociétés, il est maintenant admis qu'il faudra diviser par deux les émissions de gaz à effet de serre à l'échelle de la planète à l'horizon 2050. Un traité international visant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre a été ratifié en 2005 par 183 pays, c'est le protocole kyoto, il a été conclu dans le cadre de la convention-cadre des nations unies sur les changements climatiques, les pays participants se rencontrent une fois par an, afin de négocier des accords internationaux sur le climat.¹⁰

Ainsi, l'efficacité énergétique se manifeste comme étant un objectif politique affirmé. Tous les pays, quelle que soit leurs situations énergétiques, doivent baser leur développement sur d'autres types d'énergies tout en essayant de maîtriser leur consommation énergétique par la mise en place de politiques d'efficacité énergétique volontaristes et adaptées.

I.2.2 : L'efficacité énergétique dans le bâtiment.

L'efficacité énergétique se réfère à la réduction de la consommation d'énergie sans toutefois provoquer une diminution du niveau de confort ou de qualité de service dans les bâtiments.

Le secteur du bâtiment, dont sa consommation énergétique représente plus de 40% du total de l'énergie, et il est responsable de 20% des émissions mondiales de gaz à effet de serre, se

¹⁰ HESSAD.A,OpCit.

positionne comme un acteur clé pour parvenir à résoudre les inquiétants défis à faire face. Ce secteur pourrait bien être le seul qui offre des possibilités de progrès suffisamment fortes pour répondre aux engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Le bâtiment peut être construit pour deux usages distincts : usage tertiaire (tels que commerce, bureaux, enseignement, santé, etc.) et usage résidentiel (bâtiment d'habitation, maison individuelle ou logement collectif).¹¹

Le cycle de vie du bâtiment se divise en plusieurs étapes, toutes engageant de nombreuses professions et usagers, et ayant un impact direct ou indirect sur l'environnement : production des matériaux, transport des matériaux, construction du bâtiment, utilisation du bâtiment et déchets en fin de vie.

Cependant, agir efficacement pour réduire de manière sensible la consommation énergétique impose une identification des facteurs de gaspillage, afin de les maîtriser à l'avenir.

De nombreuses études et retours d'expériences ont montré que la diminution des consommations énergétiques des bâtiments passe par une conception architecturale prenant en compte la compacité du bâtiment et la gestion des apports solaires passifs, une sur-isolation de l'enveloppe.¹²

Un certain nombre de terme sont utilisés pour désigner les bâtiments présentant une forte efficacité énergétique:

- **Maison passive** : Initiée en 1990 par l'ingénieur Wolfgang Feist, elle est pratiquement autonome pour ses besoins en chauffage. Ces résultats sont atteints grâce à une excellente protection contre l'extérieur, une captation optimale, mais passive de l'énergie solaire et des calories du sol, une limitation des consommations d'énergie des appareils ménagers.
- **Bâtiment basse énergie** : bâtiment pour lequel la consommation en énergie finale pour le chauffage varie entre 30 et 60 kWh/(m².an).
- **Bâtiment très basse énergie** : bâtiment pour lequel la consommation en énergie finale pour le chauffage varie entre 10 et 15 kWh/(m².an).
- **Bâtiment à énergie zéro** : Bâtiment qui produit autant d'énergie qu'il en consomme en utilisant des énergies renouvelables (panneaux solaires par exemple). Pour cette notion, on compare souvent l'énergie finale reçue par la maison à l'énergie primaire produite, ce qui n'est pas très correcte.

¹¹ Pemaco. *Le livre blanc de l'efficacité énergétique*. Schneider Electric. Février 2011.

¹² LEITFADEN. *Concepts énergétique, environnementaux et de santé, concept énergétique*.

I.3 : Notions d'architecture bioclimatique

I.3.1 : Généralités sur L'architecture bioclimatique

L'architecture bioclimatique est une discipline de l'architecture, l'art et le savoir-faire de tirer le meilleur parti des conditions d'un site et de son environnement, pour une architecture naturellement la plus confortable pour ses utilisateurs.

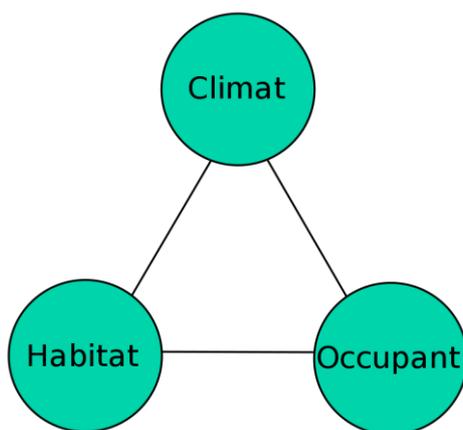


Figure I. 2 : architecture bioclimatique

Source : Site internet : <https://www.e-rt2012.fr/explications/conception/explication-architecture-bioclimatique/> consulté le 15/02/2019

Dans la conception d'une architecture dite bioclimatique, les conditions du site et de l'environnement (le climat et le microclimat, la géographie et la géomorphologie) ont une place prépondérante dans l'étude et la réalisation du projet d'architecture qui y est prévu. Une étude approfondie du site et de son environnement permet d'adapter l'architecture (le projet d'architecture) aux caractéristiques et particularités propres au lieu d'implantation, et permet d'en tirer le bénéfice des avantages et se prémunir des désavantages et contraintes.

I.3.2 : Les principes bases de l'architecture bioclimatique

On parle de conception bioclimatique lorsque l'architecture du projet est adaptée en fonction des caractéristiques et particularités du lieu d'implantation, afin d'en tirer le bénéfice des avantages et de se prémunir des désavantages et contraintes. L'objectif principal est d'obtenir le confort d'ambiance recherché de manière la plus naturelle possible en utilisant les moyens architecturaux, les énergies renouvelables disponibles et en utilisant le moins possible les moyens techniques mécanisés et les énergies extérieures au site. Ces stratégies et techniques architecturales cherchent à profiter au maximum du soleil en hiver et de s'en

protéger durant l'été. C'est pour cela que l'on parle également d'architecture «solaire» ou «passive».

Le choix d'une démarche de conception bioclimatique favorise les économies d'énergies et permet de réduire les dépenses de chauffage et de climatisation, tout en bénéficiant d'un cadre de vie très agréable.

Afin d'optimiser le confort des occupants tout en préservant le cadre naturel de la construction, de nombreux paramètres sont à prendre en compte. Une attention tout particulière sera portée à l'orientation du bâtiment (afin d'exploiter l'énergie et la lumière du soleil), au choix du terrain (climat, topographie, zones de bruit, ressources naturelles, ...) et à la construction (surfaces vitrées, protections solaires, compacité, matériaux, ...).¹³

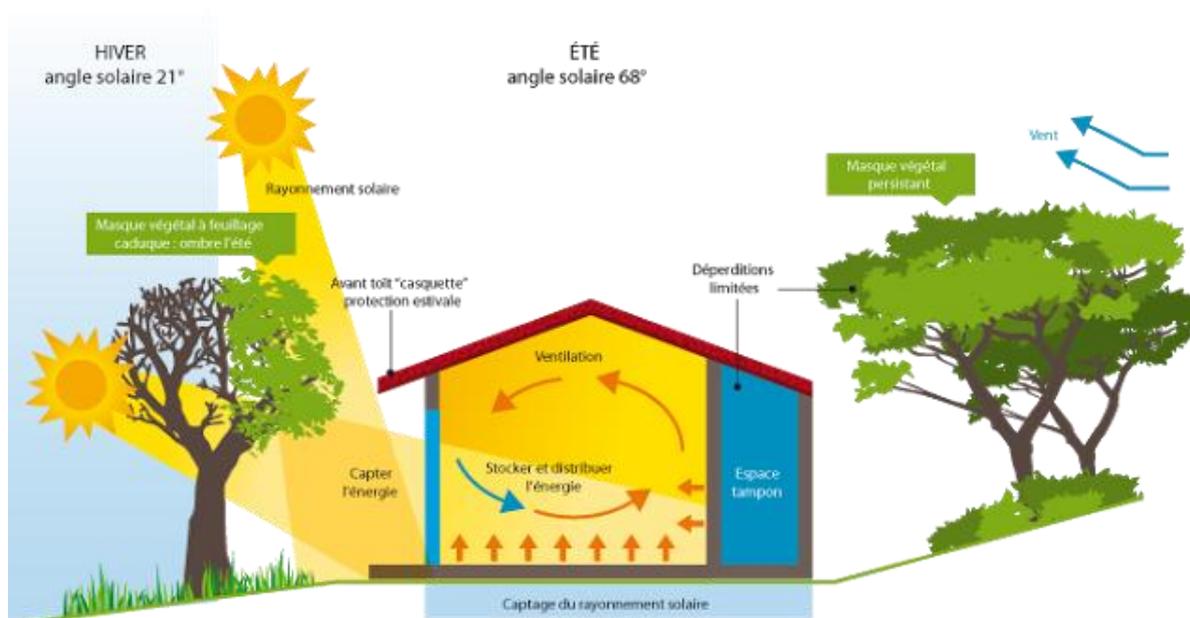


Figure I.3 : Principes de base d'une conception bioclimatique

Source : Site internet : <https://www.e-rt2012.fr/explications/conception/explication-architecture-bioclimatique/> consulté le 15/02/2019

• Méthodologie de conception

La conception bioclimatique consiste à tirer le meilleur profit de l'énergie solaire, abondante et gratuite. En hiver, le bâtiment doit maximiser la captation de l'énergie solaire, la diffuser et la conserver. Inversement, en été, le bâtiment doit se protéger du rayonnement solaire et évacuer le surplus de chaleur du bâtiment. La conception bioclimatique s'articule autour des 3 axes suivants :

¹³ Site internet : <https://www.e-rt2012.fr/explications/conception/explication-architecture-bioclimatique/> consulté le 15/02/2019

❖ Capter / se protéger de la chaleur

Dans l'hémisphère nord, **en hiver**, le soleil se lève au Sud Est et se couche au Sud Ouest, restant très bas (22° au solstice d'hiver). Seule la façade Sud reçoit un rayonnement non négligeable durant la période d'hiver. Ainsi, en maximisant la surface vitrée au sud, la lumière du soleil est convertie en chaleur (effet de serre), ce qui chauffe le bâtiment de manière passive et gratuite.

Dans l'hémisphère nord, **en été**, le soleil se lève au Nord Est et se couche au Sud Ouest, montant très haut (78° au solstice d'été). Cette fois ci, ce sont la toiture, les façades Est (le matin) et Ouest (le soir) qui sont le plus irradiées. Quant à la façade Sud, elle reste fortement irradiée mais l'angle d'incidence des rayons lumineux est élevé. Il convient donc de protéger les surfaces vitrées orientées Sud via des protections solaires horizontales dimensionnées pour bloquer le rayonnement solaire en été. Sur les façades Est et Ouest, les protections solaires horizontales sont d'une efficacité limitée car les rayons solaires ont une incidence moins élevée. Il conviendra d'installer des protections solaires verticales, d'augmenter l'opacité des vitrages (volets, vitrage opaque) ou encore de mettre en place une végétation caduque.

En règle générale, dans l'hémisphère nord, on propose :

- Une maximisation des surfaces vitrées orientées au Sud, protégées du soleil estival par des casquettes horizontales ;
- Une minimisation des surfaces vitrées orientées au Nord. En effet, les apports solaires sont très faibles et un vitrage sera forcément plus déperditif qu'une paroi isolée ;
- Des surfaces vitrées raisonnées et réfléchies pour les orientations Est et Ouest afin de se protéger des surchauffes estivales. Par exemple, les chambres orientées à l'ouest devront impérativement être protégées du soleil du soir.

Orientation pour un meilleur gain :

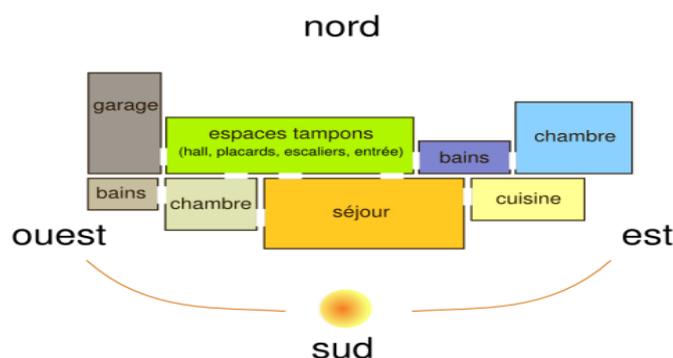


Figure I.4 : Disposition conseillée des pièces

Source : Site internet : <https://www.e-rt2012.fr/explications/conception/explication-architecture-bioclimatique/> consulté le 15/02/2019.

❖ Transformer, diffuser la chaleur

Une fois le rayonnement solaire capté et transformé en chaleur, celle-ci doit être diffusée et/ou captée. Le bâtiment bioclimatique est conçu pour maintenir un équilibre thermique entre les pièces, diffuser ou évacuer la chaleur via le système de ventilation.

La conversion de la lumière en chaleur se fait principalement au niveau du sol. Naturellement, la chaleur a souvent tendance à s'accumuler vers le haut des locaux par convection et stratification thermique, provoquant un déséquilibre thermique. Afin d'éviter le phénomène de stratification, il conviendra de favoriser les sols foncés, d'utiliser des teintes variables sur les murs selon la priorité entre la diffusion de lumière et la captation de l'énergie solaire (selon le besoin) et de mettre des teintes claires au plafond.

Les teintes les plus aptes à convertir la lumière en chaleur et l'absorber sont sombres (idéalement noires) et celles plus aptes à réfléchir la lumière en chaleur sont claires (idéalement blanches).

Il est également à noter que les matériaux mats de surface granuleuse sont plus aptes à capter la lumière et la convertir en chaleur que les surfaces lisses et brillantes (effet miroir). Une réflexion pourra également être faite sur les matériaux utilisés, pouvant donner une impression de chaud ou de froid selon leur effusivité.

❖ Conserver la chaleur ou la fraîcheur

En **hiver**, une fois captée et transformée, l'énergie solaire doit être conservée à l'intérieur de la construction et valorisée au moment opportun.

En **été**, c'est la fraîcheur nocturne, captée via une sur-ventilation par exemple, qui doit être stockée dans le bâti afin de limiter les surchauffes pendant le jour.

De manière générale, cette énergie est stockée dans les matériaux lourds de la construction. Afin de maximiser cette inertie, on privilégiera l'isolation par l'extérieur.¹⁴

I.4 : Le Confort thermique

I.4.1: Définition du confort thermique

L'interaction entre l'homme et son environnement a été le sujet de nombreuses études traitant du confort thermique. Celui-ci dépend de plusieurs paramètres à savoir les facteurs d'ordre individuel et les facteurs liés à l'environnement. L'étude du confort thermique est très

¹⁴ Site internet : architecture bioclimatique, Opcit.

importante non seulement pour la qualité des ambiances intérieures, mais aussi pour la quantité d'énergie à fournir par les équipements d'ambiance, car le monde d'aujourd'hui souffre d'une crise énergétique. Selon Lavigne.P, le confort thermique est une sensation qui fait intervenir des facteurs physiques, physiologiques et psychologiques, donc cela explique la complexité de ce thème car il dépend du côté subjectif des usagers qui place la perception de chaque individu au cours de l'analyse.

