



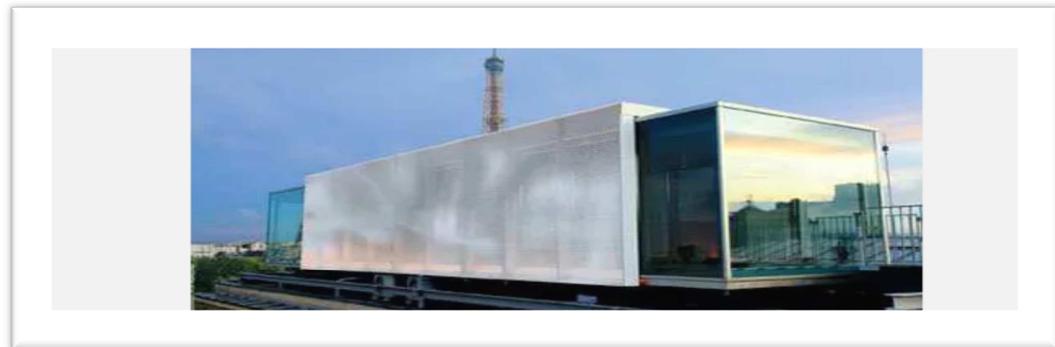
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION
DEPARTEMENT D'ARCHITECTURE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en architecture

Option : Architecture et environnement

Thème : APPORT DES MATERIAUX NOUVEAUX DANS LE CONFORT
THERMIQUE DES BATIMENTS : CAS DES MATERIAUX A
CHANGEMENT DE PHASE (MCP)



Session septembre 2017

Réalisé par:

Mr. HESSAD Ahmed

Encadré par:

Mr. DEHMOUS M'hand

REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à rendre grâce à dieu pour m'avoir donné le courage de mener ce projet à bien.

Mes remerciements vont également à mes parents et frères et sœurs qui n'ont cessé de me soutenir tout au long de cette épreuve.

Une pensée pour mon promoteur Mr DEHMOUS M'hand ainsi que l'ensemble des enseignants du département d'architecture de l'UMMTO.

Tout le personnel de la bibliothèque du département d'architecture à « l'habitat » et à Tamda pour leur compréhension et leur disponibilité.

Enfin, je remercie tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la concrétisation de ce travail.

HESSAD Ahmed.

Résumé

Ce mémoire a pour but d'utiliser des solutions passives pour atteindre de hautes performances énergétiques. L'une des solutions proposées est l'utilisation de Matériaux à Changements de Phase (MCP) sous différentes formes (dans les parois, faux plafond et plancher ...etc.) . Les matériaux à formes stabilisées solide-liquide, sont utilisés pour stocker l'énergie thermique sous forme de chaleur latente. Le but de l'étude est de mettre en évidence l'impact réel des MCP en termes d'inertie thermique, de complément d'isolation thermique et son impact sur le champ de température et sur le confort thermique.

Un travail de recherche a été effectué sur les MCP pour déterminer leurs caractéristiques physico-chimiques et thermo-physiques à fin de présenter les principaux avantages et inconvénients de chaque type de MCP et de bien estimer leurs potentiel sur le bilan énergétique dans le cas ou il seront appliquer dans le secteur du bâtiment.

La présentation de quelques projets réalisés à travers le monde contenant dans leurs enveloppes des MCP sous différentes formes.

Chapitre introductif

Chapitre introductif

1/ Introduction générale

Les préoccupations actuelles concernant le réchauffement climatique global sont maintenant clairement justifiées et admises. Selon une étude menée par les experts du GIEC¹, il est admis que le réchauffement planétaire est lié à l'émission des gaz à effet de serre. Les principales causes du changement climatique, dont les répercussions sur les générations futures peuvent être graves, sont liées à l'activité humaine dans des secteurs d'activités multiples (industrie, transports, bâtiment, etc.). D'après le rapport du Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE), le secteur du bâtiment possède une position particulière, et la mise en place de nouvelles normes pourraient empêcher en une année, le rejet de plus de 30 % d'émission de CO₂ (soit l'équivalent de plus de 45 millions de tonnes d'émissions de gaz à effet de serre (GES)). Les récentes études sur le sujet montrent qu'un changement majeur dans les mentalités doit être opéré pour infléchir la tendance au réchauffement climatique global, qui ne pourra de toute façon totalement s'inverser. Nous sommes donc dans un processus déjà lancé et qu'il faut impérativement freiner, par des actions généralisées et une démarche forte de développement durable.

La logique du productivisme qui a dominé le 20ème siècle, se retrouve aussi dans les domaines de la construction, de l'urbanisme et de l'architecture où on assiste à l'instauration et la mise en œuvre de nouvelles techniques constructives qui rationalisent la construction mais ne prennent malheureusement pas en considération les aspects qualitatifs de durabilité, d'adaptation du bâtiment à son milieu, et considère l'occupant comme un consommateur passif.

L'Algérie connaît une crise aiguë en matière d'habitat et de bâtiment publics dont le confort thermique ne semble pas être le souci majeur des concepteurs. En quatre décennies d'indépendance, le paysage urbain et architectural des agglomérations algériennes a connu un changement sans précédent. Ce phénomène est caractérisé par une forte demande où la quantité a pris le dessus sur la qualité. Ce type de bâtiment provoque le problème d'intégration climatique qui implique une consommation considérable d'énergie pour garantir le confort thermique des usagers. C'est un processus qui doit impérativement être

¹ Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat

Chapitre introductif

Contrecarré par des opérations ciblées dans une démarche globale de développement durable. La conception bioclimatique et durable des bâtiments et leur enveloppes demeure la solution première aux problèmes d'inconfort thermique et de surconsommation énergétique. Les enveloppes ne doivent pas constituer l'origine et la cause du recours systématique aux appareils de chauffage et de rafraîchissement, souvent coûteux et énergivores.

Parmi les solutions novatrices offrant à l'enveloppe une très grande qualité thermique et qui garantirait par conséquent la rationalisation de la consommation énergétique ; (citer quelques matériaux nouveaux comme les VIP...etc. Les matériaux à changement de phase. Ils permettent non seulement de réduire les besoins énergétiques en maintenant à un niveau stable les variations de températures, mais aussi une diminution conséquente du poids et de l'épaisseur des parois car l'inertie thermique est bien souvent présente dans les matériaux denses et lourds. Ainsi, la réduction de la consommation énergétique au niveau du secteur résidentiel et tertiaire, mène directement la diminution des émissions de CO₂ à une plus grande échelle. Généralement, ces matériaux sont présents sous forme de microbilles de cire de paraffine qui sont encapsulées dans des polymères pouvant être intégrés dans tous les matériaux de construction. La plus grande efficacité des MCP est essentiellement mise en avant lorsqu'ils sont employés dans les structures légères afin d'améliorer l'inertie thermique des bâtiments.²

2/ Problématique

La crise de l'énergie a brutalement mis 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 l'architecte 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. A cet effet, l'architecture dite bioclimatique insiste sur l'optimisation de la relation du bâtiment avec le climat en vue de créer des ambiances « confortables » par des moyens spécifiquement

² Idem.

Chapitre introductif

architecturaux. Le but de cette architecture est d'exploiter les effets bénéfiques du climat tout en offrant une protection contre les effets négatifs, une conception consciente de l'énergie qui place l'occupant et son confort au centre de ses préoccupations. 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 et les 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 le questionnement suivant :

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 parvenir à concevoir 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, avec un apport d'innovation par un choix judicieux et intelligent des matériaux nouveau tel que les matériaux à changement de phase ?

Comment intégrer ces matériaux a changement de phase dans l'enveloppe du bâtiment tout en préservant l'esthétique ; la solidité ; le confort thermique de ce dernier ?

3/ Hypothèses

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

- L'usage et l'intégration de cette catégorie de matériaux (MCP) dans les enveloppes des bâtiments leur attribuerait 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 points de vues financiers et quantitatifs et un apport considérable sur les aspects qualitatifs et d'esthétique architecturales, de durabilité et du respect du l'environnement ;

Chapitre introductif

4/ Les objectifs

Les objectifs principaux tracés dans ce travail de recherche sont :

- Contribuer aux études qui se consacrent 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 avec l'introduction dans l'enveloppe des constructions des matériaux à changement de phase qui font partie de la famille des matériaux haute performance énergétique ;
- Porter un regard sur l'état des connaissances de ce type de matériaux dans le but crucial de parvenir à constituer une base de données pour une meilleure prise en charge de l'action d'intégrer ces matériaux dans le corps du bâtiment et d'arriver à vulgariser son utilisation.

4/ Structure du mémoire

Notre mémoire peut se scinder en deux parties complémentaires, la 1^{er} est la partie théorique sur l'option et comprend l'approche introductive et le 1^{er} chapitre dont on a défini les notions du développement durable et l'architecture bioclimatique et pour contribuer à ses notions on a développé une deuxième partie où on a justifié notre choix du thème par le chapitre II et III qui abordent le côté théorique et pratique de notre thème sur l'utilisation des matériaux à changement de phase dans le secteur du bâtiment et l'apport de ces derniers sur l'architecture bioclimatique .

CHAPITRE I.

***ETAT DES CONNAISSANCES DES NOTIONS
DE DEVELOPPEMENT DURABLE ET
D'ARCHITECTURE BIOCLIMATIQUE***

Chapitre I : *Etat des connaissances des notions de développement durable et d'architecture bioclimatique*

Introduction :

L'architecture actuelle se profile dans un contexte nouveau soucieux de préserver l'environnement et le bien être des habitants; il s'agit là d'un changement profond de l'acte de construire, car il faut répondre à ce besoin de plus en plus pressant de « la réconciliation entre le bâtiment et son environnement ». Il s'agit de réintégrer l'environnement naturel, bâti et social.

A l'heure des conférences et des accords internationaux autour des questions préoccupantes des changements climatiques, le concept de Développement Durable doit notamment s'imposer dans le secteur du bâtiment.

I. 1. Le développement durable

Est un développement social, économique, et politique qui répond aux besoins présents, sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire leur propre besoin.

Cette notion fait apparaître, une double solidarité ; solidarité entre tous les peuples de la planète et solidarité entre les générations. Chaque acteur de chaque secteur de la vie économique se trouve donc confronté à la responsabilité qui lui incombe dans la gestion globale des ressources et l'environnement.

Pour le bâtiment, le concepteur devra continuer à assurer l'abri et le confort de l'utilisateur, mais devra de plus, faire en sorte que l'impact du bâtiment sur l'environnement soit minimisé.

L'essor de l'architecture « solaire » puis « bioclimatique » permettrait à la fois la théorisation et la concrétisation de cette réflexion dans la production normale du cadre bâti.

« Un développement qui répond aux besoins des générations du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs »

Peut donc être défini comme une approche stratégique et politique fondée sur la notion de solidarité dans un espace, ayant comme objectif un triple dividende: efficacité économique, équité sociale et qualité environnementale.

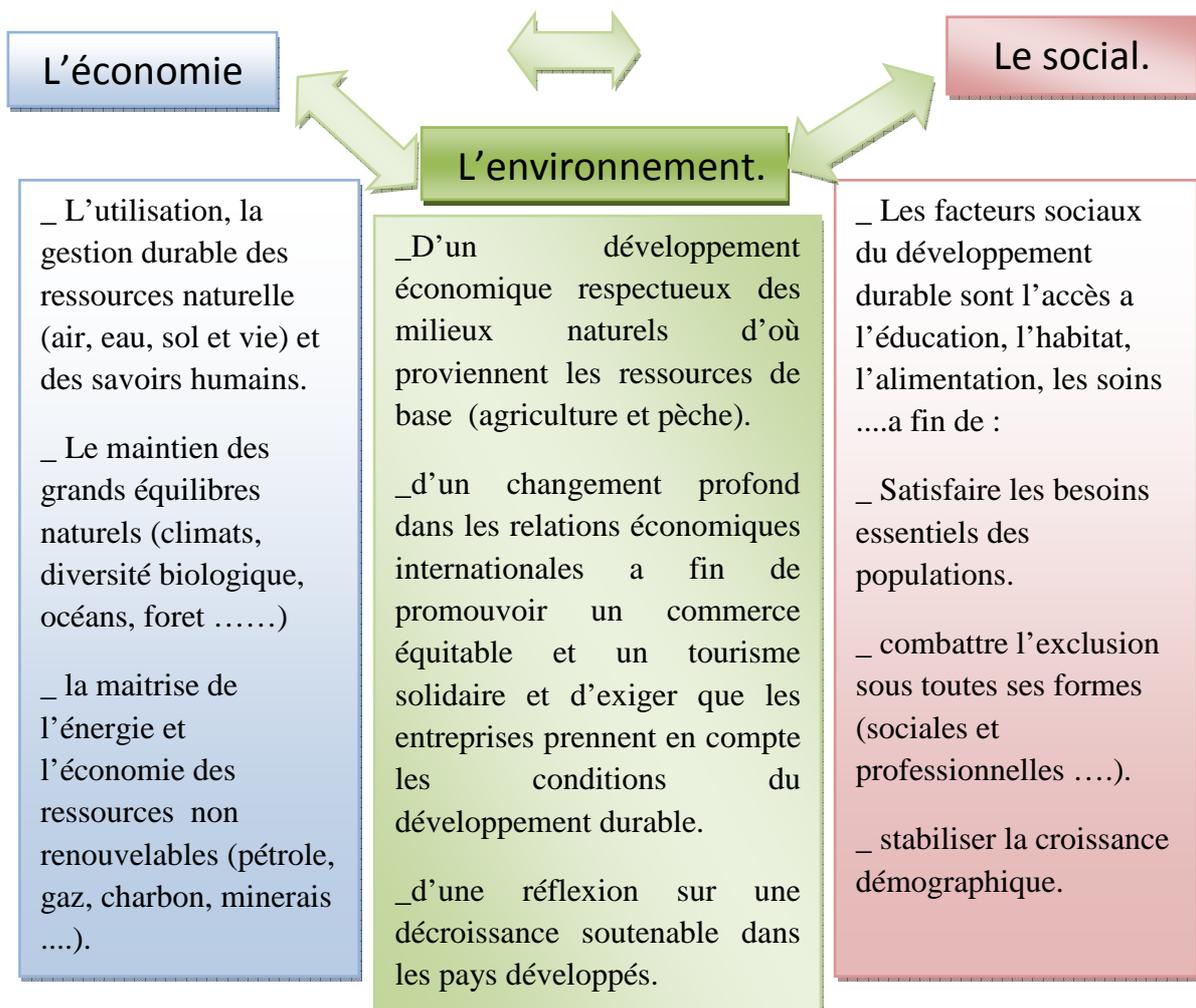
Le développement durable se veut un processus de développement qui concilie l'écologique, l'économique et le social et établit un cercle vertueux entre ces trois pôles.

Chapitre I : Etat des connaissances des notions de développement durable et d'architecture bioclimatique



Figure 1 : Schéma du développement durable

I .1. 1. Les trois piliers du développement durable



Chapitre I : *Etat des connaissances des notions de développement durable et d'architecture bioclimatique*

I. 1.2. Naissance du concept

En 1980 L'Union internationale pour la conservation de la nature (UICN) propose le concept du « développement durable »

Mais sa définition n'est véritablement formulée qu'en 1987 par rapport de la Commission des Nation Unies sur l'Environnement et le développement, que présidait le premier ministre de Norvège. Mme Gro Harlem Brundtland : ce rapport, intitulé « Notre avenir à tous », propose de définir le concept du sustainable développement comme un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la possibilité, pour les générations à venir, de pouvoir répondre à leurs propre besoins.

I. 1.2.A. Les grandes dates du développement durable

1951.

L'union internationale pour la conservation de la nature (UICN) publie le premier rapport sur l'état de l'environnement dans le monde

1980.

Le concept de développement durable apparait pour la première fois dans le rapport de l'UICN.

1987.

Le rapport Brundtland "notre avenir à tous" sur l'environnement et le développement, définit la notion de développement durable.

1992.

Lors du sommet des nations unies sur l'environnement et le développement à Rio de Janeiro, 182 Etats adoptent des conventions sur le changement climatique et sur la biodiversité, C'est à cette occasion qu'est mis en place l'agenda 21.

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.