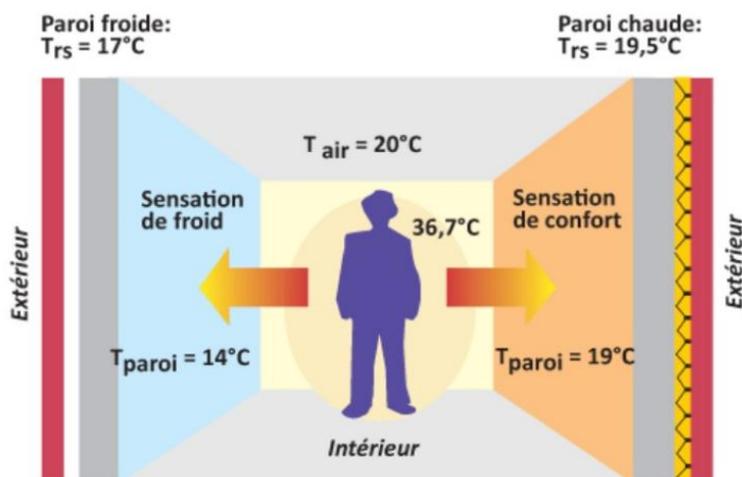
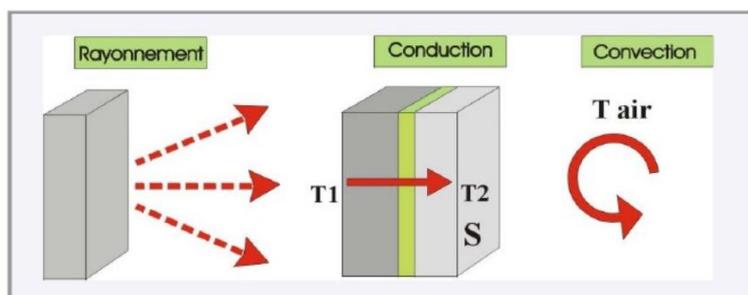


Figure I.5: conditions d'ambiance optimale

Source : M.Chabi, thermique du bâtiment, note de cours de master II en architecture.Ummto, 2019.

I.4.2 : Différents types d'échange thermiques :

Les différents échanges thermiques sont les transferts de chaleur sensible (échange radiatif et convectifs) ainsi que les pertes par respiration, diffusion et par sudation.¹⁵



- le **rayonnement** : transfert d'un corps à un autre par ondes électromagnétiques, donc sans contact direct.

- la **conduction** : la chaleur se propage à l'intérieur de la matière (un même corps solide ou un même fluide liquide ou gazeux), de particule à particule.

- la **convection** : transfert entre l'air et la matière solide résultant du déplacement des particules (de l'air) au niveau de l'interface.

Figure I.6: trois types d'échange de chaleur

Source : Mémentos techniques du bâtiment Certu - Juillet 2002

¹⁵ Mémentos techniques du bâtiment Certu - Juillet 2002

Les échanges entre la surface du corps et des vêtements et l'ambiance se font suivant quatre modes principaux :¹⁶

I.4.2 .a. Échanges de chaleur par convection avec l'air, dépend de la température de la peau du corps, température de l'air et la vitesse de l'air, pour cela le corps perd ou gagne de la chaleur selon les différences de températures entre l'air et la peau.

I.4.2 .b. Échanges par conduction qui se produit entre le corps humain et les objets en son contact direct et qui dépend de la différence de température entre eux.

I.4.2 .c. Échanges par rayonnement avec l'environnement [les parois, le soleil ...] qui dépend de la différence de température entre la peau et l'objet environnant. L'échange augmente avec l'augmentation de la surface du corps exposé.

I.4.2 .d. Évaporation de la sueur ou transpiration

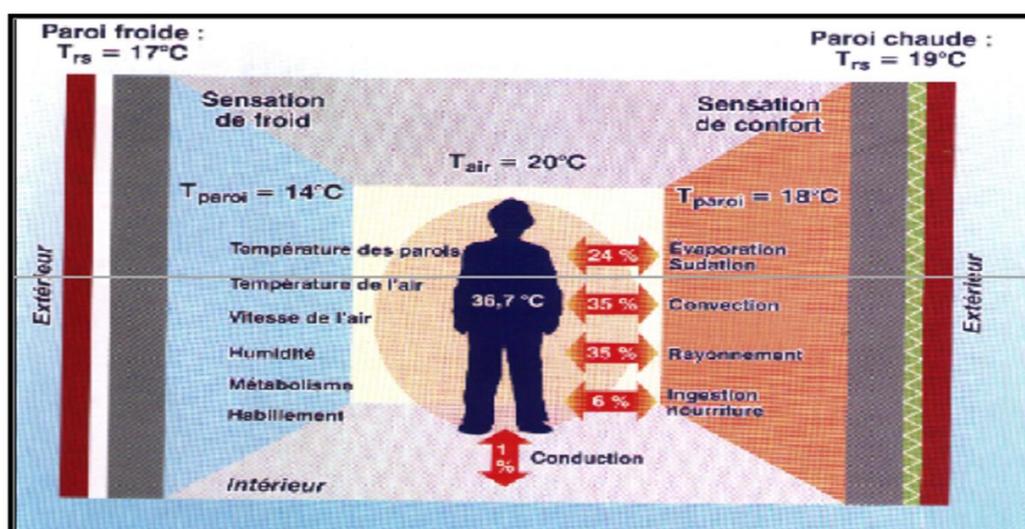


Figure I.7 : Echanges thermique entre l'homme et son environnement.

Source: Alain Liébard et André De Herde

- **Gains :**
 - Chaleur créée par l'activité métabolique, énergie rayonnante reçue (énergie solaire directe et réfléchiée),
 - D'autre source de chaleur,
 - Convection et conduction de la chaleur vers le corps (par l'intermédiaire de l'air ou par contact),
 - Condensation de l'humidité atmosphérique (occasionnelle.)

¹⁶ Bruant Marc Développement et paramétrage de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance. Thèse de doctorat : (1997). INSA de Lyon. France

- **Pertes :**

- Energie rayonnante émise (vers l'ambiance des objets).
- Convection et conduction de la chaleur (à partir du corps humain et par contact).
- Perte par évaporation
- La température du corps augmente en fait, avec l'activité physique le corps doit perdre de la chaleur à la même vitesse qu'elle a été produite en l'échangeant avec l'environnement, pour qu'il puisse garder la température de 37°C dans le but d'assurer santé et confort.

Pour qu'il y ait confort il faut donc que l'équation d'équilibre métabolique soit vérifiée :

$$M - E_{vp} \pm C_v \pm C_d \pm Rad = 0 \quad ^{17}$$

I.4.3 : Les facteurs influençant le confort thermique

I.4.3.a. La température ambiante (ou de consigne)

C'est le premier critère qui vient à l'esprit, qui même s'il est déterminant, n'est pas le seul. Pour obtenir un confort thermique satisfaisant, il faut paramétrer une température de consigne suffisante.

En général la température ambiante de confort se situe entre 19°C et 20°C. Surchauffer ou passer le seuil de 20°C à 21°C entraîne une surconsommation d'énergie d'environ 7%. La nuit et en période d'inoccupation, cette température pourra être abaissée de 2 à 3°C grâce à la régulation du chauffage.¹⁸

I.4.3.b. La température des parois

La température des parois a une grande influence sur la température ressentie. Pour calculer simplement la température ressentie, il faut faire la moyenne entre la température des parois et la température ambiante. Par exemple, pour une température d'ambiance de 20°C :

- Cas n°1 : Température de paroi de 16°C : la température ressentie sera de 18°C ;
 - Cas n°2 : Température de paroi de 19°C : la température ressentie sera de 19,5°C
- Pour une même température de consigne, le confort thermique sera insuffisant dans le cas 1 et satisfaisant dans le cas 2.

¹⁷ HESSAD.A, Opcit.

¹⁸ Site internet : <https://conseils-thermiques.org/contenu/confort-thermique.php> consulté le 05/02/2019.

Pour augmenter la température des parois, il convient d'isoler correctement son logement en limitant le plus possible les ponts thermiques. Il faut également mettre en place des vitrages performants avec une pose bien réalisée.¹⁹

I.4.3.c. Le mode chauffage

- **La production de la chaleur**

Dans le cas d'un chauffage par convection, l'air en mouvement est utilisé pour transférer la chaleur du système de chauffage vers les occupants. De fait, l'air chaud remonte et l'air froid reste au niveau du sol. En conséquence, il se crée une stratification de l'air, (plus chaud en haut qu'en bas) qui provoque un inconfort thermique (froid aux pieds).

De plus, le chauffage par convection tend à assécher l'air, ce qui peut être désagréable. On trouve parfois un humidificateur d'air accolé au convecteur pour limiter ce ressenti (réserve d'eau liquide). Aussi, les convecteurs peuvent accentuer la sensation de courant d'air qui provoque de l'inconfort et oblige à chauffer plus.

Enfin, ces éléments de chauffage sont très chauds (autour de 90°C sur le corps de chauffe), ce qui peut poser des problèmes de sécurité chez les enfants. Les « convecteurs » ou « grilles pains » ou autres « soufflants » sont donc à éviter notamment quand les volumes à chauffer sont importantes.

Dans le cas d'un chauffage par rayonnement, ce sont des ondes infrarouges qui sont utilisées pour transférer la chaleur du système de chauffage vers les occupants. Il y a peu de stratification de l'air et le confort thermique est meilleur. Parmi les chauffages par rayonnement, on peut citer : le plancher chauffant, les poêles de masse (à restitution lente de la chaleur), les radiateurs électriques à inertie et les radiateurs à eau.

Il existe des modes de chauffage qui utilisent à la fois la convection et le rayonnement, ils apportent un confort thermique satisfaisant. On peut citer : les panneaux rayonnants et les poêles à granulés.²⁰

¹⁹ Site internet : conseils thermique, Opcit.

²⁰ Idem.

- **Les variations de températures**

Le confort thermique est meilleur lorsque l'amplitude des températures est faible. On peut considérer qu'une amplitude de 1°C est acceptable. Par exemple, vous réglez la température de consigne à 20°C. Le chauffage va produire de la chaleur jusqu'à atteindre 20.5°C, puis ne se remettra en route qu'à 19.5°C.

Pour lisser au mieux les températures, il faut mettre en place une régulation efficace. Car tous les modes de chauffage ne sont pas dotés d'une régulation précise. Pour les poêles à granulés notamment, on accepte une amplitude de 2°C.

En été, des protections solaires couplées à une forte inertie thermique évitent les surchauffes.

- **La distribution de la chaleur**

Une bonne homogénéité de la température entre les pièces améliore le confort thermique. Cette harmonie est plus facile à atteindre lorsqu'il y a plusieurs émetteurs de chaleur (des radiateurs dans chaque pièce). Dans le cas d'un unique point chaud, comme un poêle à granulés, les températures sont moins homogènes. De ce fait, il faut limiter la surface chauffée par ces systèmes. A titre d'exemple, la Réglementation Thermique 2012 limite l'usage d'un poêle à granulés à une surface de 100m² afin d'obtenir une régulation correcte des températures.

- **L'humidité relative de l'air (hygrométrie)**

Un taux d'humidité situé entre 40% et 60% permet un bon confort thermique. Avec un taux d'humidité élevé, on aura tendance à augmenter la température de consigne (surconsommation d'énergie). A l'inverse, on aura tendance à diminuer la température de consigne dans un environnement plus sec (maisons RT 2012 notamment) mais il n'est pas recommandé de descendre en dessous de 40%. Pour réguler au mieux l'humidité, il est nécessaire de mettre en place une ventilation mécanique contrôlée.

I.4.3.d. Les mouvements d'air

Les mouvements d'air accentuent les échanges de chaleur par convection. Par exemple, quand la météo affiche une température réelle de 0°C, la température ressentie peut être de 7°C sous l'effet du vent. L'homme perçoit les mouvements d'air à partir d'une vitesse de 0.2m/s (0,7 km/h). Pour éviter ces flux d'air, on peut mettre en place une ventilation mécanique qui assure une vitesse de l'air assez faible. Cette vitesse est plus difficile à gérer dans le cas d'une ventilation naturelle.

Le choix du chauffage est également important (les convecteurs renforcent les mouvements d'air), de même qu'une bonne étanchéité à l'air du bâtiment, en particulier au niveau des ouvrants.

I.4.3.e. L'occupant

En fonction de sa sensibilité, de son activité et de sa tenue vestimentaire, l'occupant va également avoir une influence sur le confort thermique. Plus l'occupant a une activité physique soutenue et plus il est habillé chaudement, plus la température de consigne pourra être faible. Porter des pulls en hiver est donc un bon moyen de faire des économies d'énergie ! La sensibilité de chacun est également à prendre en compte.

L'âge est une variable importante de ce ressenti (jeunes enfants et seniors notamment).²¹

Conclusion

Au terme de ce chapitre, riche en informations liées à l'architecture bioclimatique et à l'efficacité énergétique ; nous pouvons largement se situer face à nos objectifs et de créer de par notre contribution par cette recherche un nouveau tournant dans le monde de l'architecture bioclimatique et du confort thermique. Cela se fera dans les chapitres suivants ; en mettant l'accent sur des matériaux à haute performance énergétique « MCP » plus que d'actualité pour répondre aux problématiques des temps modernes.

²¹ Site internet : conseils-thermiques, Opcit.

Introduction

Il est parfois difficile d'améliorer l'efficacité énergétique dans le bâtiment. En effet, l'utilisation de matériaux de constructions traditionnels s'avère parfois insuffisante pour permettre d'émerger d'une façon autonome vers les bâtiments du futur que l'on veut moins gourmands en énergie et plus respectueux de l'homme et de son environnement. Il s'agit désormais de chercher à adopter de nouveaux matériaux et systèmes constructifs permettant de réduire significativement la consommation énergétique des bâtiments. Plusieurs pistes ont été explorées comme l'utilisation de matériaux intelligents pour l'enveloppe légère des bâtiments. Ces matériaux sont capables de stocker de l'énergie par chaleur latente, puis de la diffuser en changeant de phase. Par ailleurs, les Matériaux à Changement de Phase permettent d'augmenter l'inertie thermique de la structure du bâtiment tout en améliorant le confort thermique des usagers²².

Pour cela, dans ce présent chapitre, nous allons tout d'abord définir la différence entre deux grandeurs essentielles participant à la transformation des MCPs « chaleur sensible et chaleur latente » avant de présenter les MCPs et leurs fonctionnement, leurs classification propriété passant par les avantages et inconvénients de chaque types et leurs domaine d'application ; pour enfin terminer par décrire les méthodes d'incorporation des MCPs dans les enveloppes des bâtiments et présenter des projets intégrant des MCPs commercialisés.

II-1 : Le stockage par chaleur sensible et par chaleur latente

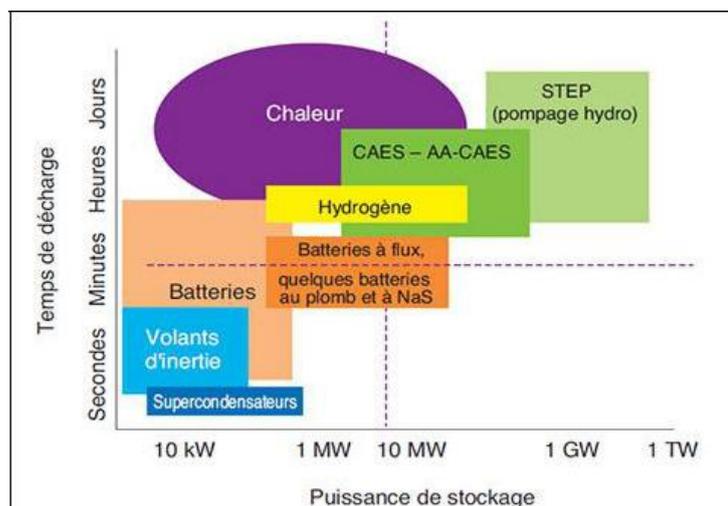


Figure II. 1 : Les différents systèmes de stockage de l'énergie

Source :Ponsot Jacquin. C, et al. Le stockage massif de l'énergie. Panorama 2013.

²⁷ Bouyer, J. Modélisation et simulation des microclimats urbains, étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Thèse de doctorat, 2009. Université de Nantes, France.

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.²³

Les différents systèmes adaptés au stockage (**figure II. 1**) 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)²⁴. 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.

L'énergie thermique peut être stockée suite à l'élévation de température qui modifie l'énergie interne du matériau. Les techniques de stockage de l'énergie thermique sont illustrées sur la (**figure II. 2**) Les deux voies principales de stockage thermique sont le stockage par la chaleur sensible et le stockage par chaleur latente. La sélection est fonction de la durée de stockage et de la température désirée. L'inertie thermique et la capacité à supporter de très hautes températures présentent des facteurs indispensables pour les matériaux de stockage de l'énergie²⁵.

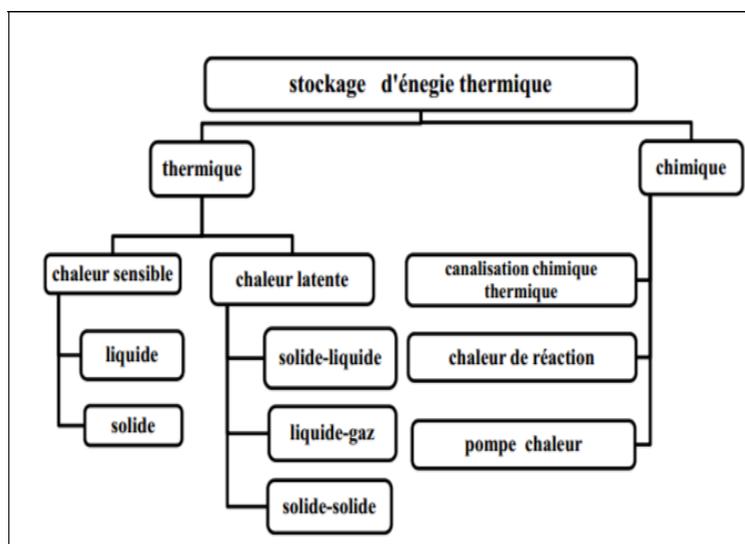


Figure II. 2 : Les différentes techniques de stockage de l'énergie thermique

Source : Akrouche, A. Étude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase. Mémoire de Magister, 2011. Université M'Hamed Bougara, Boumerdes. Ecole des mines de Nantes, France.

²³ Hongois, S. Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle. Thèse de doctorat, 2011. INSA de Lyon, France.

²⁴ Ponsot Jacquin, C, Bertrand, J F. Le stockage massif de l'énergie. Panorama 2013

²⁵ Hongois, S. Opcit.

II-1.1 Le stockage par chaleur sensible

Ce mode de stockage est le moyen le plus ancien utilisé pour emmagasiner de l'énergie sur des durées plus au moins longues par l'utilisation d'une source de chaleur pour élever la température d'un matériau sans changement d'état. Les propriétés thermo-physiques à savoir la conductivité thermique (λ), la chaleur spécifique (C_p) et la masse volumique (ρ) de quelques matériaux sont donné :

	λ (W/m.K)	C_p (350 °C) (J/kg.K)	ρ (kg/m ³)
Eau liquide (0 °C<T<100 °C)	0,6	4186	1000
Vapeur d'eau (T = 300 °C)	0,04	2,026	0.3652
Granite	2,79	775	2630
Céramique réfractaire	1,35	866	3500
Béton haute température (programme WESPE, T<400 °C)	1	916	2750
Béton haute température (programme WANDA, T<400 °C)	1,3	1100	2250

Tableau II.1. Propriétés thermo-physiques de quelques matériaux utilisés pour le stockage de l'énergie par chaleur sensible.

Source : Laghaoui, A, et al. Stockage de chaleur : Energie solaire et autres applications. Etude bibliographique, 2010. Ecole des mines de Douai

L'utilisation la plus courante de la chaleur sensible est le stockage thermique saisonnier par des systèmes à grande échelle tels que le stockage souterrain d'eau chaude, le stockage souterrain en aquifère, le stockage souterrain 'gravier/eau' et le stockage souterrain en puits²⁶. Les différents types de stockage sont illustrés sur la **figure II.3** :

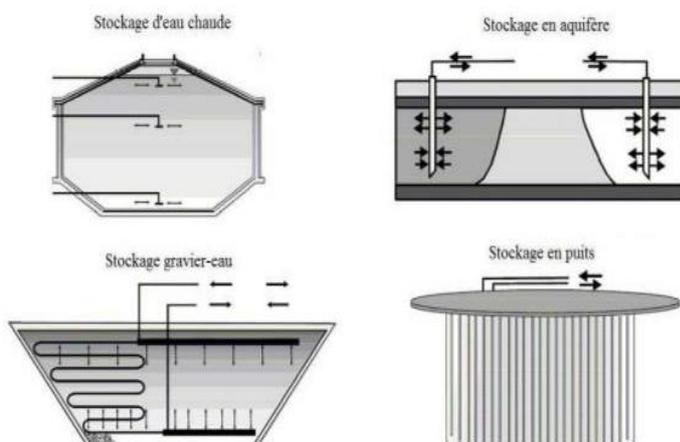


Figure II. 3 : Différents types de stockage souterrain par chaleur sensible

Source : Hongois, S. Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermo-chimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle. Thèse de doctorat, 2011. INSA de Lyon, France.

²⁶ Hongois, S, Opcit.

Plusieurs projets basés sur des systèmes de stockage par chaleur sensible existent déjà. Certains considèrent un stockage en aquifère naturel (ATES : Aquifer Thermal Energy Storage) comme celui du siège du parlement Allemand à Berlin (**figure II.4, a**). Ce projet couvre 12 % des besoins annuels en chaleur et 60 % des besoins annuels en froid. D'autres projets sont basés sur un stockage dans des roches ou en souterrain (UTES ou BTES : Underground ou Borehole Thermal Energy Storage) comme par exemple le Drake Landing Solar Community (DLSC) dans l'Alberta (**figure II.4, b**) qui fournit de la chaleur en hiver pour un quartier de plus de 50 maisons.²⁷

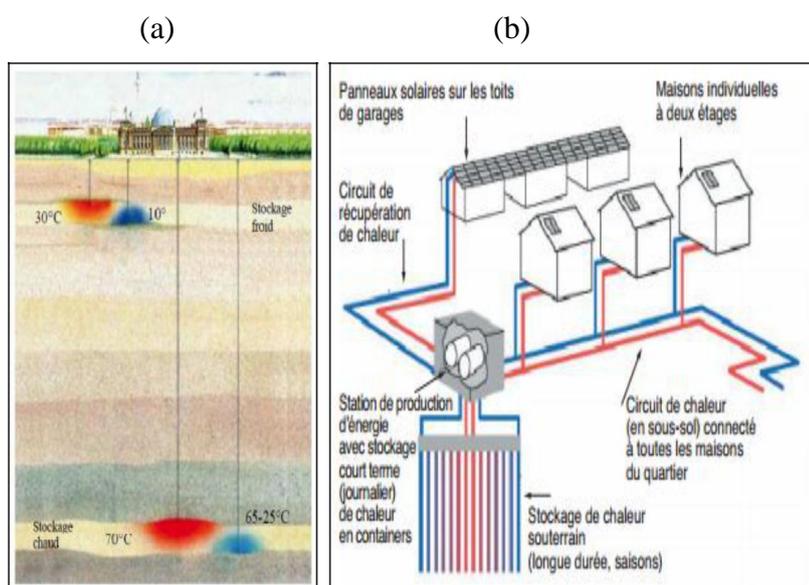


Figure II. 4 : Différents projets utilisant le stockage par chaleur sensible

Source : Hongois, S. Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle. Thèse de doctorat, 2011. INSA de Lyon, France.

L'énergie stockée par chaleur sensible est soumise parfois à des pertes thermiques importantes du fait de la mauvaise implantation, de l'isolation ainsi que de la longue durée des systèmes de stockage. Ce mode de stockage nécessite aussi des systèmes très volumineux. Il est donc nécessaire de bien choisir le système et sa dimension afin d'accroître leurs performances²⁸.

II.1.2. Le stockage par chaleur latente

Ce mode de stockage permet de stocker l'énergie par chaleur latente à une température constante qui correspond à la température de changement de phase ou changement d'état

²⁷ Hongois, S, Opcit.

²⁸ Akrouche, A. *Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase*. Mémoire de Magister, 2011. Université M'Hamed Bougara, Boumerdes. Ecole des mines de Nantes, France.

physique, ce dernier permet essentiellement de réguler la température dans les applications de chauffage ou de climatisation des bâtiments. L'énergie massique stockée s'écrit de la manière suivante²⁹:

$$Em_s = \Delta H_{latente} = \int Cp dT \quad (1. 2)$$

Où $\Delta H_{latente}$ est l'enthalpie massique de transformation ou de changement d'état.

Le matériau peut exister généralement sous différentes formes : solide, liquide ou gaz. En faisant varier la température et/ou la pression du milieu, le matériau peut passer d'un état à un autre. Les différents changements d'état sont : la fusion, la vaporisation et la sublimation. La transition la plus fréquemment utilisée est le changement de phase solide-liquide dont la variation volumique est faible. Cette dernière permet de stocker une grande énergie sous forme de chaleur latente avec des variations faibles de température. Un matériau à changement de phase stocke en premier lieu l'énergie sous forme de chaleur sensible et lorsque la température extérieure atteint sa température de changement de phase, le matériau change d'état provoquant une rupture des liaisons entre les chaînes moléculaires constituant le matériau. **La figure II.5** décrit la relation entre l'élévation de la température et l'enthalpie d'un matériau au cours et en dehors d'un changement de phase.³⁰

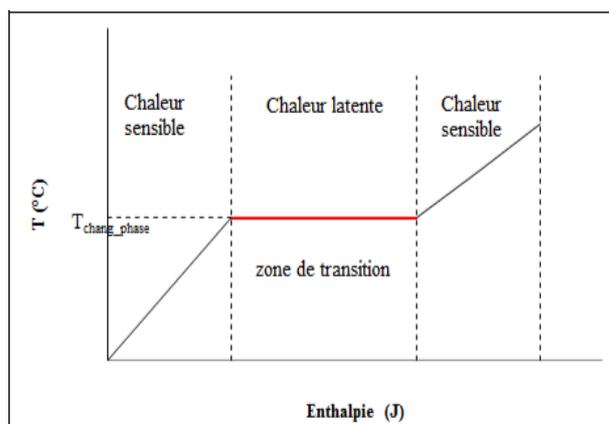


Figure II. 5 : Relation Température/Enthalpie.

Source : Laghzaoui, A, et al. Stockage de chaleur : Energie solaire et autres applications. Etude bibliographique, 2010. Ecole des mines de Douai.

Le changement d'état d'un matériau pur se fait à température constante et l'énergie sera stockée par chaleur latente jusqu'à la transformation complète d'un état à un autre. Généralement, le matériau continue à recevoir de l'énergie au cours du temps, ce surplus d'énergie sera alors stocké sous forme de chaleur sensible. La possibilité d'introduire ce mode

²⁹ Hongois,S, Opcit.

³⁰ Laghzaoui, A, Peerhossaini, D. Stockage de chaleur : Energie solaire et autres applications. Etude bibliographique, 2010. Ecole des mines de Douai.

de stockage est un verrou fondamental dans la problématique du chauffage et de la climatisation des bâtiments.

En effet, le recours à ce type de stockage dans le bâtiment permet de maintenir une température quasi-constante à l'intérieur d'une pièce et en cas de besoin l'énergie stockée sera libérée.³¹

Il existe trois familles de Matériaux à Changement de Phase (MCP). L'eau est ainsi le plus connue des accumulateurs thermiques à chaleur latente. Aujourd'hui, l'enjeu actuel dans le secteur du bâtiment est d'assurer un bon niveau de confort thermique en optimisant les montées et les chutes de température à l'intérieur d'une pièce grâce à l'augmentation de l'inertie thermique dans les bâtiments à structure légère. Un des moyens proposés est l'utilisation de matériaux capables de stocker et de libérer une grande quantité de chaleur dans des gammes de température ambiante. Ces matériaux de plus en plus utilisés dans les bâtiments sont connus sous le nom du "Matériaux à Changement de Phase". Ils sont capables de stocker et de libérer une grande quantité de chaleur grâce à leur chaleur latente.

Ces matériaux intelligents trouvent leurs applications dans plusieurs domaines en particulier le bâtiment.³² Dans la suite, nous présentons plus en détail la technologie des MCP ainsi que ses différentes applications notamment dans le secteur du bâtiment.

II.2 Les Matériaux à Changement de Phase (MCP)

Depuis des décennies, des études ont été menées afin de chercher des nouvelles techniques permettant de réduire de façon considérable les émissions de CO₂. Parmi les solutions proposées, la réduction de la consommation énergétique dans le secteur des bâtiments s'est avérée être l'une des clés prometteuses pour répondre à ces objectifs. Aujourd'hui, le stockage de l'énergie par chaleur latente présente des avantages certains pour les constructions modernes à basse consommation d'énergie. Ces constructions ont la capacité de réduire les consommations de chauffage en hiver grâce à leur faible inertie. Cependant, ces bâtiments se heurtent souvent à des problèmes de surchauffe en été dégradant ainsi les conditions de confort thermique des usagers. A cet égard, les MCP se sont affirmés comme de bons candidats pour la conception et la rénovation des bâtiments permettant ainsi d'améliorer le confort thermique d'été et de réduire la consommation d'énergie. Beaucoup d'études ont été menées sur les MCP pour l'identification de leurs caractéristiques thermo-physiques et leur effet quand ils sont incorporés dans une paroi.

³¹ Hongois, S, Opcit.

³² Akrouche, A. Opcit.

II.2.1 Intérêt du changement de phase

Le caractère isotherme ou quasi isotherme de la charge et de la décharge énergétique d'un MCP permet son utilisation en tant que régulateur de température : en effet, si l'on intègre ce dernier à l'enveloppe (murs extérieurs, plancher, plafond, ...) d'un bâtiment, il devient alors possible de stocker de la chaleur lorsque celle-ci est surabondante (été) ou présente au mauvais moment (dans la journée l'hiver).