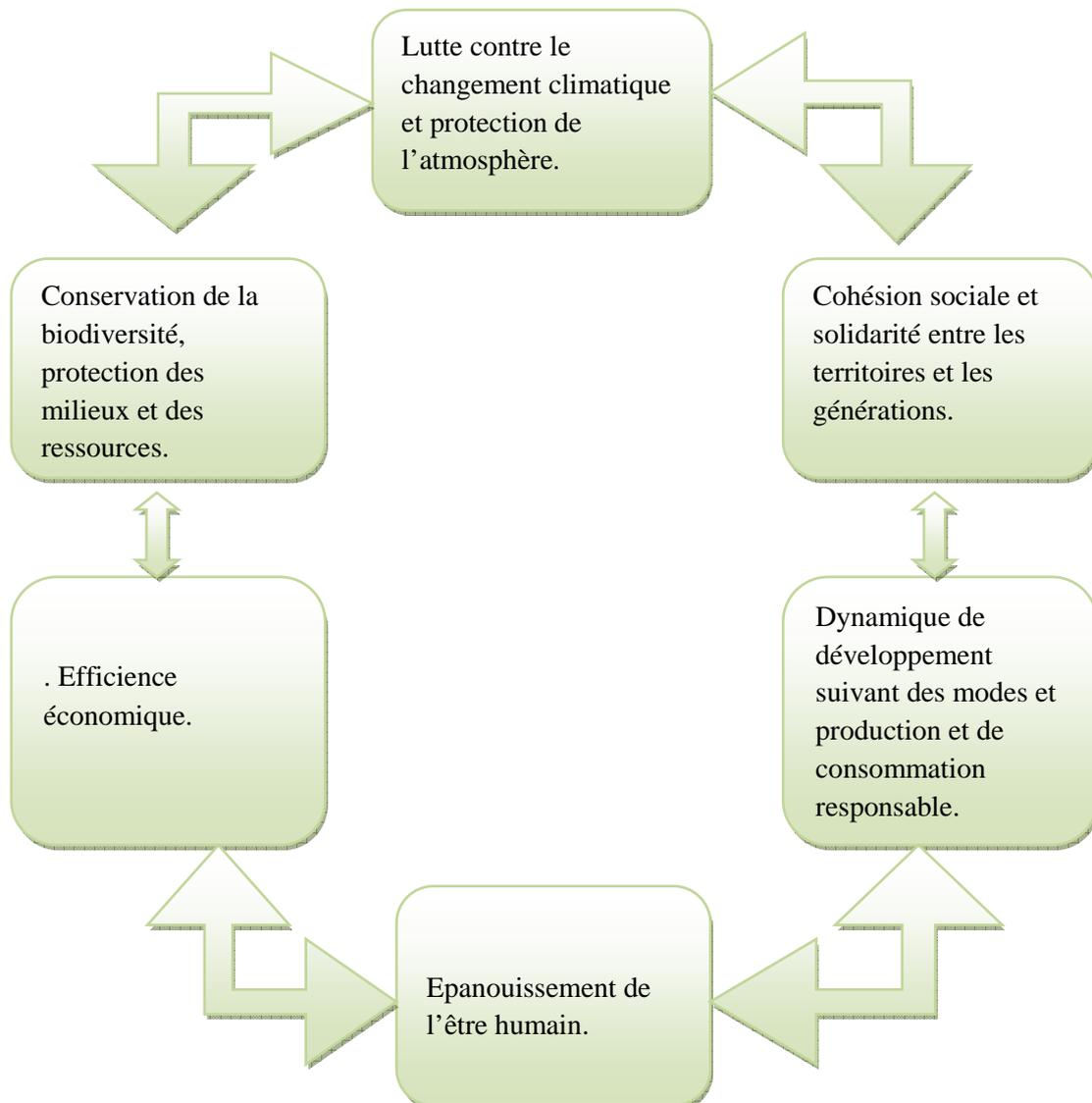
Le protocole de Kyoto visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre entre en vigueur, grâce à la signature de la Russie

Chapitre I : *Etat des connaissances des notions de développement durable et d'architecture bioclimatique*

I. 1.3. Les objectifs

Les principaux objectifs du développement durable sont :

- Lutte contre le changement climatique et protection de l'atmosphère.
- Conservation de la biodiversité, protection des milieux et des ressources.
- Cohésion sociale et solidarité entre les territoires et les générations.
- Epanouissement de l'être humain.
- Dynamique de développement suivant des modes et production et de consommation responsable.
- Efficience économique.



Chapitre I : Etat des connaissances des notions de développement durable et d'architecture bioclimatique

I. 2. L'architecture bioclimatique et efficacité énergétique

I. 2.1. Introduction sur l'architecture bioclimatique

Le but recherché à travers une conception bioclimatique en architecture est d'assurer le confort en manière passive, c'est-à-dire recourir qu'aux potentialités naturelles du site.

C'est un peu la même chose qu'affirme Dominique Gauzin-Muller 1 « l'application des principes bioclimatiques permet de réduire les besoins énergétiques d'un bâtiment et d'assurer le confort de manière passive, grâce à un choix judicieux de l'implantation, de l'orientation, de la forme du bâti et de ses prolongement vers l'extérieur, des matériaux et de la végétations plantées à proximité » il nous semble évident que c'est à la construction de s'adapter à son contexte, étant donné que l'inverse relève du domaine de l'in vraisemblable.

Ce faisant, elle peut profiter au mieux des éléments naturels telle que le soleil, le vent, les matériaux et la végétation, par orientation favorable aux apports solaires passifs, une compacité de la forme, un choix raisonné des matériaux de construction et un choix judicieux des végétaux (à feuillage caduc ou persistant, c'est selon).

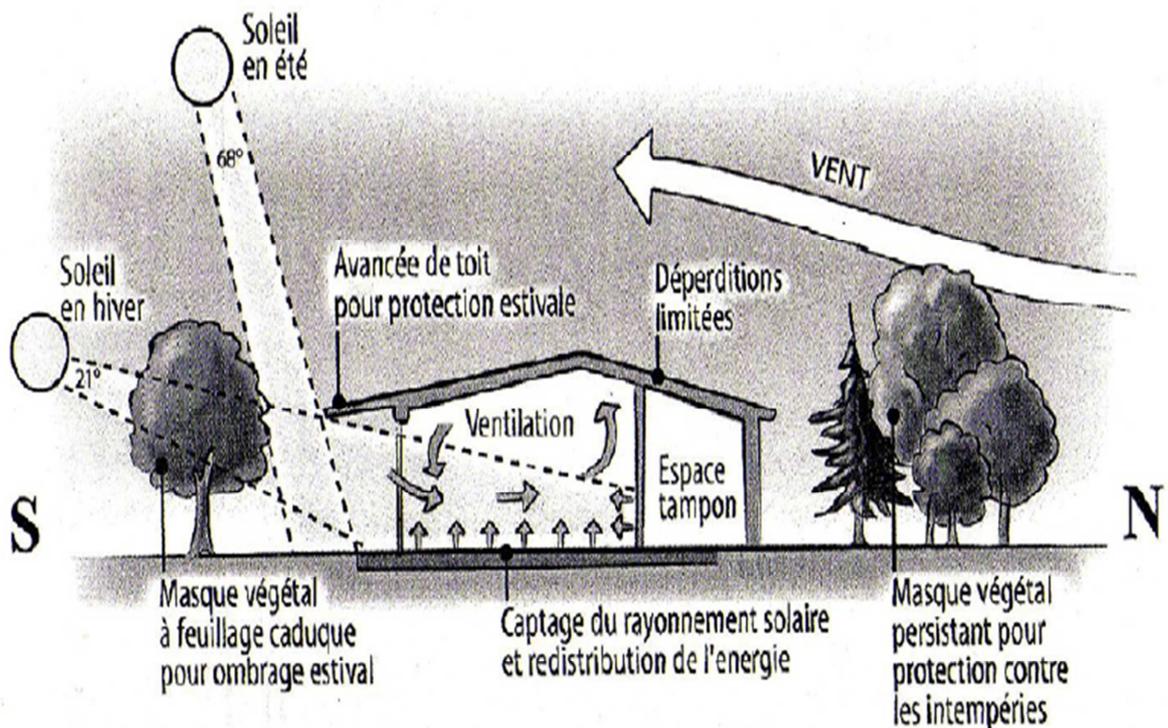


Figure 2: principes de conception bioclimatique.

Chapitre I : *Etat des connaissances des notions de développement durable et d'architecture bioclimatique*

I. 2.1.A Les bases de l'architecture bioclimatique

Le premier objectif de l'architecture bioclimatique consiste à rechercher une adéquation entre :

- La conception et la construction de l'enveloppe habitée ;
 - Le climat et l'environnement dans lequel le bâtiment s'implante ;
 - Les modes et rythmes de vie des habitants.
- Sous nos climats tempérés, cette recherche d'équilibre entre l'habitat et son milieu s'exprime principalement sous formes de deux grands principes saisonniers :

- En période froide, favoriser les apports de chaleur gratuits et diminuer les pertes thermiques, tout en permettant le renouvellement d'air suffisant ;
- En période chaude, diminuer les apports caloriques et favoriser le rafraîchissement.

Le second objectif de l'architecture bioclimatique est de trouver une adéquation entre :

- le bâtiment ;
 - les systèmes de captages et de protections,
 - l'installation de chauffage et de régulation ;
 - le mode d'occupation et le comportement des habitants.
- Ainsi le chauffage et le rafraîchissement écologiques devront permettre de réduire au maximum les besoins de chauffer ou de climatiser.

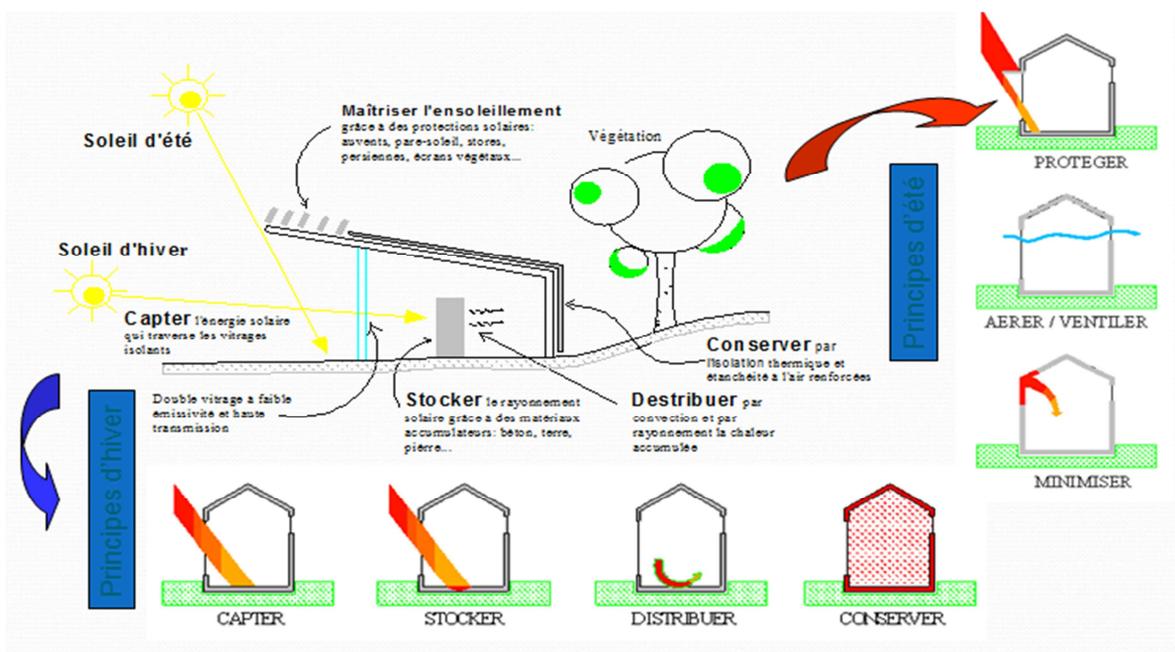


Figure 03 : conception bioclimatique source : note de cour UMMTO.

I. 2.2. Introduction sur l'efficacité énergétique

L'efficacité énergétique est un état de fonctionnement d'un système pour lequel la consommation d'énergie est minimisée pour un service rendu maximal (Wikipédia). 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. Ce protocole prévoit pour ces pays participants la possibilité de recourir à des mécanismes dits « de flexibilité » en complément des politiques et mesures qu'ils devront mettre en œuvre au plan national :

- Echanges internationaux de permis d'émission : principal mécanisme, il vise à encourager le plus rapidement possible l'amélioration des systèmes de production les plus polluants et les moins efficaces.

- Mécanisme de Développement Propre (MDP) : crée afin de permettre aux pays occidentaux de réaliser leurs objectifs en investissant dans des projets dans les pays en développement.

Le mécanisme génère des crédits d'émission sur la base de projets d'investissement dans un pays en développement. Ces droits peuvent être stockés ou échangés et doivent faire l'objet d'un partage entre l'investisseur étranger et le pays hôte. Selon le texte du protocole de Kyoto, ce mécanisme donnera lieu au prélèvement d'une taxe, dont l'assiette reste à définir et qui devrait contribuer au financement des coûts d'adaptation des pays en développement au réchauffement climatique.

Chapitre I : *Etat des connaissances des notions de développement durable et d'architecture bioclimatique*

- La mise en œuvre conjointe (MOC) : un mécanisme de financement de projets industriels ou forestiers, ayant pour objectif premier le stockage de carbone ou la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ces projets permettent de générer des crédits d'émission de gaz utilisables par les investisseurs.

En vue de préparer les suites du protocole Kyoto, la dernière conférence « COP 18 » s'est tenue à Doha, du 26 Novembre au 08 Décembre 2012. Celle-ci s'est terminée mieux que les conférences précédentes. Les 190 pays participants se sont mis d'accord sur les aspects suivant :

- Une deuxième période d'engagement du protocole de Kyoto baptisée Kyoto II commencera en janvier 2013. La portée de cette seconde période s'achèvera fin 2020

- Le fond vert destiné à aider les pays en développement, afin de leur permettre de s'adapter aux changements climatiques.

- Le système Redd +, un mécanisme luttant contre la déforestation permettant aux pays forestiers de générer des crédits d'émission.

- L'engagement des pays en développements de comptabiliser et publier leurs émissions, ainsi la mise en œuvre des actions nationales « et appropriées » pour diminuer, d'ici 2020.

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

I. 2.2.A 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. 2

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 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

Chapitre I : *Etat des connaissances des notions de développement durable et d'architecture bioclimatique*

Suffisamment fortes pour répondre aux engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Ces possibilités de progrès sont actuellement mieux identifiées qu'au cours des années passées, les bâtiments peuvent utiliser plusieurs sources d'énergie, dont les énergies renouvelables.

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).

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.³

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.

- Un certain nombre de termes 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,

Chapitre I : *Etat des connaissances des notions de développement durable et d'architecture bioclimatique*

on compare souvent l'énergie finale reçue par la maison à l'énergie primaire produite, ce qui n'est pas très correct.

I. 4. Le confort

L'examen de la notion de confort thermique a pour objectif de situer le confort dans les espaces intérieurs pour les climats semi-aride (chaud et sec en été et froid en hiver). Toutefois il faut souligner que le confort est tout ce qui contribue au bien être des individus par la commodité de la vie matérielle, intellectuelle et sociale.

Le confort est l'ambiance qui évite au corps de réagir aux conditions extérieures et d'économiser de l'énergie de son métabolisme.

La base de la sensation de confort est simplement le manque de sensation de malaise, le confort physiologique s'établit par un équilibre thermique nécessitant une quantité minimum de régulation thermique ceci est dû à la faculté du corps humain de maintenir sa température constante en dépit des conditions d'ambiance.

I. 4.1. Le confort thermique

L'intérêt porté à la notion de confort thermique date depuis le 19ème siècle avec la naissance du mouvement de la réforme des conditions de travail dans l'industrie et dans l'habitat. Les premières réglementations ont été établies aux endroits les plus touchés par les accidents et les maladies dues aux excès de chaleurs, d'humidité et d'obscurité, c'est à dire dû aux éléments de l'environnement.

Le confort thermique peut être défini comme l'absence de « gêne thermique » en psychologie, on dit qu'il y a confort thermique lorsque pour une activité sédentaire et un habillement donné, les systèmes thermorégulateurs n'ont pas à intervenir selon des taux dépassant des valeurs de seuils (sudation, métabolisme)

Le confort thermique peut être défini comme étant « l'état d'esprit qui exprime la satisfaction vis-à-vis de l'environnement thermique » (A.S.H.R.A.E)

Le confort thermique est le bilan équilibré entre les échanges thermiques du corps humain et de l'ambiance environnante [B. GIVONI 1978, M. EVANS 1980, S. SZOCOLAY 1980]. 4

Chapitre I : *Etat des connaissances des notions de développement durable et d'architecture bioclimatique*

Le confort thermique est d'abord un phénomène physique soumis à un faible part de subjectivité, il peut être défini comme une sensation complexe produite par un système de facteurs physiques, physiologiques et psychologiques, conduisant l'individu à exprimer le bien être de son état.⁵

I. 4.2. Echange de chaleur entre corps humain et ambiance Environnementale

Les différents échanges thermiques sont les transferts de chaleur sensible (échange radiatif et convectifs) ainsi que les pertes par respiration, diffusion et par sudation (figure 4) Les échanges entre la surface du corps et des vêtements et l'ambiance se font suivant quatre modes principaux :

1. **Echanges 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.

2. **Echanges 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.

3. **Echanges 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.

4. **Evaporation de la sueur ou transpiration**

Chapitre I : Etat des connaissances des notions de développement durable et d'architecture bioclimatique

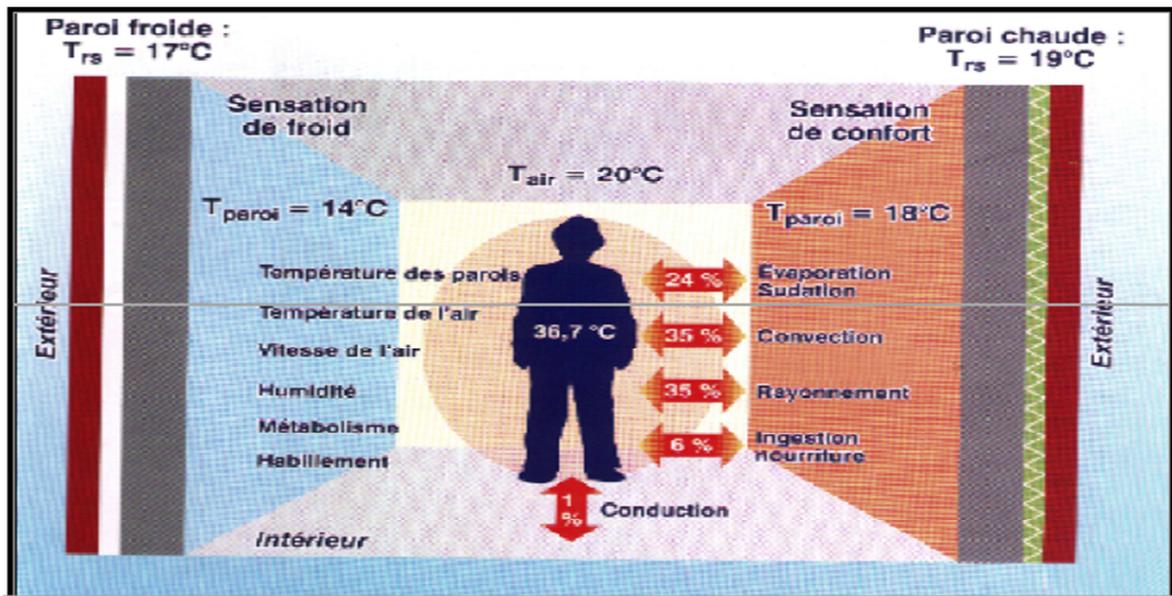


Figure 4 : Echanges thermique entre l'homme et son environnement.