En été, l'énergie solaire apportée au cours de la journée est stockée au fur et à mesure par les parois et ce, sans fluctuation excessive de la température à l'intérieur du bâtiment. Il est alors possible d'écarter de 3 °C à 5 °C les pics de température d'une pièce.

En hiver, on peut de la même manière stocker la chaleur apportée par le soleil dans les MCPs incorporés aux parois ; ceux-ci restitueront la chaleur accumulée dans la journée à la fin de la journée et pendant la nuit.

Par ailleurs, tout MCP peut servir de déphaseur thermique : tout apport ou perte énergétique (variation de température, rayonnement solaire...) en provenance du milieu ambiant peut provoquer la fusion ou la cristallisation du matériau à température quasi constante. Dès lors, le milieu situé de l'autre côté du MCP ne ressent pas aussitôt l'effet de cet apport ou de cette perte, mais ne commencera à le ressentir qu'après la fusion ou la cristallisation totale du matériau.

II.2.2 Description et principe actif

Les matériaux souvent utilisés pour le stockage par chaleur latente sont appelés Matériaux à Changement de Phase (MCP). Ces matériaux sont capables de changer d'état physique (**figure II.5**) sur une large plage de température et leur réactivité repose sur un principe physique simple: ³³Lorsque la température environnante 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 environnante chute, les MCP se cristallisent en restituant l'énergie qu'ils ont stockée.

II.2.3 Classification des MCP

Les MCP sont classés en trois grandes familles selon leur nature chimique comme le montre la **figure II.6** ; à savoir les MCP organiques (paraffines, corps non-paraffiniques,

³³ MAHA .A. Opcit.

polyalcools), inorganiques (hydrates salins, sels, métaux, alliages) et eutectiques (corps inorganiques et/ou organiques).³⁴

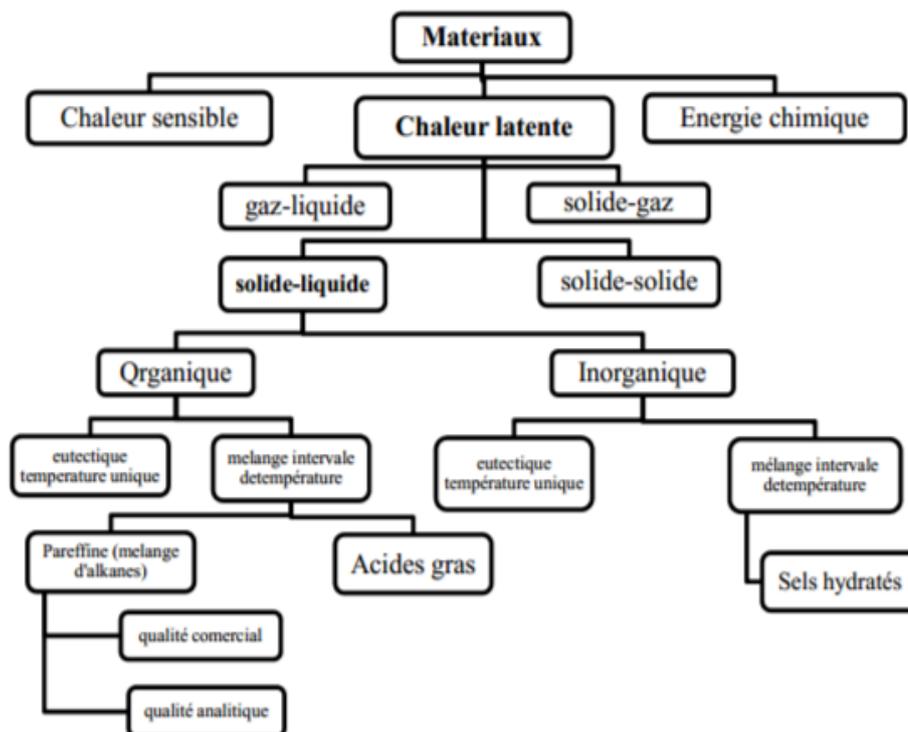


Figure II. 6 : Différents types des MCP

Source : Akrouche, A. Opcit.

- **Les composés organiques** : de propriétés thermiques moindres que les sels hydratés, ils sont utilisés en particulier pour le stockage de chaleur latente. Parmi ces composés, on trouve les paraffines ; les acides gras, les polyalcools.
- **Les composés minéraux (inorganiques)** : ils ont l'avantage de posséder des grandes chaleurs latentes et des prix bas, leur principal défaut concerne leur tendance à la surfusion, parmi ces composés : les sels, les métaux, les alliages et les sels hydratés.
- **Les eutectiques** : ils peuvent être organiques ou inorganiques.

II.2.3.a Les composés organiques

- **Paraffines**

Les paraffines sont une famille d'hydrocarbures saturés de formule brute C_nH_{2n+2} , aux propriétés très similaires. Parmi les MCPs solide-liquide, elles sont les plus utilisées, surtout

³⁴ Akrouche, A. Opcit.

pour les applications à basse température (de -10 à 100 °C) car elles offrent l'avantage d'avoir une chaleur latente qui dépend de la masse molaire et des températures de changement de phase variables, donnant de la flexibilité pour choisir le MCP approprié à chaque application. Dans cette catégorie, on peut citer notamment les paraffines n-Hexadecane ($T_{\text{fusion}} = 22 \text{ °C}$), n-Nonacosane ($T_{\text{fusion}} = 63,4 \text{ °C}$) ou encore le n-Triacontane ($T_{\text{fusion}} = 65,4 \text{ °C}$).³⁵

❖ Avantages

- Plus la longueur moyenne de la chaîne hydrocarbonée est élevée, plus la température de fusion et la chaleur latente sont élevées.
- Les paraffines ne montrent pas de tendance à la ségrégation des phases lors de leur transition et sont chimiquement stables.
- Elles ont une faible pression de vapeur saturante qui limite les risques de vaporisation.
- Certaines sont considérées comme non toxiques, inoffensives écologiquement et compatibles avec les réservoirs métalliques car elles ne provoquent pas ou peu de corrosion.
- Facilement disponibles et peu coûteuses.

❖ Inconvénients

- Leur conductivité thermique reste très faible ($\approx 0,25 \text{ W/m.K}$).
- Elles présentent une expansion volumique assez élevée ($\approx 15 \%$).
- Une densité peu importante. ($\approx 800 \text{ kg/ m}^3$).
- Les paraffines ont tendance à s'infiltrer dans certains plastiques et à les ramollir.

• Non paraffiniques :

Les acides gras sont caractérisés par la formule chimique $\text{CH}_3(\text{CH}_2)_{2n}\text{COOH}$ et ont à peu près les mêmes propriétés thermo-physiques que les paraffines. L'intérêt d'utiliser les acides gras comme MCP est de couvrir une gamme de température allant de 40 à 150 °C selon la longueur de la chaîne carbonée. Les acides gras les plus connus pour leur utilisation comme MCP sont l'acide stéarique ($T_{\text{fusion}} = 57,5 \text{ °C}$), l'acide sébacique ($T_{\text{fusion}} = 132 \text{ °C}$), l'acide palmitique ($T_{\text{fusion}} = 61-63 \text{ °C}$) et l'acide myristique ($T_{\text{fusion}} = 51,5-53,6 \text{ °C}$).

³⁵ Akrouche, A. Opcit.

❖ Avantages

Les acides gras présentent une chaleur latente de fusion du même ordre que celle des paraffines, voire légèrement en-dessous et un comportement similaire lors de la transition de phase, avec pas ou très peu de surfusion et une variation de volume du même ordre de grandeur. Par ailleurs, plus le nombre d'atomes de carbone dans leur chaîne carbonée est élevé, plus la température de fusion, la chaleur latente ainsi que le degré de cristallisation sont grands. La possibilité d'obtenir des mélanges eutectiques d'acides gras a permis d'élargir la plage de température des matériaux et ainsi la plage des applications. Les acides gras sont facilement produits à partir d'huiles végétales et animales. Ainsi, ils donnent l'assurance d'un approvisionnement bio-source.³⁶

❖ Inconvénients

Quelques auteurs constatent un problème de stabilité des acides gras au-dessus du point de fusion. Cette dégradation peut être cependant due à la vaporisation du produit lorsqu'il est sous forme liquide et non à une réelle dégradation du produit²⁴.

• Alcools de sucre

Les alcools de sucre sont des composés organiques appartenant à la famille des polyols. Les plus connus sont le sorbitol, le mannitol, le xylitol, le lactitol, le malitiol et l'érythritol. Ces produits sont extraits des plantes et peuvent être qualifiés de bio-sourcés. Par exemple, le mannitol provient des algues alors que le sorbitol est extrait du sirop de maïs.³⁷

❖ Avantages

- Les alcools de sucre possèdent des valeurs d'enthalpie de phase élevées.
- Ils présentent une grande masse volumique de l'ordre de 1500 kg/m^3 , ce qui le conduit à une densité énergétique très élevée.
- Des produits peu coûteux et non toxiques.

³⁶ Ait Zai Fatma Zohra, mémoire de master II , Etude et réalisation d'un système de refroidissement d'un microprocesseur par l'effet conjugué du Peltier et un Matériaux à Changement de Phase, université mouloud Mammeri Tizi Ouzou,2018.

³⁷ Zalba, B. *Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications*. Applied Thermal Engineering 23, 2003, p.251-283

❖ Inconvénients

- Les alcools de sucre présentent une surfusion.
- Certains alcools de sucre présentent des problèmes de compatibilité avec l'air ambiant car ils réagissent avec l'oxygène.

II.2.3. b. Les composés inorganiques

Les matériaux inorganiques sont classés en trois catégories : les sels, les hydrates de sels et les métaux.³⁸

• Hydrates de sels :

Les hydrates de sels peuvent être considérés comme des alliages de sels minéraux et d'eau formant un solide cristallin typique de formule générale $AB \cdot nH_2O$.

Le sel hydraté le plus utilisé par son faible coût est le $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ ($T_{\text{fusion}} = 28-30 \text{ }^\circ\text{C}$). On peut citer aussi le $Mn(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ pour les applications de climatisation.

❖ Avantages

- Les hydrates de sels sont appropriés pour leur utilisation dans le stockage thermique parce qu'ils présentent une grande chaleur latente ($\approx 100-300 \text{ kJ/kg}$).
- Une température de fusion adaptée aux applications à basse température ($\approx 8-100 \text{ }^\circ\text{C}$) et sont largement compétitifs en termes de coût et de rentabilité.
- Ils présentent une conductivité thermique plus élevée que les paraffines (environ $0,5 \text{ W/m.K}$).

❖ Inconvénients

Le principal problème qui se pose lors de l'utilisation des hydrates de sels est leur fusion non congruente, ce qui veut dire que le sel n'est pas totalement soluble dans l'eau d'hydratation au niveau du point de fusion. Ainsi, au moment de la fusion, il peut se former une solution aqueuse saturée en sel et le surplus de solide peut se déposer au fond du contenant par sa différence de masse volumique, ce qui empêche la solidification. Un autre inconvénient des hydrates de sel est la surfusion³⁹.

Certains hydrates de sels peuvent montrer des problèmes de corrosion des structures métalliques des systèmes de stockage.

³⁸ Zalba, B. Opcit.

³⁹ Ait Zai Fatma Zohra. Opcit.

- **Les sels**

Les sels sont des composés ioniques neutres formés à partir de cations et d'anions. Les sels purs et les mélanges de sels non eutectiques présentent généralement un large spectre de températures de fusion et une chaleur latente variant selon leur type.

Les sels les plus connus sont les nitrates comme le NaNO_3 ($T_{\text{fusion}} = 307 \text{ }^\circ\text{C}$), le KNO_3 ($T_{\text{fusion}}=333 \text{ }^\circ\text{C}$) ou encore le LiNO_3 ($T_{\text{fusion}} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$).⁴⁰

- ❖ **Avantages**

- Ces matériaux sont très intéressants pour leur utilisation dans le stockage thermique à haute température, car ils possèdent une température de fusion entre 250 et 1680 °C ;
- Des chaleurs latentes de fusion entre 68 et 1040 kJ/kg ;
- Ils présentent une expansion volumique beaucoup plus faible que les composés organiques (de l'ordre de 7 %) ;
- Leur coût relativement faible devant les composés organiques.

- ❖ **Inconvénients**

Certains sels peuvent aussi présenter un peu de surfusion. Un autre point non négligeable est leur aptitude à corroder les métaux, ce qui rend la conception des réservoirs de stockage plus compliquée. Par ailleurs, les sels peuvent être des oxydants puissants et sont donc incompatibles avec les huiles thermiques, dont l'utilisation comme fluide caloporteur sera à proscrire. Enfin, quelques sels présentent des problèmes de stabilité thermique, leurs propriétés pouvant s'altérer avec le temps.⁴¹

- **Les Métaux**

Quelques auteurs se sont attardés sur l'utilisation de métaux en tant que MCP, notamment J. P. Kotzé et al. Ou encore H. Ge et al.. On peut citer notamment le Potassium ($T_{\text{fusion}} = 63.2 \text{ }^\circ\text{C}$), le $\text{Bi}_{58}\text{Sn}_{42}$ ($T_{\text{fusion}} = 138 \text{ }^\circ\text{C}$) ou encore le Lithium ($T_{\text{fusion}} = 186 \text{ }^\circ\text{C}$).

- ❖ **Avantages**

Les avantages que présentent les métaux sont leur conductivité thermique bien plus élevée que les autres types de MCP, leur chaleur latente très élevée mais également leur stabilité à

⁴⁰ Pasupathy, A. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 12, 2008, p.39-64.

⁴¹ Ait Zai Fatma Zohra. Opcit.

long terme. Toutes ces caractéristiques permettent un stockage rapide de la chaleur avec une faible expansion volumique.⁴²

❖ Inconvénients

Leur utilisation est encore à un stade de recherche et ils ne sont pas encore sérieusement envisagés pour une application industrielle en raison de la contrainte de masse. De plus, ils présentent aussi des problèmes de corrosion. Les quelques MCPs envisagés sont le gallium ou encore le plomb-bismuth.⁴³

II.2.3. c. Eutectiques

Les MCPs eutectiques sont des mélanges de deux ou plusieurs substances qui se comportent comme un corps pur, c'est-à-dire que leur température de changement d'état est unique. En général, les eutectiques sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques.

On peut citer les eutectiques de nitrates tel que $\text{LiNO}_3\text{-NH}_4\text{NO}_3\text{-NaNO}_3$ avec une composition massique de 25%-65%-10% ($T_{\text{fusion}} = 80.5^\circ\text{C}$) ou encore les eutectiques d'organiques tel que $\text{CH}_3\text{CONH}_2\text{-C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$ avec une composition massique de 50%-50% ($T_{\text{fusion}} = 65^\circ\text{C}$).

Les eutectiques d'hydrates de sels comme le mélange isomassique $\text{Mg}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}\text{-MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($T_{\text{fusion}} = 59.1^\circ\text{C}$) et enfin les eutectiques de polyols comme le mélange à 25 % molaire d'érythritol et 75% de xylitol, ($T_{\text{fusion}} = 85^\circ\text{C}$).⁴⁴

❖ Avantages

- Leur changement de phase se fait sur une plage de température restreinte comparable à celle des corps purs.
- Leur chaleur latente est supérieure à celle des composés purs.
- Ils ne présentent pas de ségrégation de phase contrairement aux hydrates de sels.