Source: Alain Liébard et André De Herde

- **Gains :**

A- Chaleur créée par l'activité métabolique, énergie rayonnante reçue (énergie solaire directe et réfléchié),

B- d'autre source de chaleur,

C- convection et conduction de la chaleur vers le corps (par l'intermédiaire de l'air ou par contact),

D- condensation de l'humidité atmosphérique (occasionnelle.)

- **Pertes :**

B- énergie rayonnante émise (vers l'ambiance des objets),

C- convection et conduction de la chaleur (à partir du corps humain et par contact),

E- 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 :

$$M - E_{vp} +/- C_v +/- C_d +/- Rad = 0$$

I. 4.3. Les facteurs influençant le confort thermique

Il existe plusieurs facteurs variables qui interviennent dans la notion de confort. Il y a qui sont relatifs à l'individu et ceux qui sont relatifs à l'ambiance climatique environnementale :

I. 4.3. A. Les facteurs climatiques environnementaux

A1- La température de l'air est le facteur le plus influent sur le confort humain d'après « recommandation architecturale »[1993].⁶ une température de l'air allant de 22°C à 27°C est acceptable.

La température de l'air contrôle directement les échanges par convection qui est l'un des termes principaux du bilan thermique.

La température de l'air dans un local n'est pas uniforme, des différences de températures d'air se présentent également en plan à proximité des surfaces froides et des corps de chauffe.⁷

A2-L'humidité de l'air n'a pas un grand effet sur la sensation de confort thermique, si les températures d'air sont confortables ; Sauf si elle est extrêmement haute ou extrêmement basse. Il est admis des variations de l'humidité relative entre 19 à 65 % « recommandation architecturale » [1993].⁸

L'humidité de l'air peut être exprimée comme sa pression de vapeur d'eau, l'humidité de l'air à l'intérieur des bâtiments influence le corps humain de façon directe et indirecte, pouvant provoquer l'inconfort, la sensation de chaleur et de sécheresse des muqueuses des voies respiratoires.

A3- Le mouvement de l'air et la vitesse de l'air possèdent un effet considérable sur la sensation de confort ; Plus le mouvement de l'air est important plus le refroidissement du corps ou l'échange de chaleur par convection avec l'air ambiant est accéléré.

- si la température de l'air est inférieure à celle de la peau, les pertes par convections augmentent
- si la température de l'air est très élevée l'air chauffe la peau.
- aussi si l'air est moyennement humide l'air accélère l'évaporation.

Chapitre I : *Etat des connaissances des notions de développement durable et d'architecture bioclimatique*

A4- Le rayonnement influence le confort thermique, dépend de la position du corps par rapport au soleil, la tenue vestimentaire et l'albédo des objets environnante et la vitesse du vent.

GIVONI, 1978 a estimé à partir des expériences que la quantité de rayonnement direct tombant sur un homme à demi nu dans une position debout est d'environ 70% de celle tombant sur un sujet assis le dos tourné au soleil.

I. 4.3.B. Les variables dépendant du sujet

B.1 Les activités de l'individu

B.2 Le vêtement

I. 4.3.C. Les facteurs subjectifs

L'individu peut contrôler les échanges thermiques qui se produisent par le choix de la tenue vestimentaire et il y a d'autres facteurs non qualifiables qui varie d'un individu à un autre [acclimatation, l'âge, le sexe les conditions de santé, l'activité....] (B.GIVONI- 1978, S.SZOKOLAY- 1980).

CONCLUSION

A travers ce chapitre nous avons déduit que les objectifs du développement durable tel que l'économie d'énergie et de réduction des gaz à effet de serre peuvent être atteint grâce à l'utilisation de l'architecture Bioclimatique, plus que jamais d'actualité.

Cette architecture recherche une synthèse harmonieuse entre la destination du bâtiment, le confort de l'occupant et le respect de l'environnement, en faisant largement appel aux principes de l'architecture.

Elle permet de réduire les besoins énergétiques et de créer un climat de bien être dans les locaux avec des températures agréables, une humidité contrôlée et un éclairage naturel abondant.

CHAPITRE II.

***AMELIORATION LA QUALITE THERMIQUE
DES BATIMENTS PAR L'INERTIE
THERMIQUE ; CAS DES MATERIAUX A
CHANGEMENT DE PHASE***

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

Introduction

Le traitement et la maîtrise de la problématique du confort thermique dans les lieux de vie et de travail nécessitent indéniablement un minimum de pré requis. Par conséquent, dans ce présent chapitre, les notions importantes qui caractérisent le confort thermique seront abordées en premier lieu, puis, nous nous intéresserons aux matériaux à changement de phase pour démontrer l'importance d'appliquer ces derniers dans l'enveloppe des bâtiments.

II. 1. Généralités sur le comportement thermo physique des matériaux de construction

Selon les conditions climatiques extérieures, les parois (opaques ou transparentes) influent sur la modification des conditions intérieures, cependant le choix du matériau dépend des trois principales propriétés thermiques à savoir ; l'absorption, la conduction de la chaleur par le matériau et la capacité thermique du matériau.

Ces derniers déterminent le bilan des échanges de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur.

II. 1. 1. Quelques propriétés thermo physique des Matériaux de Construction

II. 1. 1. 1. Absorption

L'absorption est un quotient de l'énergie absorbée par une surface sur l'énergie totale incidente (ce quotient est toujours inférieur à un (1))

$$\text{Energie absorbée par une surface} / \text{Energie totale incidente} < 1$$

La couleur d'une surface donne une bonne indication de son facteur d'absorption par rapport aux rayonnements solaires. A cet effet les peintures noires et blanches possèdent des facteurs d'absorption différents. A ce titre une surface noire s'échauffe beaucoup plus qu'une surface blanche, pendant une exposition au soleil.

Le coefficient d'absorption pour différents matériaux et différentes couleurs est donné par le (tableau 1) et qui montre que les couleurs claires offrent une meilleure protection des parois au soleil.

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

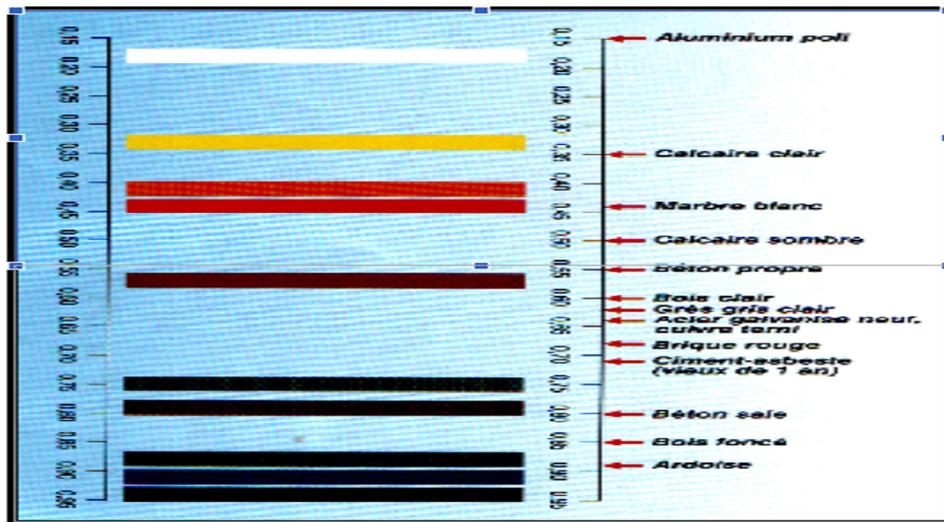


Tableau 1 : Coefficient d'absorption pour différents matériaux et différentes couleurs.

Source : Alain Liebard & Andre De Herde, 2003.

II. 1. 1. 2. La conductivité thermique (λ)

Le coefficient de conductivité thermique (λ) qui s'exprime en $W/m \cdot ^\circ C$ correspond au flux de chaleur (en watts) traversant un matériau d'un (1) mètre d'épaisseur pour une différence de température d'un (1) degré entre les deux faces. Le coefficient λ d'un matériau caractérise sa capacité à transmettre la chaleur par conduction, plus elle est faible, plus le matériau sera isolant.

II. 1. 1. 3. La résistance thermique

La résistance thermique (R) exprime la capacité d'un matériau à empêcher le passage de la chaleur à travers son épaisseur. Une paroi est d'autant plus isolante que sa résistance thermique est élevée. La résistance thermique d'un matériau dépend de son épaisseur et aussi de sa conductivité thermique. Elle s'exprime selon la formule :

$$R = e / \lambda \quad (\text{En } m^2.K/W) \quad \text{avec } R : \text{Résistance thermique } (m^2.K/W)$$

$$e : \text{épaisseur de l'isolant } (m)$$

$$\lambda : \text{Conductivité thermique } (W/m \cdot ^\circ C)$$

II. 1. 1. 4. Le coefficient de transmission surfacique (K)

Le coefficient de transmission thermique d'une paroi est la quantité de chaleur traversant cette paroi en régime permanent, par unité de temps, par unité de surface et par

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

unité de différence de température entre les ambiances situées de part et d'autre de la paroi. Il est l'inverse de la résistance thermique totale (R_t) de la paroi. Il est exprimé par la formule suivante :

$$K=1/R \quad \text{d'où} \quad K= \lambda / e \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} K : \text{Coef de trans surfacique (W/m}^2 \cdot \text{°C)} \\ R : \text{Résistance thermique (m}^2 \cdot \text{K/W)} \\ e : \text{épaisseur de l'isolant (m)} \\ \lambda : \text{Conductivité thermique (W/m} \cdot \text{°C)} \end{array}$$

II. 1. 1. 5. Inertie thermique

L'inertie thermique d'un bâtiment ou d'une pièce de ce bâtiment est sa capacité à amortir les variations de température intérieure. Un bâtiment à forte inertie thermique aura une température intérieure naturellement stable, malgré de fortes variations des gains de chaleur qui pourraient résulter de gains solaires par les vitrages ou d'une occupation importante. Cette inertie dépend de plusieurs caractéristiques :

- Les possibilités d'échange thermique des matériaux avec l'ambiance intérieure ;
- Leur capacité de stockage de la chaleur ;
- L'isolation thermique du bâtiment.

L'inertie thermique est donc recommandée lorsqu'on désire stabiliser le climat intérieur en utilisant la climatisation et les gains solaires passifs. Dans ce cas, l'isolation thermique doit être appliquée à l'extérieur de la masse de stockage, elle-même constituée de matériaux lourds, apparents, et répartis autant que possible sur toutes les parois. Si dans le cas contraire on désire que la pièce se chauffe ou se refroidisse rapidement, il faut une inertie thermique faible. Pour cela, prévoir des parois en matériaux légers, avec une isolation thermique appliquée de l'intérieur.

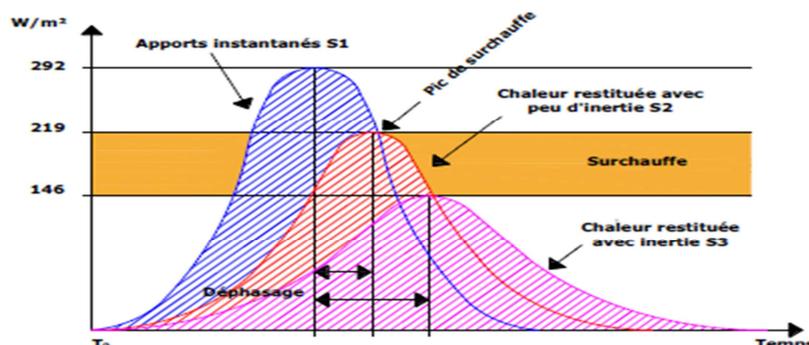


Figure 01: Réaction d'un local à forte inertie et d'un local à Faible inertie à des apports solaires. Source : Liébard A., De Herde A., 2005.

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

II. 1. 1. 6. La diffusivité thermique

Elle caractérise la vitesse à laquelle se diffuse, par conduction, un flux de chaleur dans un matériau. Par conséquent, plus la diffusivité thermique d'un matériau est faible, plus la chaleur met de temps à le traverser. Elle dépend de la capacité du matériau à conduire la chaleur (sa conductivité thermique) et de sa capacité à stocker la chaleur (capacité thermique). Elle s'exprime selon l'équation suivante :

$$D = \lambda / \rho C \quad (\text{en m}^2/\text{s}) \quad \text{avec :} \quad \begin{array}{l} \lambda : \text{conductivité thermique en W/m} \cdot \text{°C} \\ \rho : \text{masse volumique en kg/m}^3 \\ C : \text{chaleur spécifique en kJ/kg} \cdot \text{°C} \end{array}$$

II. 1. 1. 7. L'effusivité thermique

L'effusivité thermique renseigne sur la capacité d'un matériau à absorber ou restituer plus ou moins rapidement un apport de chaleur. Plus cette effusivité est élevée, plus le matériau absorbe rapidement beaucoup d'énergie sans se réchauffer notablement en surface (métal, pierre, faïence...). A l'inverse, plus l'effusivité est faible plus le matériau se réchauffe rapidement en surface en absorbant peu de chaleur (isolant, bois...). Concrètement, la valeur E_f exprime combien de kilojoules ont pénétré sur un (1) m² de surface de matériau, une (1) seconde après qu'elle ait été mise en contact avec une autre surface d'un (1) m² plus chaude qu'elle d'un (1) °C. Elle est exprimée par la formule :

$$E_f = \sqrt{\lambda \rho C} \quad (\text{En W} \cdot \text{s}^{1/2} / \text{m}^2 \cdot \text{°C}) \quad \text{avec :} \quad \begin{array}{l} \lambda : \text{conductivité thermique en W/m} \cdot \text{°C} \\ \rho : \text{masse volumique en kg/m}^3 \\ C : \text{chaleur spécifique en kJ/kg} \cdot \text{°C} \end{array}$$

II. 1. 2. L'isolation thermique

Une maison climatisée perd ou acquiert sans arrêt de sa chaleur à travers l'ensemble de ses parois. Isoler, consistera donc à réduire les déperditions, ou les apports indésirables en utilisant des matériaux de construction

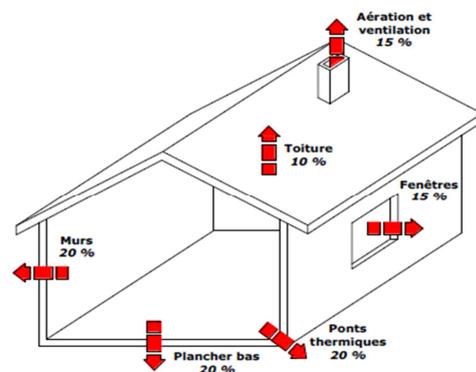


Figure 02 : Répartition moyenne des déperditions Dans une maison individuelle neuve. **Source :** Liébard A., De Herde A., 2005,

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

permettant la diminution du transfert de chaleur entre deux Ambiances thermiques. Pour limiter les déperditions de chaleur ou minimiser les apports indésirables, il est recommandé de recourir aux isolants thermiques qui sont caractérisés par un faible coefficient de conductivité thermique (λ). Dans la pratique, ce coefficient ne suffit pas à indiquer la qualité isolante d'un matériau ou d'une paroi, on tient compte aussi de l'épaisseur du matériau ou des différentes épaisseurs, on parlera alors de résistance thermique ($R=e/\lambda$).

II. 1. 2.1. Les propriétés d'un matériau isolant thermique

La performance dans le domaine de l'isolation est fonction de facteurs principaux : la résistance thermique (R) et le coefficient de conductivité (λ).ils conditionnent notamment l'épaisseur de matériau nécessaire pour obtenir une isolation suffisante.

La conductivité thermique : (λ en W/m. °C) :

C'est la capacité de transmission de chaleur d'un matériau par conduction. Plus la conductivité est faible plus les matériaux est isolant.

La résistance thermique : (R en m².K/W) :

C'est l'épaisseur devise par la conductivité. C'est la donnée utilisée pour déterminer l'isolation d'un bâtiment ou d'une paroi.

II. 1. 2.2. Les techniques d'isolation thermique

La mise en œuvre de l'isolation se fait suivant trois techniques avec des avantages et des inconvénients pour chacune d'elle :

a) Isolation par l'intérieur :

Elle est plus adaptes aux bâtiments a usage intermittent car faible inertie des murs.

b) Isolation par extérieur :

Elle bien adapter aux locaux a chauffage continu, elle profite de l'inertie thermique des murs pour réguler la température dans la pièce.

c) Isolation répartie :

Elle consiste à répartir l'isolation au niveau des murs maçonnées qui assurent la fonction porteuse. Pour une construction neuve il est également possible de choisir des matériaux dits « blocs à isolation répartie » qui permettent a la fois de construire sur plusieurs étages et d'être suffisamment isolant.