❖ Inconvénients

L'inconvénient majeur de ce type de mélange est de réussir à déterminer le point eutectique exact afin d'avoir une température de fusion unique, comme pour un corps pur.

⁴² Ait Zai Fatma Zohra. Opcit.

⁴³ Idem.

⁴⁴ Pasupathy, A. Opcit.

II.2.4. Quelques phénomènes ayant un impact sur l'efficacité du stockage

II.2.4.a. La surfusion

Quand on refroidit un liquide, on n'observe pas en général la solidification au moment où on atteint la température de fusion. Le matériau peut rester à l'état liquide jusqu'à plusieurs dizaines de degrés au-dessous de la température de changement d'état. Lorsque la solidification se déclenche, elle dégage de la chaleur et si la masse de liquide est assez grande et les échanges de chaleur avec l'extérieur faibles le déclenchement de la solidification provoque une remontée de la température du matériau jusqu'à la température de changement d'état.

Ce phénomène réduit l'efficacité thermique des unités de stockage par chaleur latente par rapport à ceux par chaleur sensible. En effet, la décharge de la chaleur (pendant la solidification) a lieu à des températures inférieures de celles où le stockage de cette chaleur a eu lieu. On a donc une différence entre la chaleur absorbée pendant le chauffage et celle restituée pendant le refroidissement.

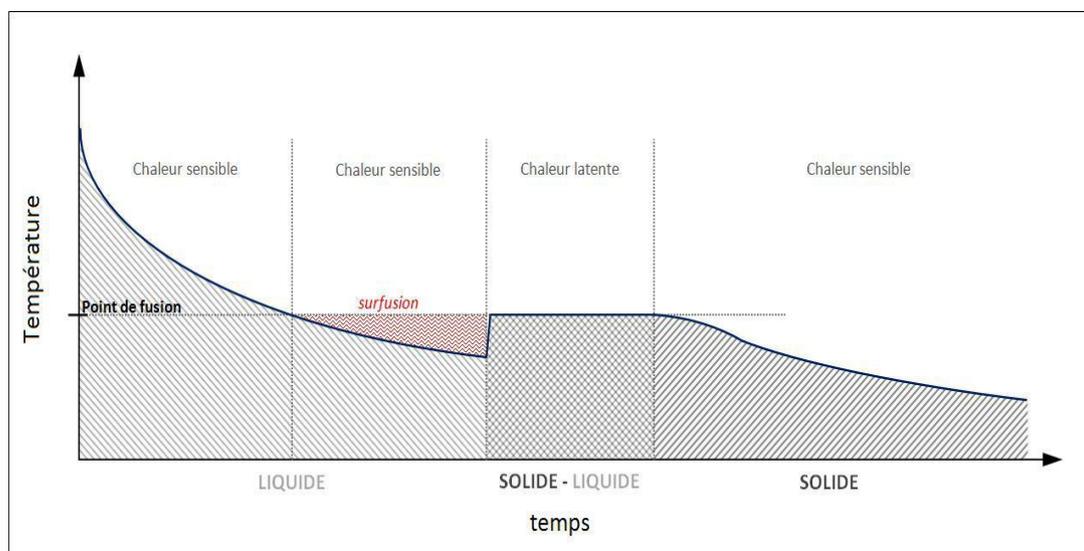


Figure II.7 : Surfusion lors du refroidissement d'un MCP.

Source : Meshgin P, et al. Effect of phase-change materials on properties of concrete. ACI MaterJ. 2012;109:71–80.

II.2.4.b. La surchauffe

La surchauffe d'un corps est le réchauffement de ce corps après son changement d'état (réchauffement de la phase liquide après la fusion du corps, de la phase vapeur après la vaporisation du corps). Si cette surchauffe s'effectue pendant une courte durée, elle n'est considérée que comme une chaleur sensible supplémentaire stockée dans le système.

Si elle s'effectue pendant une longue durée, le stockage par chaleur latente perd l'essentiel de ses avantages par rapport au stockage par chaleur sensible.

II.2.4.c. La dilatation

Pendant le changement de phase solide- liquide, le matériau change de densité et donc de volume. Ceci peut poser problème dans quelques applications en particulier quand on utilise un conteneur fermé qui doit supporter l'augmentation de pression.

II.3. Critère de choix des matériaux a changement de phase.

La présente recherche s'intéresse particulièrement aux MCP organiques adaptés à la problématique des bâtiments. Ces matériaux sont chimiquement stables, simples à mettre en œuvre et contribuent à un renforcement thermique de la structure grâce à leur forte chaleur latente qu'ils échangent au moment de changement de phase. De plus, ces matériaux présentent des températures de fusion dans la gamme de température du confort thermique des bâtiments et une faible variation de volume.⁴⁵ Les MCP réduisent également la consommation de chauffage l'hiver et les besoins en climatisation en été en stockant le surplus de chaleur et en restituant la chaleur emmagasinée. Cependant, les MCP présentent aussi quelques inconvénients à savoir : la surchauffe, la perte d'eau d'hydratation, la corrosion (compatibilité avec les matériaux de construction), l'inflammabilité, etc.

Il existe deux phénomènes majeurs qui rendent très difficile l'utilisation de ces composés pour un stockage de l'énergie par chaleur latente. En effet, dans certaines conditions, un retard de la cristallisation au cours de refroidissement en phase liquide peut se produire. Ce phénomène de surfusion va entraîner une température de solidification inférieure à la température de fusion et par conséquent un flux restitué inférieure au flux absorbé. La surfusion dépend de plusieurs paramètres tels que le volume, la vitesse de refroidissement, le nombre et la nature de cycles thermiques, la pression. D'autre part, pour les matériaux à fusion non-congruente, un phénomène de ségrégation de phase peut se déclencher. Le recours à des additifs est alors nécessaire pour remédier à ces problèmes et pour assurer le bon fonctionnement de ces produits⁴⁶.

Le choix d'un MCP dépend essentiellement de l'application visée et des besoins de l'utilisateur. Il faut ainsi définir les critères qui permettent de faciliter le choix d'un MCP pour une application donnée⁴⁷. La température de transformation ainsi que la plage de fusion restent des critères importants dans le choix du type des MCP à utiliser. Leur plage de fusion

⁴⁵ MAHA A. Opcit.

⁴⁶ Idem.

⁴⁷ Idem.

peut être déterminée en fonction de l'application souhaitée (bâtiment, nucléaire, transport, alimentaire, textile, etc.). D'autre part, ces matériaux doivent présenter une grande chaleur latente de fusion. D'autres critères sont aussi à considérer tels que :

II.3.1. Les propriétés thermiques

Une grande conductivité thermique facilite et accélère les cycles de charge et décharge. Ces cycles risquent d'impacter la structure et le mode de fonctionnement de ces matériaux, c'est pourquoi les MCP doivent maintenir les mêmes propriétés thermo physiques au cours de ces cycles thermiques.

II.3.2. Les propriétés physico-chimiques

Afin d'avoir une capacité de stockage plus importante, les MCP doivent présenter une masse volumique élevée. Par ailleurs, ces matériaux doivent être stables chimiquement dans le temps et avec la température, non-toxiques et ininflammables. Afin d'éviter toute réaction chimique qui peut se produire entre les MCP et les constituants d'une paroi, il faut veiller à ce que les MCP soient compatibles avec les autres matériaux.⁴⁸

Plusieurs études ont été dédiées à la présentation des types de MCP et à l'étude de leurs caractéristiques et leurs domaines d'applications.

II.4. Les caractéristiques idéales d'un MCP

Les caractéristiques idéales d'un MCP sont présentées à titre indicatif et classées en quatre catégories : propriétés thermodynamiques et thermiques, propriétés cinétiques, propriétés chimiques, propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement)⁴⁹

II.4.1. Propriétés thermodynamiques et thermiques

- Une température de fusion dans la gamme de températures désirée.
- Une chaleur latente de fusion par unité de masse importante.
- Une haute densité, pour diminuer le volume du stockage.
- Une bonne conductivité thermique, pour améliorer les transferts thermiques et diminuer les gradients de température requis à la charge et à la décharge.
- Une bonne chaleur spécifique, pour bénéficier des effets du stockage en chaleur sensible.
- Une faible variation de volume pendant le changement de phase, pour pouvoir utiliser des géométries simples de capsules et d'échangeurs.

⁴⁸ MAHA A. Opcit.

⁴⁹ Laghzaoui. A. Opcit.

II.4.2. Les propriétés cinétiques

- Le matériau ne doit pas présenter de surfusion pour que la chaleur stockée puisse être restituée à la même température que la température de stockage. La surfusion est la capacité du MCP à descendre sous le point de cristallisation tout en restant sous forme liquide. Il s'agit d'un état métastable qui est rompu soit par une perturbation extérieure (choc, impureté), soit par abaissement de la température jusqu'au point de nucléation, c'est-à-dire lorsque le premier germe de solide apparaît. Ainsi, si cette surfusion est assez importante, la chaleur est restituée à une température plus faible que la température de stockage. Il est remarqué dans la littérature qu'un degré de surfusion de 5-10 °C peut aller jusqu'à empêcher la décharge du système de stockage.
- Par ailleurs, la vitesse de cristallisation est déterminante pour la puissance du système de stockage. Si le produit est long à cristalliser, il rendra sa chaleur très lentement et limitera la puissance échangée avec le fluide caloporteur.

II.4.3. Les propriétés chimiques

- Vis à vis de la température : Pas de décomposition chimique dans la gamme de température de fonctionnement du stockage. Une fusion congruente, pour que la composition chimique du MCP ne change pas au cours du temps.
- Vis à vis du milieu environnant : Pas de corrosion avec les matériaux de construction, pas de risque d'inflammabilité ni d'explosion en contact avec l'atmosphère.

II.4.4. Propriétés sociétales (économie, sécurité, environnement)

- Le MCP doit être disponible en grandes quantités.
- Être bon marché.
- Être non toxique pour les êtres vivants.
- Être recyclable en fin de vie.

II.5. Procédés d'incorporation des MCP dans l'enveloppe des bâtiments

II.5. 1. L'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 englobante, de protéger les MCP de leur

milieu environnant et de faciliter l'incorporation de ces produits dans des matériaux comme le béton.⁵⁰ 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. Par ailleurs, ce dernier doit résister à la dilatation et aux variations de volume de la cire de paraffine entre deux phases solide et liquide qui peut être supérieure à 10 %. Il existe deux procédés d'encapsulation des MCP : la macro-encapsulation et la micro-encapsulation.⁵¹

II.5. 1.a. La 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.⁵²

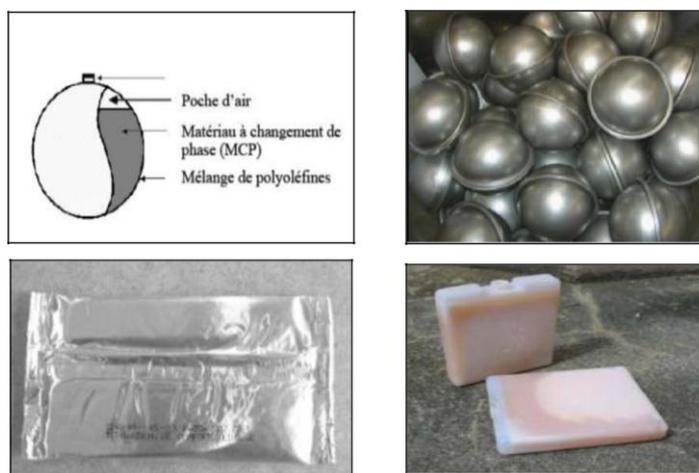


Figure II.8 : Exemple des MCP macro-encapsulés : conditionnement en nodule, en balle inoxydable, en sac plastique et en briquettes plastiques.

Source : Akrouche, A. Opcit.

II.5. 1.b. La micro-encapsulation

C'est une technique simple et efficace permettant d'encapsuler la matière active dans un matériau enrobant.⁵³ La taille des particules micro-encapsulées varie entre 1 μ m et 1 mm. Les microparticules ainsi formées contiennent généralement entre 1 et 90 % en masse de la matière active.

⁵⁰ Vandamme, T, et al, Microencapsulation des sciences aux technologies. Lavoisier, 2007.

⁵¹ Akrouche, A. Opcit.

⁵² Idem.

⁵³ BELOUADEH, C, Contribution à l'élaboration des matériaux à changement de phase par microencapsulation (Application au textile). Master académique, 2012. Université Kasdi Merbah Ourgla.



Figure II.9 : Exemple des MCP micro-encapsulés : à l'état poudre et à l'état liquide

Source : BELOUADEH. C, Contribution à l'élaboration des matériaux à changement de phase par microencapsulation (Application au textile). Master académique, 2012. Université Kasdi Merbah Ourgla.

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.

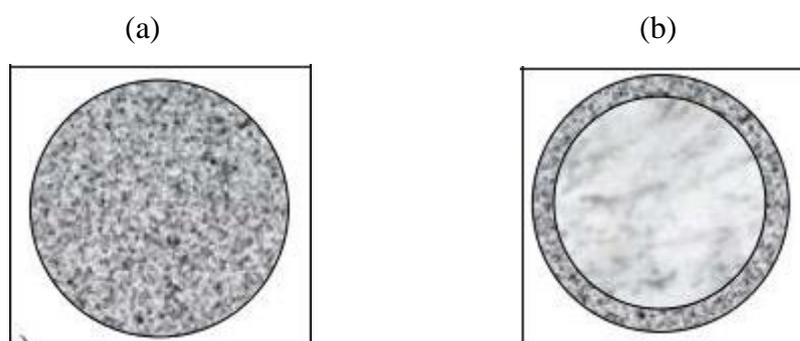


Figure II.10 : Structure de microparticules : (a) Microsphère (b) microcapsule.

Source : Vandamme. T, et al. Microencapsulation des sciences aux technologies. Lavoisier, 2007.

La taille des microparticules variant généralement entre 1 et 1000 μm suit une distribution granulométrique gaussienne assez large qui varie en fonction du procédé de fabrication. La distribution granulométrique et la morphologie de ces derniers peuvent être déterminées respectivement par la granulométrie à variation de résistance électrique ou diffraction laser et la microscopie optique ou électronique. Il existe deux types de structure de microparticules comme illustré sur la **figure II.10**.⁵⁴

La microsphère est constituée par une substance active dispersée dans une matrice continue de polymère ou de lipide alors que la microcapsule est un réservoir formé par un noyau qui

⁵⁴ Vandamme. T .Opcit.

contient la substance active sous forme liquide, solide ou gazeuse entouré par une paroi de matériau enrobant.

La microcapsule présente des morphologies différentes comme le montre la **figure II.11**. La morphologie dépend essentiellement des propriétés physicochimiques de la substance active, la composition de la paroi externe et la technique d'encapsulation.

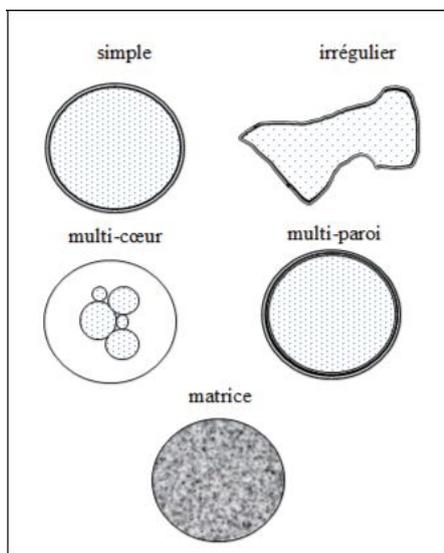


Figure II.11 : Les différentes morphologies des Microcapsules

Source : Vandamme. et al. Micro encapsulation des sciences aux technologies. Lavoisier, 2007.