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

CRITERES	ISOLATION EXTERIEURE		ISOLATION INTERIEURE		ISOLATION INTERMEDIAIRE (PAR REMPLISSAGE DU MUR CREUX)	
<input checked="" type="checkbox"/> Critère Positif						
<input checked="" type="checkbox"/> Critère Négatif						
INERTIE THERMIQUE	L'intérieur bénéficie de la capacité d'accumulation de chaleur des parois lourdes	<input checked="" type="checkbox"/>	L'inertie thermique du mur existant n'est plus utilisable pour améliorer le confort intérieur	<input checked="" type="checkbox"/>	L'intérieur bénéficie de la capacité d'accumulation de chaleur des parois lourdes	<input checked="" type="checkbox"/>
PONTS THERMIQUE	Suppression des ponts thermiques (sauf vers les fondations)	<input checked="" type="checkbox"/>	Ponts thermiques difficiles à éviter	<input checked="" type="checkbox"/>	Cette solution ne permet pas de corriger les défauts ponts thermiques	<input checked="" type="checkbox"/>
PROTECTION CONTRE LA PLUIE BATTANTE	Le nouveau parement assure une bonne protection contre la pluie battante	<input checked="" type="checkbox"/>	Les problèmes de pénétration de pluie battante doivent être résolus sous peine de détériorer l'isolant	<input checked="" type="checkbox"/>	Les pénétrations de pluie doivent être évacuées par drainage de la coulisse ou par séchage du parement	<input checked="" type="checkbox"/>
PROTECTION CONTRE LES ECARTS DE TEMPERATURE ET LE GEL	L'isolation extérieure protège le mur du gel et des écarts de température trop importants	<input checked="" type="checkbox"/>	Le mur est sujet à des écarts de température augmentant le risque d'apparition de fissures	<input checked="" type="checkbox"/>	Le mur de parement est sujet à des écarts de température augmentant le risque d'apparition de fissures	<input checked="" type="checkbox"/>
SECHAGE DU MUR EXTERIEUR	La température du mur reste constante tout au long de l'année et de plus le mur est protégé des pluies	<input checked="" type="checkbox"/>	Le mur devient plus froid en hiver ; son séchage est moins rapide et l'humidité extérieure pénètre plus profondément	<input checked="" type="checkbox"/>	Le mur de parement devient plus froid en hiver ; son séchage devient moins rapide et il est donc plus humide	<input checked="" type="checkbox"/>
HUMIDITE	La vapeur d'eau doit pouvoir migrer de l'intérieur vers l'extérieur au travers du revêtement extérieur	<input checked="" type="checkbox"/>	Il y a risque de formation de condensation à l'interface entre le mur et l'isolant ; il faut prévoir un pare-vapeur efficace	<input checked="" type="checkbox"/>	L'humidité ascensionnelle doit être traitée ; il faut aussi une protection supplémentaire au droit des ponts thermiques	<input checked="" type="checkbox"/>
DEGRADATION DU PAREMENT EXTERIEUR	Cette solution implique un nouveau parement extérieur	<input checked="" type="checkbox"/>	Le séchage du mur extérieur étant moins rapide, le parement extérieur devient plus humide et peut se dégrader	<input checked="" type="checkbox"/>	Le parement extérieur devient plus humide et il peut se dégrader ; si l'isolant injecté gonfle, le parement peut éclater	<input checked="" type="checkbox"/>
MODIFICATION DE L'ASPECT EXTERIEUR	L'aspect extérieur étant modifié cette solution nécessite un permis d'urbanisme	<input checked="" type="checkbox"/>	L'aspect extérieur du bâtiment est conservé	<input checked="" type="checkbox"/>	L'aspect extérieur du bâtiment est conservé	<input checked="" type="checkbox"/>
MODIFICATION DES FINITIONS INTERIEURES	Les finitions intérieures ne sont pas modifiées	<input checked="" type="checkbox"/>	De nouvelles finitions intérieures doivent être appliquées	<input checked="" type="checkbox"/>	Les finitions intérieures ne sont pas modifiées	<input checked="" type="checkbox"/>
MODIFICATION DU VOLUME DES LOCAUX	Les volumes des locaux restent inchangés	<input checked="" type="checkbox"/>	Les volumes des locaux sont diminués	<input checked="" type="checkbox"/>	Les volumes des locaux restent inchangés	<input checked="" type="checkbox"/>
COUT	Solution assez coûteuse qui nécessite un savoir-faire	<input checked="" type="checkbox"/>	Solution plus simple et qui entraîne des frais moins importants que l'isolation par l'extérieur	<input checked="" type="checkbox"/>	Solution plus simple et qui entraîne des frais moins importants que les autres solutions	<input checked="" type="checkbox"/>

Figure 03 : les techniques d'isolation avantages et inconvénients.

II. 2. Le stockage de l'énergie thermique

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

- **Chaleur sensible**
- **Chaleur latente**
- **Stockage thermochimique**

II. 2. 1. Chaleur sensible

Le stockage par chaleur sensible est réalisé par un apport thermique augmentant la température du milieu récepteur « monphasé » (liquide ou solide). Le déstockage (ou soutirage) de la chaleur entraînera une diminution de la température de ce milieu. Considérons le réchauffement d'un corps à haute température qu'on place ensuite dans un système d'utilisation dont la température est plus basse. À pression constante, pour l'élévation de la température T_1 à T_2 d'un corps de masse m et de capacité thermique massique $c(T)$, l'énergie stockée est donnée par la variation d'enthalpie [Dumas, 2002] :

$$H_2 - H_1 = mc (T_2 - T_1).$$

Remarque 1: La quantité d'énergie qui est stockée est proportionnelle à la différence de température. Ainsi, le choix de ce stockage est intéressant lorsque l'écart de température est grand.

Au cours processus de stockage, si nous rencontrons les cas suivants :

1. Si $T_2 > T_1$ alors il s'agit du stockage chaud.
2. Si $T_2 < T_1$ alors il s'agit du stockage froid.

Les principaux constituants employés pour le stockage par chaleur sensible sont des liquides (eau) ou des solides (pierres) possédant des chaleurs spécifiques importantes.

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

II. 2.2. Chaleur latente

Le stockage par chaleur latente consiste à emmagasiner de l'énergie, qui par la suite va provoquer une variation de température et un changement de phase du matériau. Lors de la restitution de l'énergie, on observera le phénomène du changement de phase inverse. La chaleur Q , absorbée ou cédée, durant le processus de changement de phase est régie par :

$$Q = m LF \quad (LF \text{ chaleur latente de changement de phase [J.kg}^{-1}\text{)]}.$$

Dans la pratique, il se peut que la chaleur sensible et la chaleur latente interviennent successivement dans les processus thermiques. En effet, si on considère qu'un constituant servant de stockage est initialement à la température T_1 , qui est inférieure à la température de fusion TF et que TF soit inférieure à la température finale T_2 ($T_1 < TF < T_2$), le stockage se fera sous forme sensible et sous forme latente.

Le stockage par chaleur latente est ainsi performant pour stocker de grandes quantités d'énergie lorsque les masses et l'écart de température sont faibles. Cependant, ce type de stockage oblige à recourir à des technologies très élaborées.

II. 2.3. Stockage thermochimique

Le stockage thermochimique met en jeu l'énergie absorbée au cours d'une réaction chimique endothermique. Lors d'un réchauffement, l'équilibre chimique est perturbé et celui-ci se déplace vers la droite (sens de réaction). Lorsqu'il y a contact avec une source dont la température est plus basse que celle au départ, le déplacement de l'équilibre chimique est observé dans le sens inverse. Dans le premier cas, l'énergie est stockée et dans le second elle est déstockée. D'après [Dumas, 2002], le déplacement de l'équilibre est généralement insuffisant et le gain d'énergie est inférieur à 10 % de l'énergie de type sensible.

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

II. 3. Les matériaux à changements de phase (MCP)

Les matériaux à changements de phase (MCP) sont des composés qui stockent et libèrent de la chaleur latente lors d'une transformation de phase (solide-liquide) à température constante.

Leur principe de fonctionnement est simple et est illustré par la Figure I.1. Comme pour la transformation de la glace en eau qui se produit lorsque la température dépasse les 0 °C, les matériaux à changements de phase changent d'état (solide-liquide) en fonction de leur température de fusion.

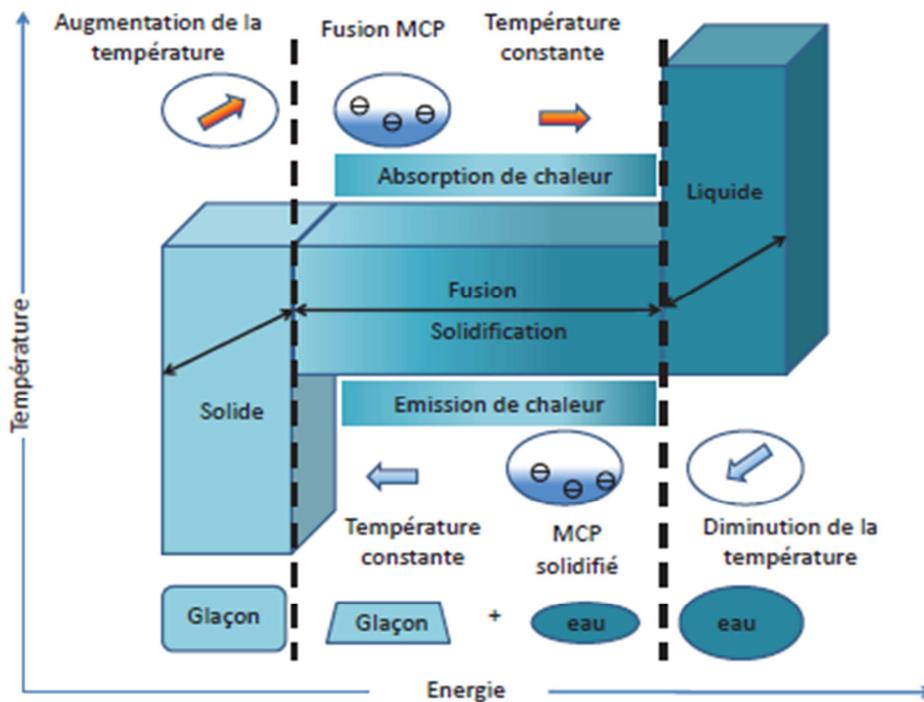


Figure 04 : Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase

Dans les bâtiments, il s'agit du même principe. Dès que la température du matériau à changement de phase atteint sa température de fusion, il commence à fondre et va absorber une partie de l'énergie qui l'entoure à fin de la stocker en grande quantité et, dès que la température devient inférieure, l'énergie stockée est restituée. Cette transition de phase est

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

facilitée par l'augmentation de la surface d'échange entre le MCP et l'air ambiant. Généralement, il est intégré au sein des constituants d'une paroi pour faire diminuer les pics de température d'une pièce et de limiter l'utilisation de systèmes coûteux en énergie. Le MCP peut être couplé avec un système de ventilation nocturne où à une climatisation de dimensionnement réduite, pour qu'il puisse se générer plus efficacement (décharge de l'énergie).

Présent sous forme de microbilles (figure 05), ils sont employés pour renforcer l'inertie thermique des bâtiments à structures légères et sont mis en œuvre de façon à faciliter leur intégration dans tous les matériaux de construction tels que les enduits, les blocs de bétons, les plaques de Placoplatre, etc. De plus, leurs tailles microscopiques ne permettent pas de briser les billes contenant le produit et par conséquent assurent un taux de risque quasi nul, c'est-à-dire que la matière première ne peut s'échapper des billes quelque soit la phase. Leur cycle de vie est estimé à 30 ans.

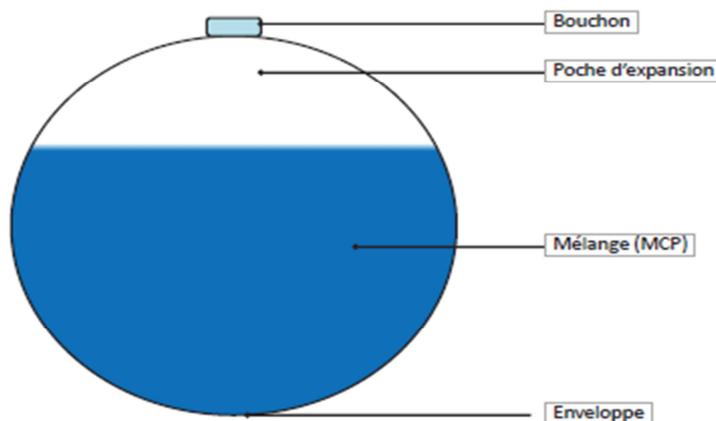


Figure 05 : Microbille contenant le MCP.

Les MCP sont également employés dans de nombreuses applications industrielles : l'isolation thermique des bâtiments, la climatisation passive, chauffage et eau chaude, applications médicales : transport de sang, thérapie chaud-froid, réduction des effets exothermiques de réactions chimiques, le refroidissement de moteurs dans l'industrie automobile, la protection thermique de composants et circuits électroniques, récupération de la chaleur issue de l'incinération des déchets (MCP utilisé acétate de sodium tri-hydraté), l'énergie solaire, les systèmes thermiques dans l'aérospatiale, l'industrie du textile, etc.

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

II. 3. 1. Historique des MCP

- Depuis le premier choc pétrolier des années 70, des études sur les MCP ont été entreprises avec les sels hydratés. Ils étaient testés initialement pour stocker l'énergie solaire. Or, de nombreux problèmes se sont présentés et la communauté scientifique se rendit rapidement compte que ce type de MCP ne pouvait être utilisé. Les principaux problèmes rencontrés étaient :
- La toxicité;
- Une mauvaise transition de phase;
- La propension à la surfusion;
- Un mauvais conditionnement (poches, capsules, barres,) ;
- La durée de vie très faible (limitation du nombre de cycles).

Beaucoup de ces désavantages ont mis à l'écart l'étude de ces matériaux. Ce n'est que dans le cadre du « Grenelle de l'Environnement » qu'un intérêt nouveau s'est manifesté, avec de nouvelles substances et de nouveaux modes de conditionnement. En effet, l'apparition de nouveaux MCP solide/liquide à forme stabilisée a permis de relancer les applications dans de nombreux domaines. La majorité des MCP à forme stabilisée sont des composites comportant une matrice solide inerte dont la porosité est remplie par le MCP. Cette matrice inerte assure la stabilité structurelle de l'ensemble et évite l'écoulement de la phase liquide du MCP à travers le conteneur. A basse température ($< 120\text{ }^{\circ}\text{C}$), les développements suivants sont rencontrés :

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

Par le biais des nouvelles techniques, les MCP connaissent de multiples applications comme celles citées dans II.3.

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

II. 3. 2. Classification des MCP

Les matériaux à changements sont nombreux et disponibles dans n'importe quelle gamme de température souhaitée. Les MCP peuvent être classés selon leur nature chimique, en trois catégories (organiques, inorganiques et eutectiques) qui sont illustrés sur la figure 06.

Un grand nombre de matières chimiques organiques et inorganiques peuvent être identifiées comme MCP d'un point de vue température et chaleur latente de changement de phase. En revanche, le point de transition de phase dans une plage de fonctionnement pour la majorité d'entre eux, ne permet pas de satisfaire aux critères requis pour un support de stockage adéquat. Afin de pallier ces inconvénients, des solutions seront proposées après avoir passé en revue les différentes familles de matériaux à changements de phase.

II. 3. 2.1. Les MCP organiques

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

II. 3. 2.1. A. Les paraffines

Les paraffines normales du type C_nH_{2n+2} sont une famille d'hydrocarbures saturés dont les propriétés physiques sont assez semblables. Les paraffines possédant un nombre d'atomes de carbone situé entre 5 et 15 sont caractérisés de liquides, et les autres de solides cireux. La cire de paraffines est un mélange issu des chaînes n-alcane $CH_3 - (CH_2) - CH_3$. Lors de la cristallisation de la chaîne (CH_2) , une quantité importante de chaleur latente est libérée. Plus la longueur de cette chaîne sera grande, plus la température et la chaleur latente de fusion seront élevées. La paraffine est très utilisée car elle est : sûre, fiable et non réactive, possède un long cycle de fusion, non-corrosive, chimiquement inerte et stable (< 500 °C). Elle est compatible avec tous les conteneurs en métal et s'incorpore

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

facilement dans les systèmes de stockage de l'énergie thermique. Lors du changement de phase, sa variation en volume et sa pression en vapeur sont faibles. En revanche, elle possède également des propriétés non désirables à son utilisation. En effet, la paraffine est inflammable, possède une faible conductivité thermique et n'est pas compatible avec les conteneurs en plastiques (elle infiltre et adouci ces derniers). Néanmoins, ces inconvénients peuvent être réduits en modifiant légèrement ses propriétés thermo physiques et l'unité de stockage. D'après [Sharma et al., 2009a], les plus prometteuses sont résumées dans le tableau 02 :

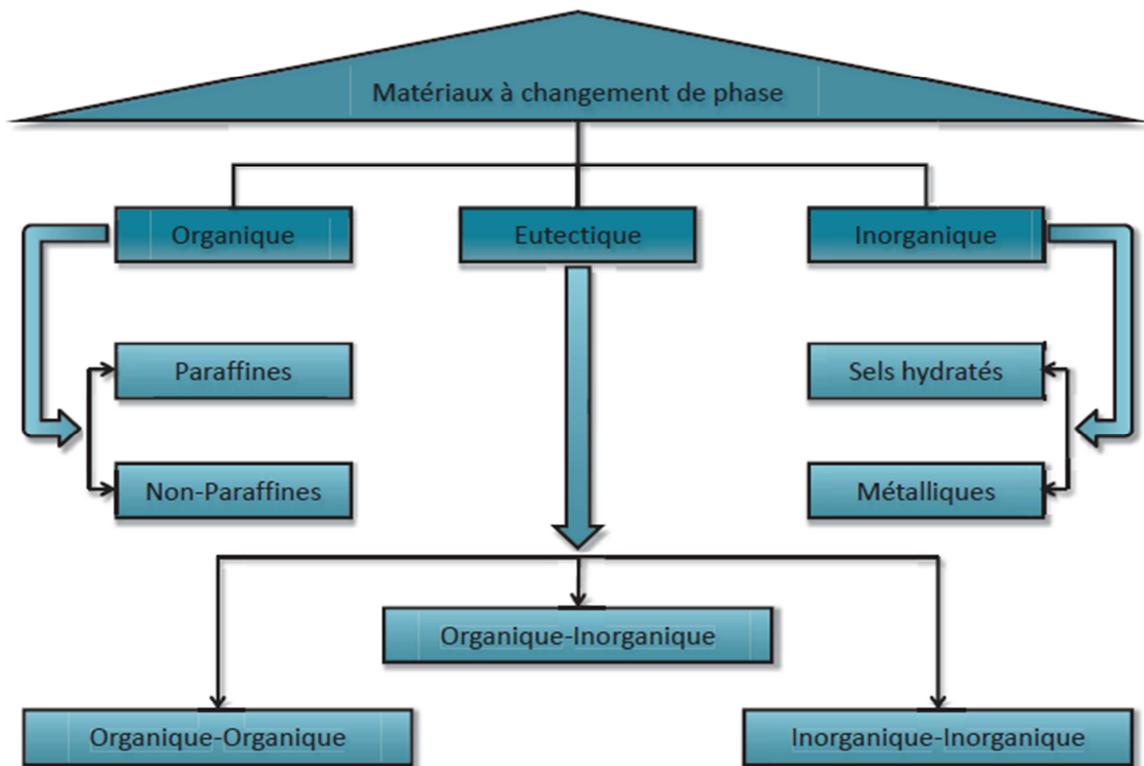


Figure 06 : Classification des matériaux à changement de phase

Les paraffines		
Nombre d'atomes de carbone	Température de mélange (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ · kg ⁻¹)
16	16,7	237,1
18	28	244
20	36,7	246

Tableau 02 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques paraffines

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

II. 3. 2.1. B. Les non-paraffines

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

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

Selon [Sharma et al. 2009a], les meilleurs candidats sont donnés par le tableau 03) :

Les non-paraffines		
Matériau	Température de mélange (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ · kg ⁻¹)
acide D-Lactique	26	284
Trimyristine	33-57	201-213

Tableau 03 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques non- paraffines

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

II. 3. 2.1. C. Les acides gras

Le sous-groupe « acides gras » possède des chaleurs de fusion comparables avec celles des paraffines. De plus, ils sont peu ou pas concernés par la surfusion et ils présentent une faible corrosion. Les acides gras peuvent être considérés comme matériaux de stockage de l'énergie thermique. A basse température, le Tableau 04 indique quelques acides gras les plus prometteurs [Sharma et al., 2009a] :

Les acides gras		
Matériau	Température de mélange (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ · kg ⁻¹)
Acide acétique	16,7	184
Polyéthylène glycol 600	20-25	146
Acétamide	81	241

Tableau 04 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques acides gras.

II. 3. 2.2. Les MCP inorganiques

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

II. 3. 2. 2.A. Les sels hydratés

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

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

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

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

Également, le phénomène de surfusion est observé lorsque commence la cristallisation au point de changement de phase. Afin d'éviter ce problème, des matériaux appropriés de nucléation peuvent être utilisés pour que la croissance des cristaux débute dans le milieu de stockage. Le choix du conteneur est également essentiel pour contenir le matériau et ne pas laisser l'eau y pénétrer. En effet, dans [Abhat, 1983] la dégradation des matériaux tels que le $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ survient après seulement deux cycles lorsque l'échantillon n'était pas hermétiquement fermé. De plus, comme les systèmes de stockage thermique utilisent généralement des conteneurs en métal, les sels hydratés peuvent provoquer la corrosion dans ces derniers. Citons par le biais du tableau 05, quelques exemples de sels hydratés les plus prometteurs [Sharma et al, 2009a] :

les sels hydratés		
Matériau	Température de mélange (°C)	Chaleur latente de fusion ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)
$\text{CaCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$	29,8	174
$\text{LiNO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	30	296
$\text{LiNO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	30	189
$\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	37	223

Tableau 05 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques sels hydratés

II. 3. 2.2. B. Les métaux

Il s'agit essentiellement des métaux à fusions basses et des métaux eutectiques. Cette catégorie n'a pour l'instant pas été envisagée pour la technologie de MCP en raison de leur poids. Leurs caractéristiques principales sont : une faible chaleur de fusion par unité de poids, une forte chaleur de fusion par unité de volume, une conductivité thermique élevée,

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

une chaleur spécifique faible et une pression en vapeur relativement élevée. Les plus prometteurs des métalliques [Sharma et al. 2009a] sont donnés par le tableau 06 :

Les métalliques		
Matériau	Température de mélange (°C)	Chaleur latente de fusion (kJ · kg ⁻¹)
Gallium	30	80,3
Cerrobend eutectique	70	32,6

Tableau 06 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques métallique

II. 3. 2.3. Les MCP eutectiques

Les MCP eutectiques sont des substances composées de plusieurs MCP purs. En général, ce sont des mélanges de MCP organiques et inorganiques (organique-organique, organique-inorganique, inorganique-inorganique).

Après avoir exposé l'ensemble des familles à changement de phase, nous résumons à travers le tableau 07, les principaux avantages et inconvénients des différentes classes de MCP.

Avantages		
Organiques	Inorganiques	Eutectiques
<ul style="list-style-type: none"> • disponibles dans une large gamme de température • pas de ségrégation chimiquement stables • haute énergie de fusion • non corrosifs • recyclables 	<ul style="list-style-type: none"> • chaleur latente élevée • disponibles en grande quantité • faible coût • point de fusion net • inflammable • forte conductivité thermique • chaleur spécifique massique élevée 	<ul style="list-style-type: none"> • point de fusion net similaire à une substance pure • chaleur latente légèrement supérieure à celle des composés organiques

Tableau 07.a : Avantages des différentes catégories de MCP

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

Inconvénients		
Organiques	Inorganiques	Eutectiques
<ul style="list-style-type: none"> • faible conductivité thermique • chaleur latente faible • non inflammable • chaleur spécifique massique faible • fort coût • masse faible 	<ul style="list-style-type: none"> • phénomène de surfusion • agent de nucléation étranger indispensable • corrosifs • vieillissement rapide 	<ul style="list-style-type: none"> • peu de données disponibles sur les propriétés de ces matériaux • peu utilisés au niveau des applications industrielles

Tableau 07.b : inconvénients des différentes catégories de MCP

À l'issue de cette partie, les questions que nous pouvons nous poser sont :

1. Parmi l'ensemble des familles des MCP, quelle est celle qui nous intéresse et susceptible d'applications en bâtiment ?
2. Sur quels critères doit-on s'appuyer pour choisir le matériau ?

II. 3. 3. Critères de choix d'un matériau à changement de phase

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

II. 3. 3. 1. Propriétés thermiques

- La température de transition de phase doit être conforme au domaine d'application.
- Une chaleur latente de transition élevée.
- Une bonne qualité de transfert de chaleur. Par exemple, une conductivité thermique élevée faciliterait la charge et la décharge du stockage de l'énergie.

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

II. 3. 3. 2. Propriétés physiques

- Une densité importante du corps permettra un volume de stockage très faible et donc un réservoir de stockage petit. Durant le processus du changement de phase, il faudra étudier la variation de la densité (exemple : les MCP aqueux).
- Pour réduire les contraintes mécaniques dans le conteneur, la tension en vapeur doit être minimale et l'expansion volumique petite.
- Une stabilité des phases favorable pour le stockage et le déstockage de la chaleur.
- Propriétés cinétiques
- La surfusion doit être réduite. Le recours à l'utilisation d'additif est nécessaire.
- Un taux de cristallisation important.
- Propriétés chimiques
- Une stabilité chimique à long terme des cycles de fusion/solidification.
- La compatibilité avec les matériaux de construction.
- L'étude de la dangerosité du produit (toxicité, inflammabilité, explosion,...) passant par les réglementations et normalisations en vigueur. La dangerosité du produit doit être minimisée.
- Recyclable.

II. 3. 3. 3. Aspects économiques

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

II. 3. 3. 4. Critères technologiques

- Expansion volumique faible lors de la fusion afin de minimiser les contraintes mécaniques dans le support de stockage.
- Stabilité physico-chimique, longue durée de vie.
- Compatibilité avec les matériaux du support de stockage.

Chapitre II : Amélioration la qualité thermique des bâtiments par l'inertie thermique ; cas des matériaux à changement de phase

En respectant l'ensemble de ces critères, l'étude menée jusqu'à présent et selon la thématique de notre cadre de travail, permet d'opter pour les matériaux à changement de phase solide/liquide. Généralement, la classe des MCP qui est utilisée est organique. En effet, les principaux travaux réalisés dans le secteur du bâtiment utilisent la cire de paraffine.

Conclusion

La notion de confort thermique peut être perçue sous différents angles, celui de l'interaction dynamique entre le corps humain et son environnement thermique ou encore celui du comportement de l'enveloppe d'un bâtiment vis-à-vis d'un environnement climatique déterminé. L'environnement thermique est caractérisé par un ensemble de grandeurs physiques (La température de l'air, la température de rayonnement, l'humidité et la vitesse de l'air). L'enveloppe du bâtiment et les matériaux qui la constituent se caractérisent par des paramètres propres tels que l'isolation, l'inertie, la diffusivité et l'effusivité thermiques...etc, L'individu, quant à lui, interagit avec son environnement thermique via des phénomènes physiques, physiologiques et psychologiques.

Ainsi qu' a travers ce chapitre nous avons défini l'existence de nouveaux matériaux qui sont les matériaux a changement de phase (MCP) qui ont la caractéristique de pouvoir stocker une grande densité d'énergie par unité de volume lors du changement d'état (solide-liquide), et leurs application dans le secteur du bâtiment permet d'améliorer la qualité thermique de ses derniers de manière passive.

CHAPITRE III.

***ETAT DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
DES MCP ET PRESENTATION DE
QUELQUES CAS PRATIQUES***

Chapitre III : *Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques*

Introduction

Le présent chapitre propose les nouvelles techniques de chauffage et rafraîchissement passifs basées sur l'utilisation des matériaux à changement de phase (MCP). L'objectif principal de ce chapitre est donc de présenter et de faire la lumière sur l'étude des phénomènes de transfert de chaleur lors du stockage (charge) et déstockage (décharge) d'énergie solaire dans les matériaux à changement de phases (MCP), et d'étudier la possibilité d'application de cette technique au chauffage et rafraîchissement passifs dans le bâtiment.

- Intégration dans les éléments de constructions autres que les murs
- Intégration dans les unités de stockages à chaud et/ou à froid.

L'utilisation des matériaux à changement de phase encapsulés dans les dalles et les murs des bâtiments et dans les éléments de constructions autres que les murs tel que les vitrages les rideaux les enduits etc. Sont autant de méthodes importantes permettant de réaliser des systèmes intégrés de haute densité de stockage avec une meilleure efficacité énergétique. De plus, les caractéristiques thermo physiques des MCP les rendent convenables pour utilisation dans le stockage d'énergie pendant l'hiver et pour l'isolation thermique contre l'excès de chaleur pendant l'été.

III. 1. Avancées de la recherche scientifique dans le domaine des matériaux à changement de phase dans le secteur du bâtiment

Les MCP peuvent directement être intégrés dans les différentes parois d'un bâtiment à fin que celui-ci puisse atteindre de hautes performances énergétiques. les développements des MCP ont permis de faciliter leur intégration dans les murs Trombe-Michel, les toitures, les volets, les plafonds et les systèmes de chauffage par plancher. Leur intégration dans les enveloppes des bâtiments dépend essentiellement des différentes applications visées, recourant ainsi à des configurations et des caractéristiques uniques. Dans le secteur du bâtiment, deux applications principales sont recensées d'une part, l'utilisation naturelle obtenue par apport solaire pour le chauffage ou lors des nuits froides pour le refroidissement, et d'autre part, l'utilisation de la chaleur ou du froid issu des sources artificielles. La disponibilité, la demande dans le temps et le pouvoir de production sont les atouts clés pour le stockage de l'énergie thermique. L'utilisation des MCP pour chauffer ou refroidir un bâtiment, peut se faire de trois façons différentes [Sharma et al., 2009a] :

Chapitre III : *Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques*

- Intégration dans les murs du bâtiment;
- Intégration dans les éléments de constructions autres que les murs;
- Intégration dans les unités de stockages à chaud et/ou à froid.

III. 1.1. Les MCP intégrés dans les murs

Parmi l'ensemble des applications existantes, l'intégration des MCP dans les murs est la plus utilisée car la zone d'échange de chaleur est grande et efficace, mais également sa mise en œuvre est pratique et simple. Les deux méthodes d'intégrations des MCP dans les murs sont « l'immersion » et « l'attachement » [Suliyang, 2010].

La composition de l'enveloppe d'un bâtiment tient compte des murs situés entre l'environnement intérieur et extérieur, qui d'après les études expérimentales et théoriques jouent un rôle fondamental au niveau des échanges de chaleur avec le milieu extérieur. L'une des premières recherches fut menée à la fin des années 1970 par [Bernard et al., 1985]. L'idée consistait à comparer en l'absence de toute circulation d'air naturelle, des murs Trombe avec des matériaux performants à stockage par chaleur sensible et latente. **Les résultats des expérimentations ont montré que, pour une épaisseur de 1/5 et un poids de 1/12 d'un mur traditionnel, l'effet du stockage de l'énergie thermique était quasi-similaire. D'après [Bernard et al., 1985], l'utilisation de certains MCP dans un mur Trombe permet d'avoir une enveloppe légère avec les mêmes performances de stockage thermique que la maçonnerie traditionnelle.**

[Boudreau, 1980] a testé deux murs passifs avec comme matériau à changement de phase le chlorure de calcium hexa hydraté ayant une température de fusion de 29 °C. Les résultats ont conduit à la conclusion qu'un mur de 8.1 cm avec MCP a de meilleures performances thermiques qu'un mur de 40 cm de béton. En revanche, les MCP ont des conductivités thermiques et des efficacités globales faibles. Pour pallier ceci et en retenant une paraffine de qualité commerciale, Knowles [T.R. & Knowles, 1983] a utilisé de la cire de paraffine, en y rajoutant des additifs métalliques pour augmenter la conductivité et l'efficacité thermique globale du mur Trombe.

Au milieu des années 1990, de nombreux investigateurs ont continué à étudier le mur Trombe intégrant des MCP. Dans [Stritih & Novak, 1996] un mur solaire intégrant de la cire de paraffine noire (température de fusion 25 – 30 °C) a été mise en place pour absorber l'énergie solaire. Ils ont montré que l'utilisation du MCP dans le mur Trombe pouvait faire diminuer les fluctuations de température occasionnées par l'environnement

Chapitre III : *Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques*

extérieur. De plus, le point de fusion du MCP a une influence sur la température de sortie d'air. Il apparaît aussi pour le chauffage que l'épaisseur optimale du mur doit être environ égale à 50 mm et la température de fusion doit être de quelques degrés au-dessus de la température ambiante.

Au cours de l'été et l'automne 2005 à Puigverd de Lleida (Espagne), dans le cadre d'un projet Union Européenne avec MOPCOM partenaire de l'Espagne, les Pays-Bas, la Grèce et la France [Cabeza et al., 2007] ont étudié les principaux effets des MCP micro-encapsulés mélangés avec du ciment pour évaluer les performances thermiques d'une petite cabine (figure I.4), pour un climat méditerranéen et dans le but de développer un produit qui permettrait d'obtenir des économies d'énergie importantes dans les bâtiments. Le MCP commercial de MicronalPCM (BASF) a été utilisé pour cette expérimentation dont la température de changement de phase est de 26 °C et l'enthalpie de changement de phase est de 110 kJ · kg⁻¹. En comparaison avec un mur traditionnel, les résultats de l'étude montrent que le stockage de l'énergie thermique pour le mélange {béton + MCP} a une meilleur inertie thermique et donc qu'il permet des fluctuations de températures réduites.



Figure 01 : Photo de la cabine de dimensions 2.4 m × 2.4 m × 2.4 m [Cabeza et al., 2007]

En été, août 2008 et toujours dans le cadre du projet de Union Européenne, [Castell et al., 2010] ont mené des études en associant des MCP à des constructions en brique. Pour montrer l'influence des MCP, cinq cabines ont été construites avec des enveloppes de constructions et des matériaux différents (figure 02). Trois des cinq cabines sont construits avec des briques perforées (figure 03) et les deux autres en briques alvéolaires (figure 04).

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

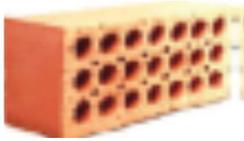


Figure 03: Briques perforées.



Figure 04 : Briques alvéolaires.

Les MCP utilisés avec les briques perforées sont le RT-27 et pour les briques alvéolaires le SP-25 A8. La composition de chaque cabine et les propriétés thermo physiques des MCP sont résumées respectivement par les tableaux 1 et 2 [Suliang, 2010] :



(a) Cabine en brique de référence non isolée



(b) Cabine avec isolation en polyuréthane



(b) Cabine avec isolation en polyuréthane et MCP (RT-27)



(d) Cabine en brique alvéolaire



(e) Cabine en brique alvéolaire avec MCP (SP-25 A8)

Figure 05 : Les différentes cabines des expérimentations [Castell et al., 2010]

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

Groupe	Type de cabine	Composition des couches du mur (extérieur vers intérieur)
Cabine avec briques perforées	Cabine de référence sans isolation	Mortier de ciment, briques creuses, lame d'air (5 cm), briques perforées, placoplâtre
	Cabine + isolation en polyuréthane	Mortier de ciment, briques creuses, lame d'air (5 cm), isolation en polyuréthane (5 cm), briques perforées, placoplâtre
	Cabine + isolation en polyuréthane +MCP	Mortier de ciment, briques creuses, chambre à air (5 cm), isolation en polyuréthane (5 cm), MCP (RT-27), briques perforées, placoplâtre
Cabine avec briques alvéolaires	Cabine de référence	Mortier de ciment, briques alvéolaires, placoplâtre
	Cabine en MCP	Mortier de ciment, briques alvéolaires, MCP (SP-25 A8 sel hydraté), placoplâtre

Tableau 01 : Compositions des différentes couches des parois des cinq cabines [Castell et al., 2010]

Propriétés	RT-27	SP-25 A8
Température de fusion [°C]	28	26
Température de solidification [°C]	26	25
Chaleur latente [kJ · kg ⁻¹]	179	180
Densité solide/liquide [kg · L ⁻¹]	0,87/0,75	1,38
Capacité thermique solide/liquide [kJ · kg ⁻¹ · K ⁻¹]	1,8/2,4	2,5
Conductivité thermique [W · m ⁻¹ · K ⁻¹]	0,2	0,6

Tableau 02 : Propriétés thermo physiques des MCP.