Deux techniques de micro encapsulation sont décrites ci-dessous :

- La polymérisation inter faciale qui se produit suite à une réaction chimique entre deux réactifs à l'interface de la phase dispersée d'origine organique ou aqueuse. La phase dispersée contient le matériau à disperser et un monomère. Après l'émulsion, cette phase est diluée afin d'apporter le deuxième monomère en phase continue. La taille de gouttelette de l'émulsion formée permet de contrôler la taille moyenne des microcapsules.⁵⁵

- Le procédé de Nébulisation-séchage connu sous le nom de séchage par pulvérisation (spray-drying) qui constitue une technique utilisée depuis des décennies pour encapsuler plusieurs produits notamment les MCP. C'est la méthode la plus courante, la plus simple et la plus économique. Cette technique est utilisée par BASF l'un des fabricants des MCP. Son principe est basé sur la nébulisation d'une formulation liquide (solution, suspension ou émulsion) formée par le polymère et le matériau actif. Un aérosol est formé suite à une nébulisation par une buse d'atomisation pneumatique, ultrasonore ou rotative. Au cours de ce processus, les microparticules (microcapsules ou microsphères) solides se forment après

⁵⁵ Vandamme. T .Opcit.

l'évaporation rapide de l'aérosol dans une chambre de dessiccation qui émet un flux d'air chaud ou d'azote. La taille des particules ainsi formées est généralement de l'ordre de 10 µm. Il a été constaté une perte significative du produit de départ suite à l'adhésion des particules sur les parois de l'appareil utilisé ou à leur agglomération.⁵⁶

Bien que l'encapsulation a amélioré significativement les propriétés thermo physiques des MCP, la rigidité de la paroi encapsulant le matériau actif empêche les transferts de chaleur par convection ce qui diminue la vitesse de transfert thermique.

II.5. 2. L'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.⁵⁷ L'introduction du MCP dans le mélange :

- ne doit pas interférer avec le processus d'hydratation ;
- ne doit pas 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.5. 3. 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.

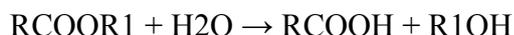
II.6. La stabilité du MCP dans le béton

Nous avons vu qu'un des problèmes posés par l'incorporation des MCP dans le béton est sa compatibilité avec le béton. Ce problème est dû en grande partie au caractère alcalin du béton confronté à l'acidité de certains MCP. Les paraffines, par exemple, ne sont pas concernées par ce problème car elles sont non réactives et stables et ne nécessitent pas de

⁵⁶Vandamme. T .Opcit.

⁵⁷ Christophe. J, et al. Vers des bâtiments à énergie positive, Proposition de structuration des actions de recherche. PREB4T, Juin 2009.

modification du béton. Par contre les esters d'acides gras peuvent s'hydrolyser suivant la réaction:⁵⁸



La stabilité du couple MCP – béton dépend donc du traitement préventif effectué pour diminuer cette alcalinité.

Les moyens utilisés sont :

- Les traitements thermiques (autoclavage par exemple).
- L'ajout de matériaux qui diminuent l'alcalinité.

II.7. Les MCP dans les matériaux de construction : Quelques réalisations et retour d'expériences

II.7. 1. Applications et réalisations

Les parois massives d'un bâtiment permettent de réduire les pertes thermiques grâce à leur masse. Ces parois massives sont en effet capables de lisser le pic de température au sein d'une pièce. Cependant, aujourd'hui afin de diminuer les coûts de construction, les critères de dimensionnement étant par ailleurs respectés, les professionnels des bâtiments essaient de réduire au maximum les épaisseurs des parois de bâtiments tout en respectant les normes de la réglementation thermique.⁵⁹ Malheureusement, les constructions modernes associées parfois à une grande surface vitrée peuvent souvent causer des problèmes de surchauffe dans les bâtiments.

Dans ce cadre, les Matériaux à Changement de Phase peuvent être utilisés dans la rénovation ou la construction des nouveaux bâtiments pour renforcer leur inertie thermique et Optimiser l'épaisseur de la paroi. Il existe plusieurs méthodes d'utilisation des MCP : soit par incorporation directe dans les matériaux de construction (plâtre, béton, etc.) soit sous forme de plaques (plaque Energain, etc).

L'industrie chimique BASF par exemple a déjà réalisé à Ludwigshafen (Allemagne) en collaboration avec des industriels et des entreprises du bâtiment un concept novateur de bâtiment dit "Maison 3 litres" (3-litre house). Ce bâtiment se repose sur l'utilisation et

⁵⁸ Drissi, S. Etude des performances thermiques des parois en béton modifié avec des matériaux à changement de phase. Rapport des fins d'étude. 2012. Ecole spéciale des travaux Publics (ESTP), France, Université de Cergy Pontoise (UCP), France et l'Ecole Nationale d'Ingénieur de Tunis (ENIT), Tunis.

⁵⁹ MAHA.A. Opcit.

l'association d'un certain nombre de produits et technologies innovants dans le secteur du bâtiment. On citera quelques exemples de matériaux et de technique utilisés :⁶⁰

- Utilisation d'un système de ventilation centralisé avec unité de récupération de chaleur ;
- Création d'une isolation thermique réalisée en NEOPOR, un matériau composé à la base de polystyrène incorporant des réflecteurs infrarouges qui réfléchissent les rayons de chaleur et les stockent ainsi à l'intérieur ;
- Installation des plaques en plâtre incorporant des matériaux à changement de phase : MICRONAL ;
- Installation de chaudière collective à condensation gaz, etc.

Ce concept basé sur de nombreuses innovations qui associe réduction de consommation d'énergie et d'émission de gaz à effet de serre, pertinence économique et équilibre sociologique. Cet immeuble ne consomme, pour le chauffage, que trois litres de fuel par m² (contre plus de 23 litres auparavant) et rejette jusqu'à 80 % de CO₂ en moins par rapport à une conception plus classique.

D'autres projets élaborés par BASF ont été effectués en utilisant également des Matériaux à Changement de Phase. Un exemple de ces projets est présenté sur la **figure II.12**.



Figure II.12 : Quelques réalisations de bâtiments par BASF en utilisant des MCP

Source : site internet www.basf.fr/ecp2/France/fr/ consulté le 19 Avril 2019

4500 mètres carrés de dalles de plafond et de murs secs dans le Lycée de Diekirch à Luxembourg (**figure II.13**) sont modifiés avec des MCP de BASF. Cette technique a été

⁶⁰ Vandamme. T. OPCIT.

utilisée afin d'améliorer l'inertie thermique du bâtiment et réduire les consommations énergétiques.⁶¹



Figure II.13 : Lycée de Diekirch à Luxembourg.

Source : site internet <http://www.basf.fr/ecp2/France/fr/> consulté le 19 Avril 2019

Le palais de Tokyo à Paris présenté sur la **figure II.14** est un bâtiment construit en verre transparent. Ce bâtiment à faible inertie thermique a été modifié en 2009 avec des panneaux de Dupont Energain afin d'augmenter son inertie thermique. Ces panneaux ont été installés à l'intérieur du faux-plafond.



Figure II.14 : Palais de Tokyo à Paris.

Source : site internet <https://www.lemoniteur.fr/article/nomiya-restaurant-transparent-sur-le-toit-du-palais-de-tokyo-s-habille-de-matériaux-a-changement-de-phase.1915039> consulté le 19 Avril 2019

La plupart des réalisations ont été menées en utilisant des panneaux en MCP. Le manque de retour d'expérience, restreint l'application de ces matériaux qui restent actuellement peu

⁶¹ Site internet : www.basf.fr/ecp2/France/fr/ consulté le 19 Avril 2019.

connus. De plus, la question de développer de nouveaux bétons incorporant des MCP reste aujourd'hui sans réponse. Plusieurs travaux de recherche ont été menés dans ce contexte afin de permettre une meilleure caractérisation de ces matériaux et étudier l'influence de leur incorporation dans le béton.

II.7.2. Exemple des MCP commerciaux

Il existe plusieurs types de produit commercialisés parmi lesquels on cite les produits DUPONT et BASF. En effet, ces deux leaders de l'industrie chimique ont chacun commercialisé leur version des MCP dont ils sont les principaux fournisseurs en Europe.

Le produit Dupont se présente sous la forme d'une plaque (**figure II.15**) 1 m x 1,2 m et d'une épaisseur de 5,26 mm.

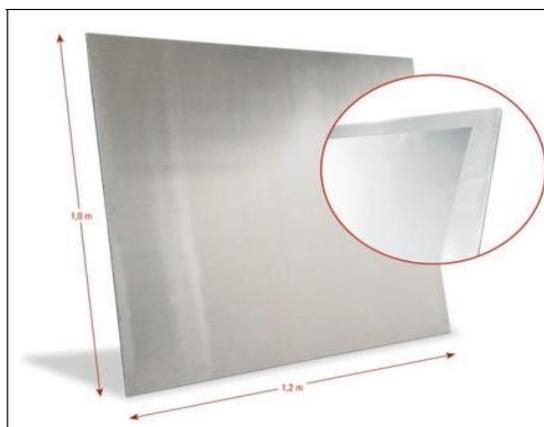


Figure II.15 : Plaque Energain commercialisée par Dupont de Nemours.

Source : site internet <https://www.econology.fr/le-blog/dossier-mcp-pourquoi-les-materiaux-a-changement-de-phase-sont-une-revolution-pour-le-batiment> consulté le 19 avril 2019.

Ces plaques sont constituées d'un mélange de polymère (éthylène)/MCP à base de paraffine enveloppé par deux couches minces d'aluminium pour rigidifier l'ensemble. Ces panneaux peuvent être facilement découpés à la taille désirée puis simplement collés, agrafés ou vissés sur les murs ou sur le plafond pour augmenter l'inertie thermique de la paroi dont il fait partie.⁶²

BASF a commercialisé plusieurs types de produits, ci-dessous présentés (**figure II.16**). Des études ont montré également que les capsules de MCP ont gardé les mêmes propriétés thermo physiques après 10 000 cycles thermiques.

⁶² Site internet <https://www.econology.fr/le-blog/dossier-mcp-pourquoi-les-materiaux-a-changement-de-phase-sont-une-revolution-pour-le-batiment>

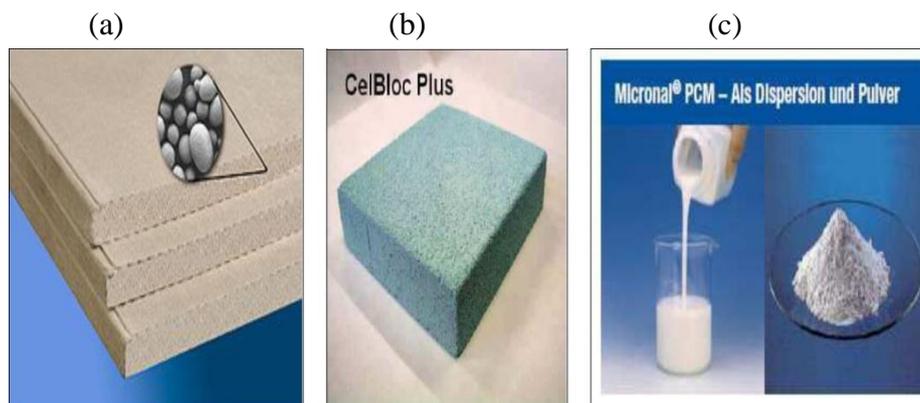


Figure II.16 : Produits BASF, (a) smartboard (b) béton cellulaire (c) Micronal liquide et solide.

Source : site internet <http://www.basf.fr/ecp2/France/fr/> consulté le 19 Avril 2019

Il existe plusieurs autres types de produits commercialisés. Le **tableau II.2** récapitule quelques produits autres que ceux commercialisés par les entreprises BASF et DUPONT :

MCP	Type de produit	T fusion (°C)	Chaleur de fusion (KJ/Kg)
Astorstat HA17	Paraffine et cire	21,7 - 22,8	-
Rubitherm RT26	Paraffine	24-26	232
Rubitherm RT27		28	206
Climsel C23	Sel hydraté	23	148
STL27		27	213
TH29		29	188

Tableau II.2 : MCP commercialisés

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une synthèse de nos lectures et recherches sur les MCP ainsi que l'effet de leur incorporation dans les matériaux de construction. Nous avons tout d'abord décrit les différents modes de stockage de l'énergie thermique, les différentes méthodes d'encapsulation des MCP et les domaines d'applications de ces matériaux. Par la suite, un état de l'art sur la réalisation de projet et les travaux de recherche visant à développer la commercialisation des MCPs a été dressé. Néanmoins, les études concernant les bétons incorporant des MCP sont en nombre limité ce qui justifie l'importance et la nécessité de ce travail de recherche qui a pour objectif de contribuer à une meilleure compréhension du comportement de béton incorporant des MCP.

Nous présentons dans le troisième et dernier chapitre des essais pratiques afin de mieux appréhender le comportement thermique et mécanique du béton imprégné de ces matériaux.

Introduction

Suite aux recherches bibliographiques qui nous ont permis de mieux comprendre le mécanisme de fonctionnement des MCPs et dans l'optique de mettre en application les connaissances acquises dans les deux premiers chapitres et de les approfondir nous allons passer à la partie expérimentale de notre étude.

Le but de notre étude est de caractériser en premier lieu, les propriétés mécaniques et thermiques des bétons composites produit par l'introduction des MCP par substitution au sable contenu dans un béton ordinaire. Puis, d'évaluer l'impact de l'ajout des MCP sur le confort thermique. Pour atteindre ces objectifs, nous avons adopté une démarche expérimentale basée sur des investigations pluridisciplinaires menées en laboratoire. Le but final étant la détermination de l'apport des MCPs dans l'amélioration des caractéristiques thermique du béton.

III.1 : Essais pratiques

III.1.1 : Méthodologie d'élaboration et essais physico-thermiques

Afin de déterminer la capacité du MCP à améliorer les caractéristiques thermiques des murs en bétons en particulier leur isolation, il est nécessaire de mener en laboratoire certaines expériences de caractérisation à différentes échelles. Il s'agit principalement de la comparaison des caractéristiques mécaniques et thermiques d'un échantillon témoin de béton ordinaire et d'un échantillon composite contenant une part de MCP.

Partant sur la base d'une formulation du béton, d'un taux d'imprégnation Support/MCP et de valeurs de résistances mécaniques en compression et en flexion, nous avons confectionné deux plaques de béton de $30 \times 30 \times 3 \text{ cm}^3$, l'une constitué de béton ordinaire et l'autre intégrant 25 %v de MCP (Sépiolite imprégnée de Graisse végétale 23-26). Par la suite, nous avons soumis ces deux plaques-échantillons à une série de tests par CT mètre de marque **H112N Thermal Conductivity Of Building Materials** modèle **H112N/01683**. Le but premier étant d'apprécier l'impact de l'ajout des MCPs sur la conductivité thermique du béton. Il s'agit donc prouver qu'une quantité de chaleur a bien été absorbée par les MCP composites.

III.1.2 : Description des matériaux et produits utilisés

III.1.2.1 : MCP (graisse végétal : huile de coprah 23-26)

L'huile de Noix de coco se présente sous la forme d'une masse onctueuse de couleur blanche à blanc nacré avec une légère odeur de noix de coco. Pratiquement insoluble dans l'eau, soluble dans le chlorure de méthylène et l'éther de pét l'alcool.⁶³



Figure III.1 .MCP : Huile de coprah 23-26.
Source : Auteur

CARACTERISTIQUE		CARACTERISTIQUE	
Point de fusion (°C)	23-26	Indice de réfraction à 40°C	env. 1.449
Couleur lovibond 20j / 2r	max	Indice d'acide (mg KOH/g)	max. 0.6
Indice d'iode (g I2/100g)	6-11	Indice de peroxyde (meq O2/kg)	max. 5.0
Chaleur latente de changement de phase j/g	85	Teneur en eau (%)	max 0.1

Tableau III.1 .caractéristique des MCP : Huile de coprah 23-26.
Source : Fiche technique de l'huile de coprah sur le site www.interchimie.fr consulté le 14/05/2019.

Acide gras	Teneur en %	Acide gras	Teneur en %
Acide caprylique	4-10	Acide caprique	4-11
Acide Laurique	42-52	Acide Myristique	13-22
Acide Palmitique	7-12	Acide Stéarique	1-4
Acide Oléique	3-12	Acide Linoléique	1-4

Tableau III.2. Composition en acide gras (%): des MCP : Huile de coprah 23-26.
Source : Fiche technique de l'huile de coprah Opcit.

⁶³Fiche technique de l'huile de coprah sur le site https://www.interchimie.fr/wp-content/uploads/HuileCocoBio_FT11c.pdf consulté le 14/05/2019.

III.1.2.2 : Support solide (matière minérale : Sépiolite)

La sépiolite est un minéral du groupe des argiles à structure fibreuse. Le nom de ce minéral dérive d'un terme grec ancien, francisé en sépion et qui désigne l'os de seiche.

Chaque fibre est formée d'une multitude de tunnels (ou canalicules) régulièrement espacés.

Cette configuration particulière en briques creuses allongées, propre à son arrangement cristallin, lui confère une surface spécifique très importante: $394 \text{ m}^2/\text{g}$.

Suivant les carrières dont elle est extraite, on note la présence de fer, d'aluminium voire de nickel et même de manganèse dans la structure cristalline de la sépiolite.⁶⁴

Connu comme étant un absorbant minéral ; la sépiolite est séché pour une absorption rapide et efficace de tous les liquides (huiles, combustibles, produits chimiques, eau, etc.)



Figure III.2. Grains de sépiolites
Source : auteur

III.1.2.3 : Matrice : béton

Le béton est un assemblage de matériaux de nature généralement minérale. Il met en présence des matières inertes, appelées granulats ou agrégats (graviers, sables, etc.), et un liant (ciment, bitume, argile), c'est-à-dire une matière susceptible d'en agglomérer d'autres ainsi que des adjuvants qui modifient les propriétés physiques et chimiques du mélange. Mêlés à de l'eau, on obtient une pâte, à l'homogénéité variable, qui peut, selon le matériau, être moulée en atelier (pierre artificielle), ou coulée sur chantier. Le béton fait alors « prise », c'est-à-dire qu'il se solidifie.⁶⁵



Figure III.3. agrégats
Source : google image



Figure III.3. sable
Source : google image



Figure III.3. sac de ciment(matine)
Source : auteur

ciment Matine est certifié, conforme a la norme algerienne NA442-2013 et europeenne (EN197-1)⁶⁶.

⁶⁴ Site internet <https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9piolite> consulté le 19/05/2019.

⁶⁵ Site internet <https://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton> consulté le 02/06/2019.

⁶⁶ Fiche technique delivré par Lafarge Algerie.

III.1.3 : Description du matériel utilisé

III.1.3.1: Appareils utilisés lors de l'imprégnation du MCP

III.1.3.1.a: Bains thermostatés

Un bain thermostaté est un dispositif pouvant fonctionner selon le principe du bain marie.

On chauffe au moyen d'un serpentin (les *cryothermostats*) refroidissent un liquide, généralement de l'eau, et on immerge un objet dans ce liquide.

Ainsi et pour les opérations d'imprégnation, nous avons utilisé deux bains thermostatés de marque **Lab Tech** et référence **LCB 11D**, afin de faire fondre le MCP et de le maintenir l'état de fusion a température constante désiré.



Figure III.6. Bain thermostaté
Source : auteur

III.1.3.1.b: Balance analytique

La balance analytique et de précision est conçue pour toutes les applications de laboratoire, dans l'industrie ou la recherche nécessitant des pesées de précisions.

Utilisé lors des séances d'imprégnation des supports minéraux par le MCP , la balance de marque **OHAUS PIONNER™** nous a permis de réaliser des pesées de masse relativement basse et ceci avec précision (échantillons de 10g)⁶⁷.



Figure III.7. Balance analytique
Source : auteur

III.1.3.2: Appareil utilisé pour le calcul de la conductivité thermique des bétons brut et composite (le CT mètre)

Nous avons pu déterminer la conductivité thermique(λ) grâce a un CT mètre fonctionnant sur la base du principe des plaques chaudes gardées, il s'agit d'un appareil de marque **P.A Hilton Ltd** disponible en laboratoire LMSE de l'Université Mouloud Mammeri De Tizi Ouzou, il est composé de trois unités raccordés l'une a l'autre :

⁶⁷ Fiche technique tiré du site internet <https://dmx.ohaus.com/WorkArea/showcontent.aspx?id=4294967697> consulté le 01/06/2019

- L'unité de transfert de chaleur H 111.....(1)
- L'unité de conductivité thermique des matériaux de construction H112 N....(2)
- Système informatisé d'acquisition de données optionnel HC112 A.....(3)



Figure III.8 : les trois unités composantes le CT mètre.
Source : auteur

- **Procédure et fonctionnement de l'appareil :**

Echantillon utilisé pour le calcul de la conductivité thermique : en général plus le matériaux est isolant plus il devrait être mince, le spécimen doit être le plus plat possible et comme cela n'est pas toujours évident, pour avoir une épaisseur d'échantillon (ls en m) nous passons par un calcul des épaisseur a plusieurs endroits de l'échantillon puis nous prenons la moyenne des valeurs.

Pour cela, nous utilisons le mécanisme de charge à aiguille, tout d'abord ; sans échantillon entre les plaques ; nous plaçons les tapis de silicone sur la plaque froide, fermons le couvercle puis nous fixons les deux attaches a l'avant de l'appareil. A ce stade nous tournons la roue a vis dans le sens contraire des aiguilles d'une montre pour abaisser l'ensemble de la plaque chaude sur la froide. Au point ou le voyant vert « position d'essai » s'allume nous arrêtons la rotation et prenons note de la lecture du cadran.

Puis dans le sens des aiguilles d'une montre cette fois ci nous allons procéder inversement pour soulever la plaque chaude de manière a avoir a espacement entre les deux plaques supérieure a l'épaisseur de l'échantillon.

Ouvrir le couvercle pour placer en premier lieux l'échantillon témoin sur la plaque froide en utilisant les tapis en silicone, nous refermons ensuite le couvercle en joignant les deux attaches du devant de l'appareil.

Puis nous procédons encore une fois au rapprochement des deux plaque via la roue a vis dans le sens contraire des aiguilles d'une montre, ainsi la plaque chaude touche l'échantillon et au fur et a mesure que la poignée tourne, l'ensemble complet s'abaisse, la poignée doit être tournée jusqu'à ce que le voyant vert de position d'essai s'allume pour indiquer que la

pression correcte a été appliqué, a ce moment nous notons la nouvelle lecture du cadran. Il est à noter néanmoins que pour avoir des données plus précises, une moyenne de plusieurs lectures de chaque cas est recommandée.

Enfin pour avoir l'épaisseur de l'échantillon il faut soustraire la lecture d'origine (sans échantillon) de la nouvelle lecture (avec échantillon), puis multiplier cette valeur par 2.5mm.

Par exemple dans notre cas pour l'échantillon de béton composite voici les valeurs transcrites :

$$\left. \begin{array}{l} \text{Lecture 1 : } 81.70 \\ \text{Lecture 2 : } 95.87 \end{array} \right\} \quad L_s = 95.87 - 81.70 = 14.17 * 2.5 = 35.42 \text{mm}$$

Pour le bon fonctionnement de l'appareil et un meilleur résultat il nous a été recommandé par la notice d'utilisation du CT mètre de :

- Veiller à ce que la température de la plaque chaude n'excède pas les 85°.
- Que la différence de température entre la plaque chaude et froide soit d'au moins 15°c.
- L'épaisseur de l'échantillon maximal est d'environ 75mm cependant l'épaisseur pratique de l'échantillon dépendra de la conductivité thermique de celui-ci, plus l'échantillon sera isolant plus il devra être mince.

III.1.4 : Elaboration du MCP composite par la technique de l'imprégnation

Les opérations d'imprégnation ont été menées en conditions normales sous pression atmosphérique. Deux bains thermostatés à circulation **de marque thermo-circulator réf LCB-11D** ont été utilisés. Ils sont, à chaque expérience, réglés à la température désirée. Des filtres à maillage fin en aluminium ont été confectionnés afin d'être en mesure de réaliser un seul essai sur trois échantillons dans des conditions identiques.

Pour rappel, tous les échantillons testés ont été préalablement nettoyés, mis à l'étuve à 105°C pendant 24h et conservés par la suite en confinement loin de l'humidité. L'huile de coprah (GV 23-26) utilisée a été filtrée et soigneusement conservée.



Figure III.9 : appareils utilisés pour l'élaboration du MCP composite.

Source : DEHMOUS.M Confort thermique dans le bâtiment : étude et réalisation d'un béton imprégné d'un MCP composite matrices minérales – Huile de coprah 23-26, Conférence Matériaux, Strasbourg, novembre 2018.

Ces échantillons pèsent chacun 10g. Après imprégnation, pendant 30 min et à la température de 60 °C, les échantillons résultant sont égouttés puis étalés dans un premier temps sur un papier absorbant pendant 24h, puis, soumis à une température de 50 °C pour éliminer la totalité du MCP n'ayant pas été absorbé. Une dernière pesée est donc effectuée pour chaque échantillon afin de déterminer les taux d'absorption moyens.⁶⁸

Temperature : 60 C°	t (min)
	30 mn
(Taux d'imprégnation volumique %.)	48.20

TableauIII.3. Taux d'imprégnation de la sepiolite par le MCP

Source :DEHMOUS.M. Opcit.



Figure III.10: Grains de sépiolite avant et après Imprégnation par le MCP

Source : auteur

III.1.5. Essais mécaniques

III.1.5.a. Caractéristiques des bétons étudiés

La formulation a été menée selon la méthode de dreux-gorisse et les quantités suivantes (tableau III.4) ont été obtenues pour chaque composant.⁶⁹

Béton : Graviers roulé 3/8 et 8/16, sable roulé 0/3, Ciment : 42.5

	Sable	Gravier 3/8	Gravier 8/16	Eau	Ciment
m (kg/m³ de béton)	623	228	991	200	400

TableauIII.4.Composition du béton ordinaire

Source :DEHMOUS.M Confort thermique dans le bâtiment : étude et réalisation d'un béton imprégné d'un MCP composite matrices minérales – Huile de coprah 23-26, Conférence Matériaux2018, Strasbourg, novembre 2018.

⁶⁸ M. DEHMOUS, Confort thermique dans le bâtiment : étude et réalisation d'un béton imprégné d'un MCP composite matrices minérales – Huile de coprah 23-26, Conférence Matériaux, Strasbourg, novembre 2018.

⁶⁹Idem.

Chapitre III Essais pratiques sur l'incorporation des MCP à un échantillon de béton et étude des résultats

Sur la base de cette composition, deux types d'échantillons ont été élaborés ;

- Des échantillons de $0.1*0.1*0.1 \text{ m}^3$ pour la compression ;
- Des échantillons de $0.07*0.07*0.28 \text{ m}^3$ pour la flexion ;



Figure III.11 : échantillon de béton pour essai de compression
Source : DEHMOUS.M. Opcit



Figure III.12 : échantillon de béton pour essai de flexion
Source : DEHMOUS.M. Opcit

III.1.5.b: Essais mécaniques

- **Béton ordinaire (témoin)**

Pour une classe de béton C20/25 et soumis aux essais mécanique de compression et de flexion, les échantillons de béton ordinaire ont montrés une résistance moyenne de **26.32MPa** et **2.98 MPA** respectivement.

Les tableaux suivants ; montrent la composition massique et le taux de MCP intégré des échantillons étudiés pour la compression et la flexion, nous y avons intégré par substitution de sable ; une quantité de MCP équivalente a 25% du volume total de l'échantillon.

Les tableaux suivant résumant les raciaux des différents composants des échantillons confectionnés.⁷⁰

- Essai de Compression

Éch	C (kg)	G (kg)	S (kg)	E (L)	Ex (kg)	MCP+Matrice à remplacer			
						MCP-C (kg)	(%) / Vt	MCP (kg)	(%) / Vt
Beton témoin	0.4	1.219	0.623	0.200	/	/	/	/	/

⁷⁰ M. DEHMOUS, Opcit.

- Essai de flexion

Éch	C (kg)	G (kg)	S (kg)	E (L)	Ex (kg)	MCP+Matrice à remplacer			
						MCP-C (kg)	(%) / Vt	MCP (kg)	(%) / Vt
Beton temoin	0.55	1.67	0.85	0.27	/	/	/	/	/

• Béton composite

Béton : Graviers roulé 3/8 et 8/16, Ciment : 42.5 + MCP composite par substitution au sable.

- Essai de compression

Éch	C (kg)	G (kg)	S (kg)	E (L)	Ex (kg)	MCP+Matrice à remplacer			
						MCP-C (kg)	(%) / Vt	MCP (kg)	(%) / Vt
Beton composite	0.4	1.219	0.00	0.200	0.6667	0.281	25	0.090	12.85

Résistance à la compression : 10.52 Mpa.⁷¹

- Essai de flexion

Éch	C (kg)	G (kg)	S (kg)	E (L)	Ex (kg)	MCP+Matrice à remplacer			
						MCP-C (kg)	(%) / Vt	MCP (kg)	(%) / Vt
Beton composite	0.55	1.67	0.00	0.27	0.9147	0.385	25	0.125	13.01

Résistance à la flexion : 1.94 Mpa.⁷²

III.1.6 : Caractéristiques thermiques

III.1.6.a : La composition des échantillons étudiés (pour la caractérisation thermique)

Taille des échantillons 0.3*0.3*0.03 m³

Taux de MCP ajouté : 25 % / Vt

⁷¹ M. DEHMOUS, Opcit.