Parmi les deux méthodes précédemment citées, la méthode de l'attachement a été retenue. Le MCP utilisé est un MCP commercial de la société Rubitherm (RT-27). Les expérimentations sont classées en deux catégories. L'une correspond à une « fluctuation libre en température » sans aucun système de refroidissement et l'autre peut être associée à un « environnement contrôlé » associé à un système de refroidissement a fin d'obtenir une température intérieure constante et fixée à 24 °C. Les résultats ont conduit à des conclusions semblables à [Cabeza et al., 2007]. En effet, ils ont observé une atténuation de 1 °C de la température et des fluctuations à l'intérieur de la cabine cubique. De plus, cette

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

expérience à permis de soulever un problème lié à la solidification durant la nuit. Ce problème est une mauvaise régulation de la température pour le jour suivant. A fin de pallier cet inconvénient, une des solutions proposées est de mettre en place un système de refroidissement passif ou actif, ou également utiliser un système de ventilation associé à l'enveloppe de la cabine intégrant le MCP.

Concernant les expérimentations pour un « environnement contrôlé » les résultats sont concluants d'un point vue des économies d'énergies. La comparaison entre une cabine intégrant des MCP (RT-27) et une cabine sans MCP conduit à une réduction de 15 % de la consommation électrique. Pour la cabine intégrant un MCP ayant une température de changement de phase de 25 °C (SP-25), une réduction de 17 % de la consommation électrique a été obtenue. Ainsi, une réduction d'émissions de CO₂ d'environ 1 – 1,5 kg · an⁻¹ · m⁻² a pu être déduite.

En utilisant un MCP commercial (sous forme de plaques planes de 5 mm) de la société DuPont de Nemours, des expérimentations ont été menés par [Kuznik & Virgone, 2009b] [Kuznik & Virgone, 2009a] [Kuznik & Virgone, 2006] sur la cellule MINIBAT dont les dimensions sont (3.10 m × 3, 10 m × 2, 50 m). Pour deux chambres considérées, la méthode d'attachement a été retenue. Séparer par un mur, nous avons une chambre dont la température de la pièce reste constante. Les résultats montrent que la réduction des fluctuations des températures de l'air et de la surface du mur améliore la convection naturelle [Kuznik & Virgone, 2009b]. L'intégration des panneaux MCP dans les panneaux muraux, permet ainsi d'améliorer le confort thermique intérieur.

Depuis le 1er Avril 2008, la communauté urbaine du « Grand Lyon »¹ situé à Vénissieux (France) a opté pour les produits de DuPontTMEnergain R pour contribuer à sa politique d'innovation visant à réduire sa consommation énergétique et améliorer le confort thermique sans utiliser la climatisation. Les MCP sont placés à l'intérieur des cloisons et à l'intérieur du plénum du faux-plafond, dans les bureaux et les salles de réunions. Le choix de l'intégration des MCP a été retenu afin d'éviter la maçonnerie et par conséquent ne pas diminuer les surfaces intérieures du bâtiment. Le panneau DuPontTMEnergain R à inertie thermique offre des propriétés intéressantes à la fois en termes d'économies d'énergie et de contrôle de la température de l'ambiance des bâtiments à structures légères. Le MCP utilisé se présente comme un panneau recouvert d'aluminium en surface, contenant un composé solide de copolymère et de paraffine. Les performances énergétiques ont montré que 1 m² du panneau MCP peut stocker une quantité de chaleur

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

équivalente à 1 m² de béton dont l'épaisseur est 8 fois celle de ce dernier. Les résultats ont montré également que le panneau MCP employé peut diminuer les coûts énergétiques allant de 35 % pour la climatisation et à 15 % pour le chauffage en cours de soirée et en période hivernale.

III. 1.2. Les MCP intégrés à la toiture

Les sollicitations solaires sont plus importantes au niveau des toitures d'un bâtiment, car il s'agit de la surface la plus exposée au rayonnement solaire. La toiture joue un rôle de « tampon thermique » entre l'environnement intérieur et extérieur. Pour réduire cet apport énergétique provenant de la toiture, trois solutions peuvent être envisagées [Miranville, 2002] :

- Cas 1 : arrêter le rayonnement solaire avant qu'il n'atteigne la paroi ;
- Cas 2 : limiter l'absorption de l'énergie par la paroi ;
- Cas 3 : limiter le transfert de l'énergie précédemment absorbée par la paroi.

Dans les cas (1) et (2), l'intervention se fait à l'extérieur de la toiture en ayant recours pour le cas (1) à des sur toitures et dans le cas (2) à des revêtements réfléchissants. Du fait des contraintes matérielles, les deux premières méthodes sont limitées et nécessitent de recourir à une troisième méthode qui est l'utilisation d'isolants thermiques. A Chenay (Inde), [Pasupathy et al., 2008; Pasupathy & Velraj, 2008] ont étudié l'influence de l'effet tampon thermique d'un matériau à changement de phase intégré à la toiture. Cette étude associe expérimentations et simulations numériques. Les différents composants de leur MCP intégrés à la toiture sont donnés par la (figure 06). Des conduites d'eau ont été incorporées dans le panneau de MCP dans le but de le refroidir, au cas où la température du MCP serait plus élevée que sa température de changement de phase. L'eau froide est stockée sur le bord de la toiture. Pour l'étude, deux salles ont été construites de façons similaires, à l'exception que l'une contient une couche de MCP et l'autre non. Le MCP utilisé était l'hydrate de sel inorganique avec une température de changement de phase comprise entre 26 – 28 °C et une épaisseur de 2, 5 cm. Que ce soit d'un point de vue expérimental ou de la simulation numérique, les résultats montrent que pour une seule couche de MCP intégrée au toit, l'effet tampon thermique est valide que sur une période

Chapitre III : *Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques*

allant de Décembre à Avril et pour la période de Mai à Novembre les résultats ne sont pas satisfaisants [Pasupathy et al., 2008].

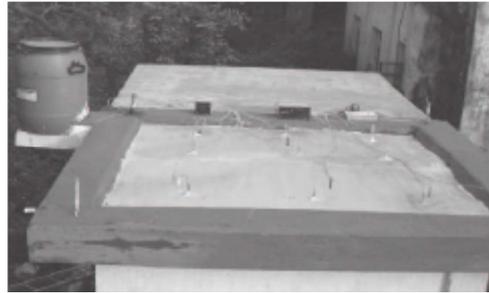


Figure 06 : Toiture avec MCP

Après n'avoir étudié qu'une seule couche de MCP intégrée à la toiture, ils se sont intéressés cette fois-ci à deux couches dont les températures de changement phase étaient différentes [Pasupathy & Velraj, 2008]. En été et dans les conditions météorologiques de Chesnay, ils ont observé que le MCP adéquat pour maintenir la température constante du bas de la dalle de béton, devait avoir entre 3 h et 6 h du matin, une température de fusion supérieure de 6 °C à 7 °C à la température ambiante [Pasupathy & Velraj, 2008]. Pour la couche supérieure du MCP, un produit commercial Climsel a été choisi. Il s'agit du Climsel C-32 2 dont la température de changement de phase est de 32 °C. Avec une épaisseur de 4 cm pour la couche supérieure, les simulations numériques montrent que la couche inférieure du MCP a une température constante voisine de sa température de changement de phase, ce qui favorise la méthode du MCP intégré à la toiture.

Pour des conditions climatiques données et en utilisant la méthode d'attachement dans le cas de deux MCP consécutifs, ayant des températures de fusions différentes intégrés convenablement à l'enveloppe des bâtiments, [Pasupathy & Velraj, 2008] ont fourni une nouvelle méthode pour améliorer l'effet tampon thermique et l'isolation thermique.

[Castell et al., 2010] ont également étudié l'influence des MCP intégrés à la toiture dans le cadre du projet MOPCOM. Ils ont montré qu'il y avait atténuation de la température au sein de leurs cabines.

Les panneaux en plafond sont situés sur la partie la plus importante de la toiture et sont également utilisés pour le chauffage et la climatisation. De plus, leur mise en œuvre dans l'enveloppe du bâtiment est très facile. Les panneaux plafonds utilisant des matériaux à changements de phase peuvent aider à chauffer ou à refroidir un bâtiment.

Des travaux ont également été menés par [Koschenz & Lehmann, 2004], qui ont développé un panneau plafond pour l'incorporer dans les bâtiments à structures légères et

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

modernisés. Le système permet l'utilisation de sources d'énergie renouvelables pour le chauffage et le refroidissement des immeubles de bureaux et industriels. La réalisation du panneau est faite en utilisant de la paraffine avec une capacité de stockage de l'ordre de $300 \text{ Wh/jour} \cdot \text{m}^2$ pour limiter l'épaisseur totale du panneau à 5 cm. Dans l'optique d'améliorer le transfert de chaleur, ils ont intégré à la masse thermique du panneau des tubes capillaires et des ailettes en aluminium. Au cours de la journée, le panneau plafond MCP est soumis à l'exposition de sources de chaleur internes. Le rôle du panneau au cours de la journée, est de dissiper la chaleur alors qu'en cours de soirée toute la chaleur possible emmagasinée peut être libérée, soit via la circulation d'eau froide circulant dans les tubes capillaires, ou soit par la ventilation d'air.

Néanmoins, pour certaines applications il est fortement déconseillé d'intégrer directement les MCP au plafond. Dans ces cas, il est recommandé soit d'utiliser des tubes de stockage équipés de MCP, soit des caloducs en dessus du plafond ou avec le faux plafond. Au Royaume-Uni, l'entreprise commerciale « Phase Change Material Products Limited » [Limited, n.d.a] a réalisé diverses applications pour contrôler passivement la température au sein des bâtiments, tout en recourant à l'utilisation des MCP intégrés au plafond. Parmi les différentes applications, nous pouvons citer celle menée au Royaume Uni [Limited, n.d.b]. L'entreprise a utilisé les MCP en tant qu'unité de stockage de l'énergie thermique et des caloducs entre la toiture et le plafond dans une salle de classe comme le montre la figure 07. Les configurations d'applications sont différentes et peuvent être variables, mais en général leurs principes de base sont quasi-identiques.



Figure 07 : Salle de classe [Limited, n.d.b]

III. 2. Forme d'Applications des MCP dans les enveloppes des bâtiments

Les MCP peuvent directement être intégrés dans les différentes parois d'un bâtiment à fin que celui-ci puisse atteindre de hautes performances énergétiques. Les développements des MCP ont permis de faciliter leur intégration dans les murs Trombe-Michel, les toitures, les volets, les plafonds et les systèmes de chauffage par plancher. Leur intégration dans les enveloppes des bâtiments dépend essentiellement des différentes applications visées, recourant ainsi à des configurations et des caractéristiques uniques. Dans le secteur du bâtiment, deux applications principales sont recensées d'une part, l'utilisation naturelle obtenue par apport solaire pour le chauffage ou lors des nuits froides pour le refroidissement, et d'autre part, l'utilisation de la chaleur ou du froid issu des sources artificielle. La disponibilité, la demande dans le temps et le pouvoir de production sont les atouts clés pour le stockage de l'énergie thermique. L'utilisation des MCP pour chauffer ou refroidir un bâtiment, peut se faire de trois façons différentes :

- Intégration dans les murs du bâtiment;
- Intégration dans les éléments de constructions autres que les murs;
- Intégration dans les unités de stockages à chaud et/ou à froid.

III. 2.1. Les MCP intégrés dans les murs.

Parmi l'ensemble des applications existantes, l'intégration des MCP dans les murs est la plus utilisée car la zone d'échange de chaleur est grande et efficace, mais également sa mise en œuvre est pratique et simple. Les deux méthodes d'intégrations des MCP dans les murs sont « l'immersion » et « l'attachement ».

La méthode de « l'immersion » consiste à intégrer les matériaux à changement de phase dans les matériaux de construction de l'enveloppe du bâtiment, tels que le béton, les briques et le plâtre. Cette intégration peut se faire par l'immersion directe, la macro-encapsulation et la micro-encapsulation. Selon l'état de l'art fait par [Sharma et al., 2009a], la méthode de la micro-encapsulation du MCP est la mieux adaptée car le MCP est encapsulé dans des polymères et la dimension de la capsule étant de l'ordre du micromètre ne permet pas de la briser, assurant ainsi un taux d'écoulement du MCP quasi nul lors de la phase liquide.

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

La méthode d' « attachement » consiste à attacher une ou plusieurs couches de MCP à une paroi. La différence entre les deux méthodes est que le MCP est intégré directement dans un panneau mural au lieu d'être présent dans le mur de construction principal. Autre que son efficacité et la réduction du coût global, cette méthode permet de rendre esthétique l'enveloppe du bâtiment lors de sa finalisation. C'est dans de tels objectifs que la méthode d' « attachement » est plus répandue et utilisée que la méthode d' « immersion ». À titre d'exemple, nous pouvons citer les panneaux produits par DuPont™ Energain R .

Dans la littérature, de nombreuses études et diverses applications concernant l'intégration d'un MCP à un mur ont déjà été menées et peuvent être classées en deux catégories :

- mur situé entre l'environnement intérieur et extérieur ;
- mur interne.

III.2.1.1 Les murs trombes à base de MCP

Les murs trombes à base MCP sont composés d'un mur de maçonnerie ordinaire contenant des MCP espacés de 20 cm environ d'une couche de verre ou d'un vitrage en plastique (Figure 8).

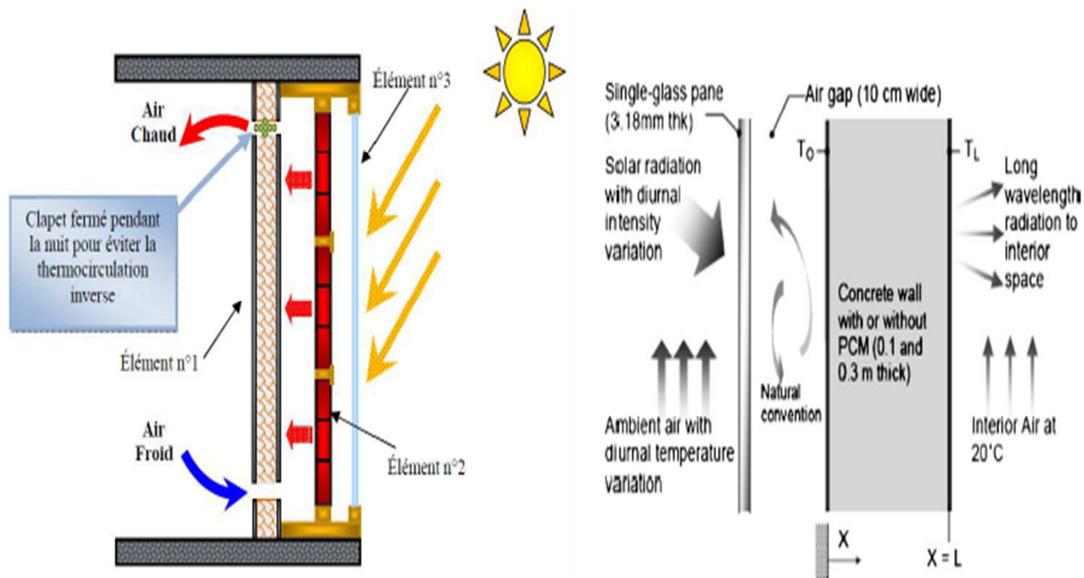


Figure 8: Configuration d'un modèle de mur trombe MCP (d'après Atul et al.2007)

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

Différents MCP ont été expérimentés pour avoir le meilleur rendement thermique d'un mur trombe à base de MCP : Askew (1978) a utilisé de la cire de paraffine, Farouk et Gucero (1979) ont utilisé un mélange de sel de Glauber et de la cire sunocoP-116. Ces différents travaux ont montré que les murs trombe à base de MCP nécessitent moins d'espace entre le mur et la couche de verre ou plastique que les murs trombe traditionnels. Ils sont plus légers que les murs trombe traditionnels. Knowler (1983) a utilisé de la cire de paraffine CG avec des additifs métalliques pour augmenter la conductivité globale et l'efficacité du mur trombe à base de MCP.

III.2.1.2 Les enduits à base de MCP

Les travaux sur les enduits à base de MCP les plus connus sont ceux du projet « RETERMAT ». Le CSTC (Centre Scientifique et Technique de la Construction) en Belgique dans le cadre du projet en collaboration avec trois autres centres de recherche (CRM, CENTEXBEL, CERTECH) a mis au point un enduit contenant 30 % en masse de MCP.

Sur le plan expérimental, de nombreuses mesures ont été effectuées sur deux cellules ayant une surface au sol de 9 m² chacune. Elles renfermaient chacune une surface vitrée de 3 m² orientée au sud. L'une d'entre elles étaient revêtue d'enduits à MCP et l'autre avec un enduit traditionnel de même épaisseur de 1,5 cm. Les mesures de températures ont pu être effectuées pour différentes périodes d'ensoleillement (Venstermans, 2010).

Les premiers résultats ont démontré que les écarts de température sont de l'ordre de 3 °C entre les deux cellules en ce qui concerne la face interne de l'enveloppe de la cellule. Au niveau du climat intérieur des cellules, une différence de température de 1 °C à 1,5 °C entre les deux cellules a été mesurée pour la température maximale journalière atteinte lors des périodes chaudes et/ou très ensoleillées d'été (Figure 9).

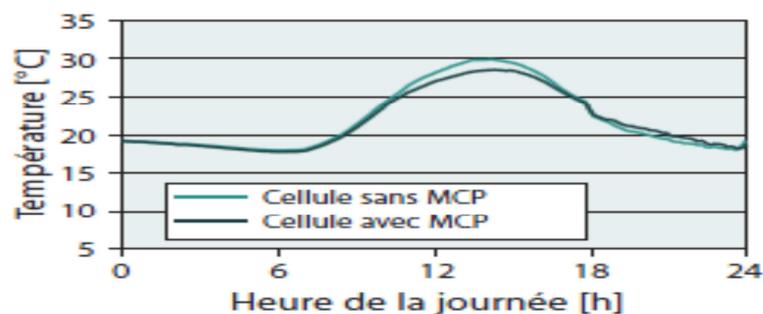


Figure 9: Evolution des températures dans les cellules jumelées contenant de l'enduit avec et sans MCP au cours d'une journée d'été ensoleillée dans le cadre du projet RETERMAT (d'après Venstermans, 2010)

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

Actuellement sur le marché les enduits à base de MCP (fabriqués par Delta ®, maxit clima, etc) existent sous la forme d'un enduit prédosé « prêt-à-gâcher ». Ils sont à appliquer sur une épaisseur d'environ 15 mm (Venstermans, 2010).

III. 2.2. Le chauffage par le sol

Comme le plancher est une partie importante de l'enveloppe du bâtiment, il était intéressant de développer un système de plancher chauffant. Actuellement, un tel système est le mode de chauffage le plus confortable qui émet une chaleur douce et agréable, silencieusement, sans occuper l'espace et avec toute la sécurité désirée.

Les conditions de confort

Le sol permettant une grande surface de chauffage, les conditions de confort thermique sont plus faciles à réaliser. En effet, avec un tel chauffage les gradients de température dans une pièce peuvent être minimisés.

Dans le sens horizontal, il est plus confortable d'avoir une source de chaleur uniformément distribuée que d'avoir une source locale de température élevée et de distribuer la chaleur par convection ou rayonnement (figure 10.a).

Dans le sens vertical, il a été montré que la température idéale au niveau du plancher étant 24 °C et à 19 °C à une hauteur de 1.7 m. Ces conditions sont plus faciles à obtenir à l'aide d'un chauffage par le sol qu'à l'aide de radiateurs ou convecteurs placés sur les parois qui peuvent créer une surchauffe de l'atmosphère près du plafond (figure 10.b). D'autre part, il est plus rentable de produire la chaleur au niveau de température demandé plutôt que d'avoir à la diminuer pour la distribuer. De plus des températures de faible valeur permettent d'avoir des conditions de sécurité accrue.

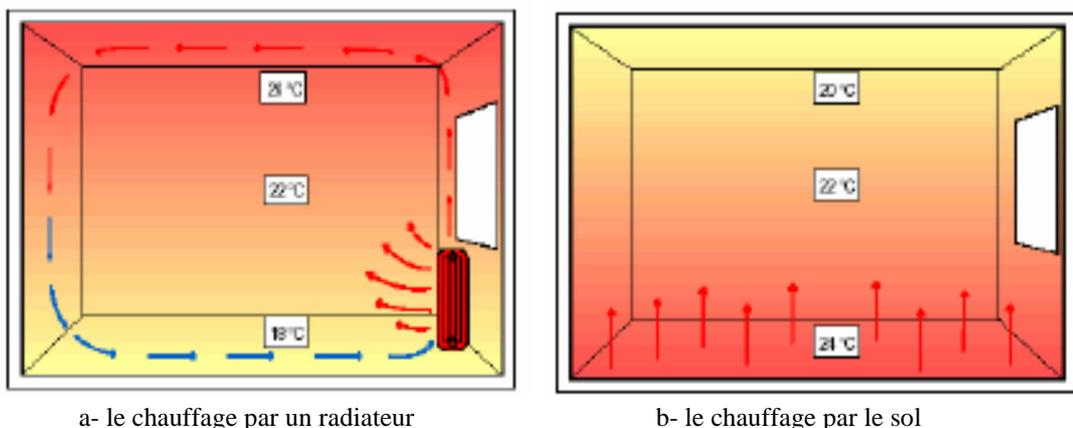


Figure 10 : Distribution de la chaleur dans une pièce en utilisant :

- a- le chauffage par un radiateur conventionnel
- b- le chauffage par le sol

Chapitre III : *Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques*

Les systèmes traditionnels de chauffage par le sol utilisent soit des fluides chauds circulant à l'intérieur de tubes soit des résistances électriques incorporées à la dalle. Ils présentent deux inconvénients : la température au cœur de la dalle doit être de l'ordre de 30° C et pour le chauffage électrique il est difficile de profiter des tarifs « heures creuses » puisqu'une dalle traditionnelle ne permet que de stocker la chaleur sensible. Un système à MCP permet de remédier à ces deux inconvénients puisqu'en choisissant la température de changement on réalise une température de surface idéale (22 à 26 °C) et puisque l'on peut stocker la chaleur latente pendant les heures creuses. Un plancher à MCP aura de plus un caractère autorégulateur puisque si la température de la pièce dépasse la valeur prévue, l'émission de chaleur par le sol diminuera.

III. 2.2.1 Technologies existantes

Une des technologies existante utilise un MCP injecté dans des capsules de formes coniques. Ces capsules sont en polyéthylène haute densité/ PVC thermoformé et sont thermiquement scellées avec une feuille de polyéthylène / PVC/ polyester aluminisée [29]. Ce système permet une manipulation aisée et combine à la fois une bonne conductivité thermique et une grande surface d'échange pour une quantité de MCP donnée (figures 11. (a) et (b)). Des capsules sont fournies sous la forme d'une bande qui est posée directement sur l'isolant, ce dernier peut être omis dans les dalles intérieures. Les tubes ou les câbles passent entre les capsules coniques. Le choix de tubes ou de câbles électriques dépendant de la source d'énergie choisie (chaudière, chauffage solaire, électrique, récupération de chaleur perdu, ...). Ce système semble présenter un certain nombre d'avantages : le coût, la disponibilité, une manipulation et un entretien aisés, la possibilité d'utilisation dans le neuf ou l'ancien.

Le MCP utilisé est un hydrate salin minéral dont la température de changement d'état est de 29 C.

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

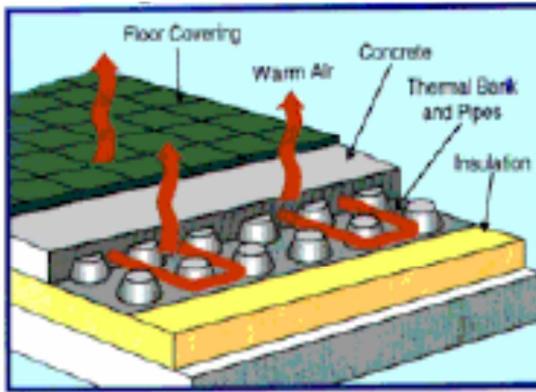


Figure 5. (a)

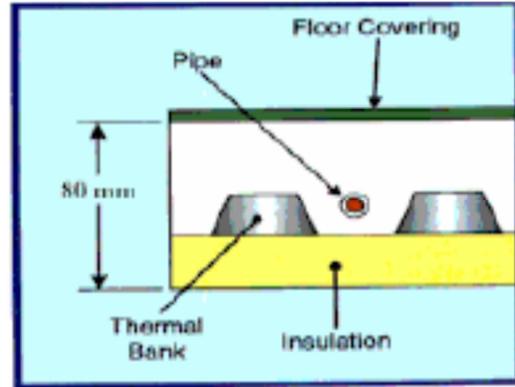


Figure 5. (b)

Figure 11 : Capsules coniques contenant un MCP appliquées au chauffage par le sol.

Un deuxième système utilise des MCP encapsulés se présentant sous la forme de granulats (figure 12). Le MCP utilisé est une paraffine. Le système est conseillé pour le chauffage électrique. Les câbles chauffants sont disposés sur l'isolant et une couche de granulat est disposée par dessus. L'ensemble est recouvert d'une fibre plastique et d'une dalle de béton de faible épaisseur (2 cm) figure (12) .

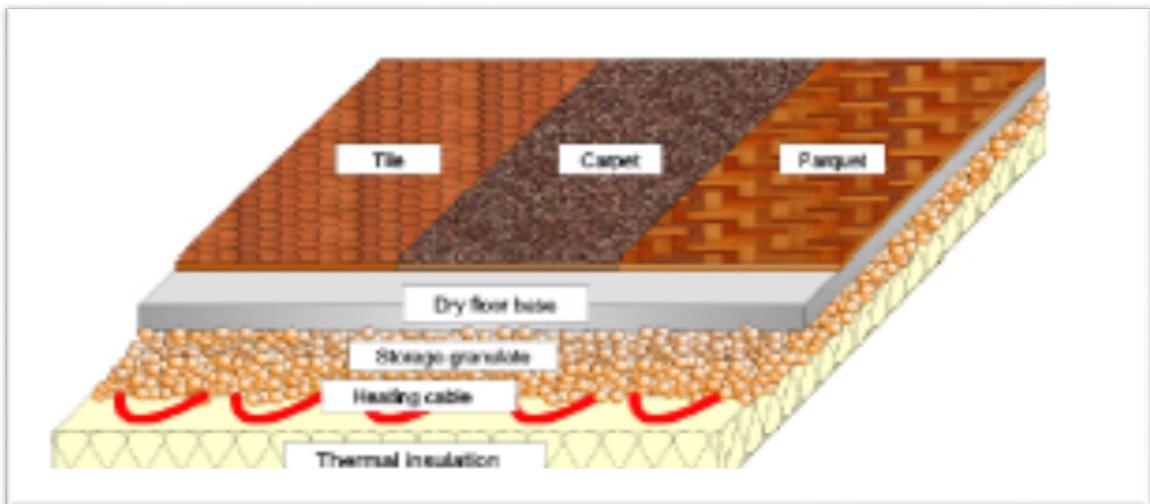


Figure 12 : Chauffage par le sol utilisant les MCP.

III. 2.3. Les MCP dans les parois transparentes et ouvertures

Les travaux sur les fenêtres à base de MCP les connus sont ceux du cabinet architectural GlassX fondé par Dietrich Schwarz. Il a mis au point les fenêtres GlassX. Ces derniers sont composés de quatre éléments au sein d'un seul ensemble fonctionnel : une isolation translucide, une protection contre les surchauffes estivales, un matériau à changement de

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

phase intégré dans des conteneurs hermétiquement scellés en polycarbonate peints en gris pour favoriser l'efficacité de l'absorption. En général, c'est un MCP à base de sel hydraté avec une température de fusion aux alentours de 27 °C qui est utilisé. Cette paroi est scellée par un verre de sécurité trempé de 6 mm qui peut être agrémenté d'une sérigraphie esthétique du côté intérieur (Figure 13.a).

Lorsque l'inclinaison du rayonnement solaire est supérieure à 40 °C (été), il y a un réfléchissement total des rayons solaires (Figure 13.b) sur la fenêtre. Lorsque l'inclinaison du rayonnement solaire est inférieure à 35 °C (hiver), les rayons solaires traversent complètement la fenêtre (Figure 13.c).

La capacité de stockage de l'énergie des fenêtres GlassX est dix fois plus importante que le béton ordinaire (Pascal, 2010).

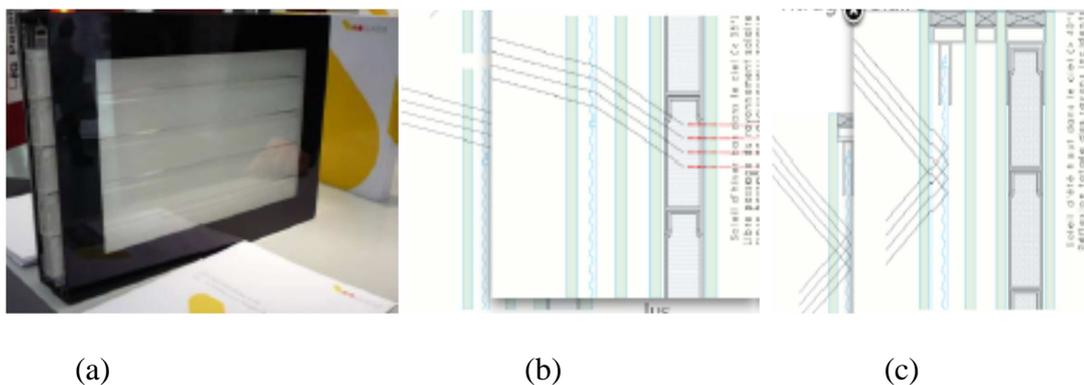


Figure 13 : Fenêtre glassX fabriqué par Dietrich. (a) prototype à l'échelle 1, (b) évolution des rayons solaires estivale (c) évolution des rayons solaires hivernale (d'après Pascal, 2008).

III. 2.4. les MCP dans les rideaux

Les rideaux à base de MCP sont aussi expérimentés pour améliorer le confort résidentiel. Le principe de fonctionnement consiste à laisser les fenêtres ouvertes afin que les rideaux soient exposés aux rayonnements solaires. La fusion des MCP permet de rafraîchir l'intérieur du bâtiment. Au cours du refroidissement nocturne ou par temps nuageux, le rideau libère la chaleur solaire emmagasinée ce qui permet aux MCP de se solidifier et la salle de se réchauffer. Les travaux les plus avancés sont celles de Buddhi et al. (Vinet Veet, 2005) ainsi que Harald Mehling et al. (Atul et al., 2005) :

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

- Buddhi et al. Ont étudié la performance thermique d'une cellule d'essai (1m x 1m x 1m) avec ou sans matériaux à changement de phase. Le MCP utilisé était l'acide laurique (température de fusion de 49°C). Au cours de ces essais, ils ont constaté que la température de l'air dans la cellule augmente jusqu'à 4°C pour 4-5 heures de fonctionnement nocturne ;

- Harald Mehling et al. Ont mis au point un rideau à base de MCP (Figure 14) qui permet de décaler le pic de température diurne de 3 heures et d'abaisser la température du bâtiment de 2°C sur cette période diurne.



Figure 14 : Rideaux à MCP mis au point par Harald Melhing et al (d'après Atul et al.2007)

En raison des propriétés optiques des PCM, ces rideaux sont translucides, ce qui signifie qu'elle brille en présence des rayons solaires. De ce fait, le rideau devient un élément multifonctionnel : il améliore le confort du bâtiment et participe à la décoration intérieure de la maison.

III. 2.5. Les MCP dans le plafond et dans le plancher

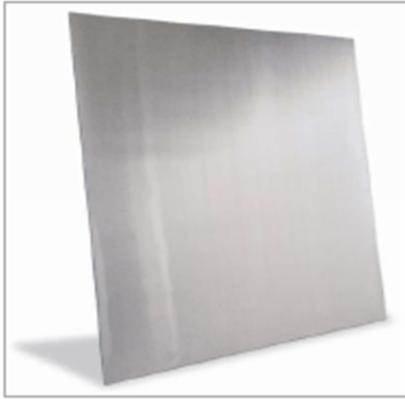
Les produits à base de MCP installés dans les plafonds et les planchers pour améliorer le confort du bâtiment sont en général des panneaux à base de MCP.

Différents fabricants des produits à base de MCP (Solairked, Rubitherm, Cristopia, etc) proposent un panel de panneaux à base de MCP.

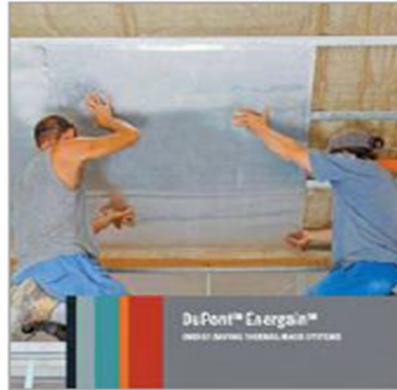
Le panneau le plus connu est le panneau DuPont™ Energain®. Il se présente sous la forme de panneaux avec 2 faces en aluminium dont les extrémités sont recouvertes de ruban adhésif en aluminium (Figure 15.a). Le matériau central est un mélange de copolymère et de cire de paraffine à 60 % qui confère au panneau sa fonctionnalité. Il a une chaleur latente de stockage de 315 kJ/m² et une température de fusion de 22 °C. La

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

dimension des panneaux est de 1000 mm x 1198 mm avec une épaisseur de 5,26 mm. Il pèse environ 5 kg/m². Ces plaques ont la même capacité de stockage de calories qu'un mur de béton de 5 à 7 cm. Ces panneaux peuvent se poser au plafond (Figure 15.b), dans les planchers et aux murs. (Pascal, 2010).



(a)



(b)

Figure 15 : Panneau à base de MCP fabriqué DuPont™ Energain®. (a) le modèle que l'on installe au plafond et (b) un exemple de montage de ce panneau dans un plafond (d'après Gilbert et al, 2007).

D'après l'inventaire des systèmes de rafraîchissement et de réchauffage passifs à base de MCP les plus connus, on constate que les principaux inconvénients de ses systèmes sont :

- Que ce soit en utilisation en terme d'assistance au refroidissement ou d'assistance au chauffage, un système passif rend difficile de corrélérer les besoins aux productions assurés par les systèmes énergétiques ;
- Il y a une difficile accessibilité aux MCP, c'est-à-dire il existe des résistances thermiques de conduction et de convection naturelle (généralement) entre la source de l'énergie à stocker et le MCP stocké. Ces résistances sont un frein au stockage-déstockage de cette énergie.

III. 2.6. Utilisation active des MCP en bâtiment

Les systèmes actifs sont des systèmes où la circulation du fluide dans les composants est actionné par un système mécanique (ventilateur, pompe, etc). Ce caractère actif permet d'utiliser la capacité de stockage et/ou de déstockage d'énergie à la demande, c'est-à-dire de façon non subie.

Les systèmes actifs sont composés en général de trois éléments :

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

- l'échangeur de stockage de l'énergie thermique de chaleur latente : LTHES (Latent Heat Thermale Energy Storage) contenant les MCP. C'est l'élément central du dispositif de stockage ;

- le circuit de circulation du fluide (souvent de l'air parfois de l'eau) caloporteur ;
- un ventilateur ou une pompe qui détermine le débit de fluide dans les LTHES.