⁷² Idem

Chapitre III Essais pratiques sur l'incorporation des MCP à un échantillon de béton et étude des résultats

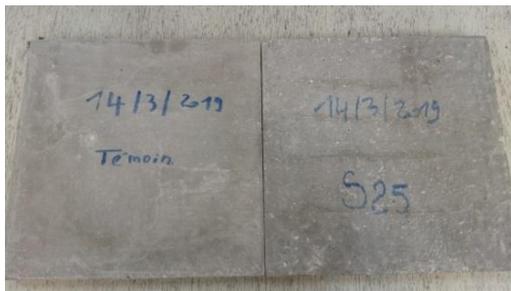


Figure III.13. Échantillon de béton pour essai de conductivité thermique
Source : DEHMOUS.M.Opcit.



Figure III.14. substitution du sable par le MCP composite.
Source : DEHMOUS.M.Opcit.

Éch	C (kg)	G (kg)	S (kg)	E (L)	Ex (kg)	MCP+Matrice à remplacer			
						MCP-C (kg)	(%) / Vt	MCP-P (kg)	(%) / Vt
Béton composite	1.08	3.29	0.00	0.54	1.68	0.76	25	0.24	12.85

L'expérience a été menée trois fois sur un échantillon témoin et un autre avec MCP, les résultats obtenus ont fait l'objet d'une moyenne faisant ressortir la conductivité thermique relative à chacun des bétons étudiés, pour ce faire, nous avons suivi ces étapes :

- Tous d'abord nous mettons en marche les trois unités composant le CT mètre pendant que nos échantillons sont à l'étuve afin de les assécher complètement de toute humidité pouvant fausser les résultats.
- Puis nous procédons au calcul de l'épaisseur de chaque échantillon suivant la procédure décrite en pages 52 et 53 (procédure et fonctionnement du CT mètre).
- Une fois les épaisseurs déterminées nous entamons l'expérience qui nous permettra de déterminer la conductivité thermique λ pour chacun des deux échantillons (béton témoin/béton composite), pour cela nous plaçons l'échantillon en question sur la plaque froide de l'appareil en veillant à bien isoler les côtés avec les caoutchoucs prévus pour éviter toute déperdition latérale de chaleur, puis nous ajustons les tapis en silicone, étape nécessaire car ces derniers ont été utilisés dans l'étalonnage de l'appareil et doivent être utilisés de chaque côté de l'échantillon et enfin nous refermons l'appareil en posant la plaque chaude sur l'échantillon en fixant les deux attaches au devant de l'appareil.
- Puis, après avoir effectué tous les branchements électriques nécessaires au fonctionnement des trois unités (voir **figure III.8**). Nous insérons l'eau de refroidissement

dans l'unité et observons la température T2. en parallèle nous déterminons la température de la plaque chaude T1 nécessaire pour obtenir au moins une différence de température de 15 à 20°C.

- Enfin nous attendons que le flux de chaleur indiqué par l'appareil se stabilise. l'expérience a débuté à 10h 20 et s'est achevée à 12h30 pour l'échantillon témoin, puis de 14h à 16h pour l'échantillon de béton composite.

III.1.6.a : Résultats

L'utilisation du CT mètre nous a permis de faire ressortir les données nécessaire à l'application de l'équation de conductivité thermique fournie spécialement pour l'appareil, a chaque intervalle d'échantillonnage, on note les valeurs de T1 et T2 et de la sortie du débitmètre thermique. La température moyenne **T** et la différence de température entre T1 et T2 sont calculées **dT**.

La conductivité thermique est déterminée par l'équation lambda suivante :

$$\lambda = \frac{I_s[(K_1 + (K_2 * T)) + ((K_3 + (K_4 * T)) * HFM)) + ((K_5 + (K_6 * T)) * HFM^2)]}{dT} \dots\dots (1)$$

Avec :

λ : conductivité thermique

I_s : épaisseur du spécimen en m

dT : différence de température en °C (T1-T2)

T : température moyenne en °C (T1+T2) /2

HFM : sortie du débitmètre (HeatFolowmetre Reading) en mV.

K1, 2, 3, 4, 5,6 : constante prévus lors de l'étalonnage de l'appareil

T1 : température de la plaque chaude.

T2 : température de la plaque froide.

K1 = 88.1389

K4 = 0.8037

K2 = -2.7829

K5 = 0.7954

K3 = -21.3064

K6 = -0.0189

- Premier essai sur les deux échantillons confectionnés :

Echantillon de béton témoin	Echantillon de béton avec MCP composite
$l_s = 0.03085\text{m}$	$l_s = 0.0346\text{ m}$
$T_1 = 49^\circ\text{C}$	$T_1 = 49.2^\circ\text{C}$
$T_2 = 25.2^\circ\text{C}$	$T_2 = 22.4^\circ\text{C}$
$T = 37.1^\circ\text{C}$	$T = 35.8^\circ\text{C}$
$dT = 23.8^\circ\text{C}$	$dT = 26.8^\circ\text{C}$
HFM = 64 mv	HFM = 50 mv
$\lambda_1 = 1.19\text{ w/mk}$	$\lambda_1 = 0.85\text{ w/mk}$

- Second essai sur les deux échantillons confectionnés :

Echantillon de béton témoin	Echantillon de béton avec MCP composite
$l_s = 0.0344\text{ m}$	$l_s = 0.0354\text{ m}$
$T_1 = 49.3^\circ\text{C}$	$T_1 = 49.5^\circ\text{C}$
$T_2 = 25.1^\circ\text{C}$	$T_2 = 22.7^\circ\text{C}$
$T = 37.2^\circ\text{C}$	$T = 36.1^\circ\text{C}$
$dT = 24.2^\circ\text{C}$	$dT = 26.8^\circ\text{C}$
HFM = 65.6 mv	HFM = 50.6 mv
$\lambda_2 = 1.34\text{ w/mk}$	$\lambda_2 = 0.88\text{ w/mk}$

- Troisième essai sur les deux échantillons confectionnés :

Echantillon de béton témoin	Echantillon de béton avec MCP composite
$\lambda_3 = 1.22\text{ w/mk}$	$\lambda_3 = 0.87\text{ w/mk}$

À partir de ces trois essais en laboratoire nous pouvant faire ressortir des valeurs moyenne de conductivité thermique pour chaque échantillon.

Conductivité thermique de l'échantillon de béton témoin : $\lambda = 1.25\text{ w/mk}$

Conductivité thermique de l'échantillon avec MCP composite : $\lambda = 0.86\text{ w/mk}$

III.2 : Discussion

Les résultats auxquels nous sommes parvenus au niveau de chaque étape de l'étude sont globalement cohérents et satisfaisants.

En terme de taux de chargement de la matrice en MCP, il s'est avéré que nous pouvons atteindre un taux d'imprégnation de **48.20%** (masse de MCP absorbé/masse total), ce qui signifie que notre matrice présente une capacité d'absorption appréciable permettant l'intégration d'une quantité considérable de MCP dans le béton, ce taux permet d'allier entre capacité d'absorption et résistance mécanique, car plus le taux d'imprégnation est élevé plus faible seront les propriétés mécaniques. C'est donc une matrice faisant un bon compromis entre les capacités d'absorption et les propriétés mécaniques, de plus les graines de sépiolite présentent une morphologie similaire à celle des grains de sable auxquels nous l'avons substitué.

Concernant les propriétés mécaniques, l'intégration de cet MCP composite dans la formule du béton a naturellement fait baisser la résistance mécanique de celle-ci, passant de **26.32 Mpa** à **10.52 Mpa** en compression et de **2.98 Mpa** à **1.94 Mpa** en flexion, cela signifie que le renforcement par réajustement de la formule du béton ordinaire, par ajout d'adjuvant ou d'armature est nécessaire, cependant l'usage des bétons composite investigués ou objet de l'étude en question n'est nullement à usage structurel ou porteur, il sera intégré dans les enveloppes des bâtiments ou comme parement non porteur.

Enfin, et concernant les caractéristiques thermiques, les valeurs de conductivité thermique calculées montrent que la conductivité du béton composite est largement inférieure à celle du béton témoin **0.87 w/mk** et **1.22 w/mk** respectivement, ceci démontre qu'une part importante de flux de chaleur ne traverse pas entièrement les plaques étudiées de béton avec MCP composite.

Nous pouvons supposer que cette quantité de chaleur a été soit reléguée vers l'extérieur (hypothèse moins probable) ou absorbée par le matériau composite sous forme sensible et latente.

III.3 : Conclusion

Cette étude qui n'est autre qu'une contribution à la caractérisation des propriétés physiques et thermiques des bétons intégrant MCP a pu montrer que : le taux d'imprégnation du MCP par la matrice est bon, que les résistances mécaniques ont été réduites certes, mais cela n'est pas très significative du moment que le béton en question n'est conçu pour être utilisé comme élément porteur mais plutôt en élément faisant partie de l'enveloppe d'un bâtiment, en terme de thermique la conductivité a été réduite ce qui répond positivement à l'objet de cette étude.

Conclusion générale

Les résultats des recherches et expérimentations menées durant ce travail et transcrites dans ce mémoire ; concernant l'apport des MCPs dans l'amélioration du confort thermique sont dans l'ensemble satisfaisants. L'étude bibliographique nous a permis de mettre l'accent sur l'intérêt de l'ajout des MCPs aux éléments constructif du secteur du bâtiment afin de pallier au problèmes de consommation énergétique dont souffre ce dernier, et ainsi répondre favorablement à la question du développement durable et de protection de l'environnement.

Les résultats obtenus suite a l'ajout des MCPs à un spécimen de béton réalisé dans les normes et comparé à un autre spécimen témoin après analyse en laboratoire de leurs différentes propriétés mécaniques et thermiques, nous ont permis d'affirmer le rôle important des MCPs comme amortisseur thermique réduisant les fluctuations du aux différences de température de part et d'autre d'une paroi. Ainsi cette dernière devient plus isolante si des MCPs y sont intégrés.

Il reste néanmoins à confirmer que la conductivité thermique réduite suite à l'intégration des MCPs est due à une absorption de chaleur par ce dernier non au fait qu'elle ait été reléguée vers l'environnement extérieur.

En perspective, il serait intéressant d'approfondir la recherche et de tester d'autre matériaux pour arriver à une affirmation du rôle des MCPs comme régulateur thermique, ce qui serait une aubaine pour le secteur du bâtiment et qui réduirait considérablement la consommation énergétique actuelle dont souffre le monde entier.

Références bibliographiques

ADEME (agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), édition 2008.

Ait Zai Fatma Zohra, mémoire de master II, étude et réalisation d'un système de refroidissement d'un microprocesseur par l'effet conjugué du Peltier et un Matériaux à Changement de Phase, université mouloud Mammeri Tizi Ouzou, 2018.

Akrouche, A. Etude du stockage et déstockage d'énergie dans un matériau à changement de phase. Mémoire de Magister, 2011. Université M'Hamed Bougara, Boumerdes. Ecole des mines de Nantes, France.

Belouadeh. C, Contribution à l'élaboration des matériaux à changement de phase par microencapsulation (Application au textile). Master académique, 2012. Université Kasdi Merbah Ourgla.

Bouyer, J. Modélisation et simulation des microclimats urbains, étude de l'impact de l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments. Thèse de doctorat, 2009. Université de Nantes, France.

Bruant. M, Développement et paramétrage de contrôleurs flous multicritères du confort d'ambiance. Thèse de doctorat : (1997). INSA de Lyon. France

Christophe. J, et al. Vers des bâtiments à énergie positive, Proposition de structuration des actions de recherche. PREB4T, Juin 2009.

Déclaration de Rio sur l'environnement et le développement et Action 21.

Dehmous. M, Confort thermique dans le bâtiment : étude et réalisation d'un béton imprégné d'un MCP composite matrices minérales – Huile de coprah 23-26, Conférence Matériaux 2018, Strasbourg, novembre 2018.

Drissi, S. Etude des performances thermiques des parois en béton modifié avec des matériaux à changement de phase. Rapport des fins d'étude. 2012. Ecole spéciale des travaux Publics (ESTP), France, Université de Cergy Pontoise (UCP), France et l'Ecole Nationale d'Ingénieur de Tunis (ENIT), Tunis.

Fiche technique delivré par Lafarge Algerie.

Hessad. A, Mémoire de master en architecture (apport des matériaux nouveaux dans le confort thermique des bâtiments, session septembre 2017.

Références bibliographiques

Hongois, S. Stockage de chaleur inter-saisonnier par voie thermochimique pour le chauffage solaire de la maison individuelle. Thèse de doctorat, 2011. INSA de Lyon, France.

LEITFADEN. Concepts énergétique, environnementaux et de santé, concept énergétique.

Les Éditions De L'OCDE, 2, Rue André-Pascal, 75775 Paris Cedex 16 Imprimé En France.

Laghzaoui, A, Peerhossaini. D. Stockage de chaleur : Energie solaire et autres applications. **Etude bibliographique,** 2010. Ecole des mines de Douai.

Mémentos techniques du bâtiment, Certu - Juillet 2002

Maha . A, Nouveaux composants actifs pour la gestion énergétique de l'enveloppe légère des bâtiments. Thèse de doctorat, 2004. Université Joseph Fourier, Grenoble, France.

OCDE (1997), Guider la transition vers le développement durable. Un rôle essentiel pour l'OCDE.

Organisation des Nations Unies. Rapport de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement, Volume A, Rio de Janeiro, 3-14 juin 1992.

Pasupathy, A. Phase change material-based building architecture for thermal management in residential and commercial establishments. Renewable and Sustainable Energy Reviews 12, 2008, p.39-64.

Pemaco. Le livre blanc de l'efficacité énergétique. Schneider Electric. Février 2011.

Ponsot . J. C, Bertrand. J F. Le stockage massif de l'énergie. Panorama 2013.

Vandamme. T, et al, Microencapsulation des sciences aux technologies. Lavoisier, 2007.

Zalba, B. Review on thermal energy storage with phase change materials, heat transfer analysis and applications. Applied Thermal Engineering 23, 2003, p.251-283.

1er séminaire international sur le soutien de la simulation à l'innovation technologique, Ghardaïa (Algérie), mars, 07-08-2017.

Sites internet

Site internet de l'Eco conception des matériaux : www.greenmaterials.fr/environnement-social-et-economique-les-3-piliers-du-developpement-durable/

Site internet www.ferdi.fr/sites/www.ferdi.fr/files/publication/fichiers/p130-garenne-difficultes_de_la_mesure_des_objectifs_du_developpement.pdf [archive] [PDF].

Site internet http://www.ferdi.fr/sites/www.ferdi.fr/files/publication/fichiers/p130-garenne-difficultes_de_la_mesure_des_objectifs_du_developpement.pdf [archive] [PDF].

Références bibliographiques

Site internet : <https://www.e-rt2012.fr/explications/conception/explication-architecture-bioclimatique/>

Site internet : <https://conseils-thermiques.org/contenu/confort-thermique.php>

Site internet <https://www.econology.fr/le-blog/dossier-mcp-pourquoi-les-materiaux-a-changement-de-phase-sont-une-revolution-pour-le-batiment>

Fiche technique de l'huile de coprah sur le site https://www.interchimie.fr/wp-content/uploads/HuileCocoBio_FT11c.pdf.

Site internet <https://fr.wikipedia.org/wiki/S%C3%A9piolite>

Site internet <https://fr.wikipedia.org/wiki/B%C3%A9ton>

Site internet <https://dmx.ohaus.com/WorkArea/showcontent.aspx?id=4294967697> Fiche technique.

Site internet www.basf.fr/ecp2/France/fr/