Les systèmes actifs de types échangeurs de chaleur permettent d'améliorer le confort des bâtiments en faisant circuler de l'air frais (rafraîchissement) ou de l'air chaud (chauffage) dans les bâtiments en fonction de la demande. Ils fonctionnent de la manière suivante :

Assistance au rafraîchissement des bâtiments

Pendant la journée, on fait circuler l'air "chaud" du bâtiment dans un système actif. Ce dernier contient des MCP solidifiés. Ces derniers soumis à une température supérieure à leur température de fusion vont fondre en absorbant la chaleur de l'air. Ensuite, on réinjecte cet air rafraîchi dans le bâtiment. Pour solidifier le MCP, durant la nuit on fait circuler l'air extérieur au bâtiment "frais" qui a une température inférieure à la température de fusion du MCP.

Assistance au chauffage des bâtiments

Le principe est le même mais le fonctionnement est inverse la journée, on fait circuler l'air "chaud" du bâtiment (ou issu d'un système de chauffage, à source d'énergie solaire ou électrique par exemple) ce qui permet de stocker la chaleur. On réchauffe le bâtiment en faisant circuler l'air "frais" de ce dernier dans ces échangeurs quand c'est nécessaire pendant la nuit (généralement).

Au cours de ses vingt dernières années, différents auteurs ont menés des travaux pour avoir les meilleurs systèmes actifs de type d'échangeur de chaleur Air-MCP. Parmi ses travaux, il ressort deux familles dont les travaux ont bien avancés. Il s'agit des systèmes d'échangeurs à Air-MCP avec des MCP en « plaques » et ceux contenant des MCP disposés en « amas ».

III. 2.6.1 Les systèmes d'échangeurs Air-MCP à plaques de Zalba et al

Le système d'échangeur actif mis au point par Zalba et al. (2004) est un circuit d'air fermé (Figure 16.a) constitué d'un ventilateur (1) pour faire circuler l'air dans le dispositif expérimental, d'un dispositif qui permet de chauffer et de refroidir de l'air à la température

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

désirée (2), d'un débitmètre pour mesurer les débits d'air (3) et d'un système de stockage d'énergie thermique (4). Ce dernier est une vésicule d'encapsulation de forme rectangulaire (Figure 16.b).

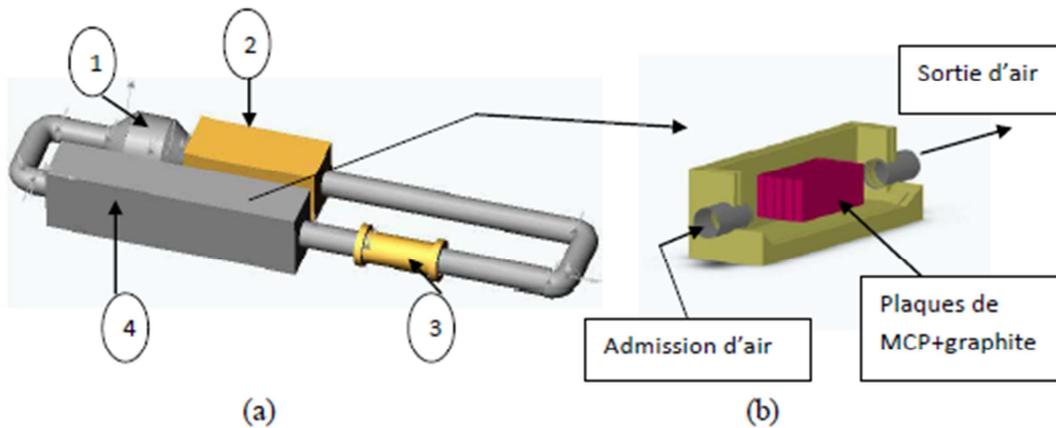


Figure 16 : Système actif mis au point par Zalba et al. (a) dispositif expérimental (b) détail du système de stockage d'énergie. (1) ventilateur, (2) dispositif de variation de vitesses, (3) débitmètre, (4) système de stockage d'énergie.

La vésicule d'encapsulation est en méthacrylate pour faciliter la visualisation du changement de phase des MCP lors de la fusion ou de la régénération des MCP. Les MCP sont en général des plaques rectangulaires. L'air circule entre les plaques.

Deux MCP ont été sélectionnés :

- un alliage moléculaire avec 34% C16 et 66% C18, de masse volumique de 14,05 kg/m³ et d'une chaleur latente de 152 kJ/kg. Leur plage de fusion est comprise entre 19,5 °C et 22,2 °C ;
- une paraffine de type RT25 de Rubitherm, de masse volumique de 76 kg/m³, d'une chaleur latente de 232 kJ/kg et d'une plage de fusion comprise entre 20 °C et 24 °C ;

Ces deux produits sont mélangés au graphite pour former des plaques de MCP+graphite. Elles sont installées en parallèle, de plus :

- le transfert de chaleur entre l'air et les plaques MCP-graphite peut être contrôlé, en ajustant la vitesse d'air et en fonction de l'épaisseur de la vésicule contenant ces plaques,
- le ratio aire d'échangeur/volume du contenant des MCP est comprise entre 100 et 150 m²/m³.

* L'étude économique menée par Zalba et al. ont démontré que le matériau PCM lui-même représentait 17% du coût total du système.

III. 3. Présentation de quelque cas concrets de bâtiments comportant dans leurs enveloppes sous différentes formes des matériaux à changement de phase

Dans un premier temps, les matériaux à changement de phase (MCP), dits aussi matériaux intelligents, sont apparus sur le marché de la construction pour réduire les besoins en climatisation durant les périodes estivales. Incorporés à l'intérieur des bâtiments, dans des produits à base de polymères, de plâtre, ou de béton, les MCP sont capables d'améliorer les performances énergétiques de l'enveloppe tout en augmentant l'inertie thermique. D'autre part, complémentaires d'une isolation, ils sont une réponse au durcissement de la réglementation thermique et à la prise en compte de la notion de confort d'été et de confort d'hiver.

Les premiers panneaux de construction de bâtiment contenant les matériaux à changement de phase sont réalisés au Mexique par Wright et Balcomb [2]. Ils fabriquent des maisons « passives » avec des systèmes dits à gains directs (matériaux de construction intégrant des paraffines dans les bétons) dans les années 1970. Dans la même année, en France, est réalisé le premier panneau plâtre à base de paraffine pour améliorer l'inertie des parois minces. Cependant l'inflammabilité et le suintement de cette paraffine sur ces deux matériaux ralentit le développement de l'intégration des MCP dans le secteur du bâtiment.

La mise en place de la technique de « micro-encapsulation » qui élimine ces deux problèmes relance le regain de ces matériaux pour le bâtiment à partir des années 2000.

III. 3. 1. « Nomiya », restaurant transparent sur le toit du Palais de Tokyo, s'habille de matériaux à changement de phase

Le toit du Palais de Tokyo, à Paris, accueille depuis le 1er juillet 2009 «Nomiya», un dispositif qui joue sur la transparence et la porosité des matériaux utilisés pour créer un point de vue différent sur la ville. Cette architecture en verre transparent, qui permet une vue à 360° sur Paris, utilise Energain® de Dupont.

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques



Figure 17 : Dupont - Nomiya sur le toit du Palais de Tokyo à Paris

Pour remédier au manque d'inertie thermique et au contrôle de la température d'une telle structure, le matériau à changement de phase Energain de DuPont a été retenu, véritable révolution dans l'enveloppe du bâtiment. Ce choix s'est effectué dans le cadre d'une approche globale (exposition, orientation, etc.).

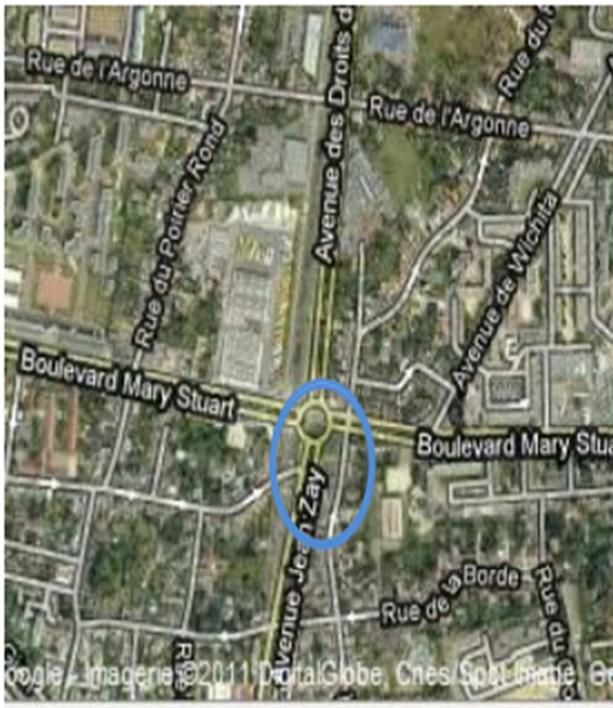
Panneau à inertie thermique qui offre de précieuses propriétés en termes d'économies d'énergie et de contrôle de la température des bâtiments à structures légères (ossatures bois, acier et aluminium) ou avec une isolation par l'intérieur, Energain® a été placé à l'intérieur du faux-plafond, ce qui permet d'augmenter l'inertie thermique du bâtiment sans avoir recours à du béton et sans renforcement de la structure ; celle-ci en aurait été alourdie et des problèmes ultérieurs de transport se seraient posés.

Energain permet de réduire les pics de températures de façon significative (jusqu'à 7 °C de réduction), donc d'améliorer le confort en réduisant les besoins de rafraîchissement et de chauffage se présente sous la forme de panneaux aluminium contenant un composé solide de copolymère et de paraffine. Les panneaux absorbent et libèrent la chaleur en fonction des variations de température qui font réagir le composé en provoquant un « changement de phase ». Energain peut stocker environ 20 fois plus d'énergie que le béton avec une masse bien plus réduite. Enfin, il diminue aussi les coûts énergétiques : jusqu'à 35 % en ce qui concerne la climatisation et 15 % pour le chauffage, notamment durant la nuit et les mi-saisons.

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

III. 3. 2. Le bâtiment du conseil général du Loiret

Le bâtiment « Le Loiret » se situe ZAC du champ St Marc à Orléans. Il sera le premier bâtiment administratif certifié Haute Qualité Environnementale (HQE) et labellisé bâtiment basse consommation (BBC-Effinergie).



Le maître d'ouvrage est le Conseil Général du Loiret.

Les intervenants de la maîtrise d'œuvre sont :

-Architecte : a5a

-Economiste : Loizillon

Ingenierie

-B.E.T. Fluides : E.T.B.

Antonelli

-BET Structure : AUA Structures

- BET HQE : Trans-Faire

- BET Acoustique : Inso Nor

La surface du bâtiment est de 4700 m² en Surface Hors Œuvre Nette (SHON).

Figure 18 : la situation du bâtiment « Le Loiret »

La surface du bâtiment est de 4700 m² en Surface Hors Œuvre Nette (SHON).

De forme arrondie au nord, avec une pointe au sud et des bureaux orientés plein sud, sa forme contemporaine illustre bien les formes des nouveaux bâtiments basse consommation. Ce bâtiment est livré au mois de mai 2011.



Figure 19 : les différentes façades du bâtiment « Le Loiret »

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

III. 3. 2. 1 Les innovations techniques

Grâce à des procédés innovants et inédits, comme les cloisons à changement de phase en Energain®. Il sera le premier bâtiment public à répondre à des critères aussi élevés en matière d'économie d'énergie. Pour avoir une consommation de 71 kWh/m²/an, c'est-à-dire qu'il consomme deux fois moins qu'un bâtiment de même taille qui répond aux normes de la RT 2005.

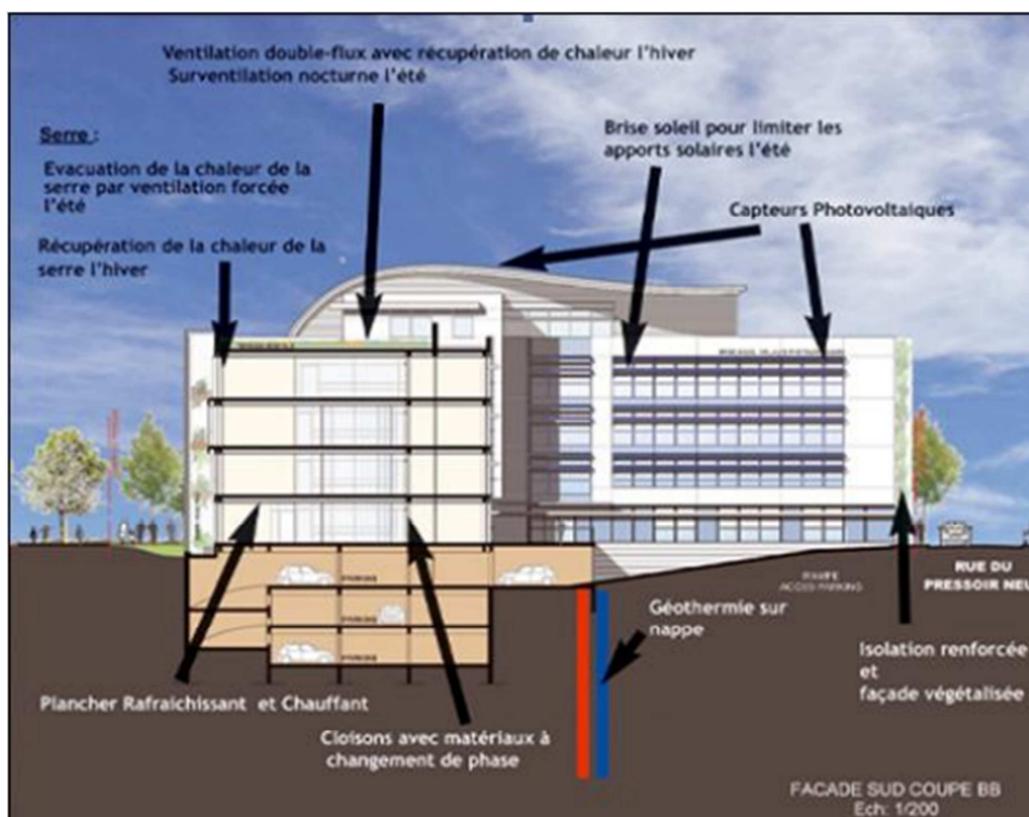


Figure 20 : procédés innovants utilisés dans le projet « Le Loiret »

III. 3. 2. 1.A L'utilisation des MCP

Dans le cadre des dispositions HQE, pour contribuer à une meilleure gestion de la température intérieure des locaux visant à optimiser l'énergie, il est prévu dans la conception d'une partie des cloisons de distribution intérieure, l'emploi de matériaux intégrant des produits à changement de phase.

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

Bureaux orientés Sud (1er, 2ème, 3ème et 4ème étage):



Figure 21 : plan de l'implantation des MCP dans les bureaux (1er, 2ème, 3ème et 4ème étage).

Le MCP est situé généralement sur une face de cloison dans les bureaux situés au sud, et au pourtour de la pièce pour la salle de réunion du 4eme étage.

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques



Figure 22 : plan de l'implantation des MCP dans les salles de réunions (2ème, 3ème étage)

Suivant les pièces le MCP est situé soit sur deux faces, soit tout autour de la pièce.

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques



Figure 23: plan de l'implantation des MCP dans les open space (plafond)

Le MCP est disposé sur une face de la pièce et partiellement au plafond (sous les plaques de plâtre)

III.3.2.1.B Caractéristiques dimensionnelles et chimiques de l'Energain® (Le produit utilisé dans le projet)

Le matériau Energain® est breveté par DuPont de Nemours. Ce produit n'est qu'un complément d'isolation pour contrôler la température et les gains thermiques à l'intérieur de la construction. L'Energain® est un produit qui se présente sous la forme d'un panneau.

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

Le panneau est constitué de deux feuilles d'aluminium de 130 μm d'épaisseur renfermant un MCP (Matériau à Changement de Phase) qui est un mélange de polymère à base d'éthylène d'une teneur de 40% et de cire paraffine (élément dérivé du pétrole et utilisé dans les bougies) de teneur 60%. Les bords du panneau sont rendus étanches grâce à un ruban adhésif en aluminium de 75 μm d'épaisseur.



Figure 24 : Panneau Energain®.

Les feuilles d'aluminium jouent trois rôles distincts : protection anti-feu, rigidification du panneau pour faciliter la pose et protection contre la migration de la cire. Le procédé d'extraction de la paraffine est très consommateur en énergie.

Le principe de fonctionnement de l'Energain® est le suivant :

Si la température intérieure de l'habitation ou du local est inférieure à 18°C, la cire de paraffine conserve son état solide ; si la température dépasse les 22°C, le changement de phase commence et la cire fond en absorbant les calories énergétiques de la température ambiante de la pièce. Dans le cas où la température redescend en dessous de 18°C, un nouveau changement d'état survient et la cire de paraffine se solidifie, restituant ainsi la chaleur à son environnement.

III.3. 3. Présentation du projet universitaire concernant le bâtiment 3E ENERGIE, ECOLOGIE, ECONOMIE

III.3.3.A Présentation générale du projet (Le complexe TECHNOPOLIS)

La construction du bâtiment 3E s'inscrit dans le projet de création du complexe TECHNOPOLIS (voir figure 25) de l'Université Polytechnique de Wroclaw. Ce complexe

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

fait partie de la création d'un pôle de recherche et d'éducation de la Faculté du génie de l'environnement, et se composera des trois bâtiments suivants :

- Un bâtiment d'éducation et de recherche pour le Département de l'environnement (dit en abrégé 3E – Energie Ecologie Economie).
- Un bâtiment réceptionnant un étage pour le Laboratoire de recherche en Toxicologie et un autre étage pour le Laboratoire des Matériaux Polymères avancés et de recyclage (dit en abrégé TOXY).
- Un bâtiment hébergeant le Laboratoire d'isolement financier (dit en abrégé IZO-LAB) ainsi que le pôle de veilles technologiques nommé « Arrière-cour de technologie durable ».

Le souhait de ce projet est de créer un ensemble cohérent qui associe de la meilleure façon architecture, urbanisme et développement durable.

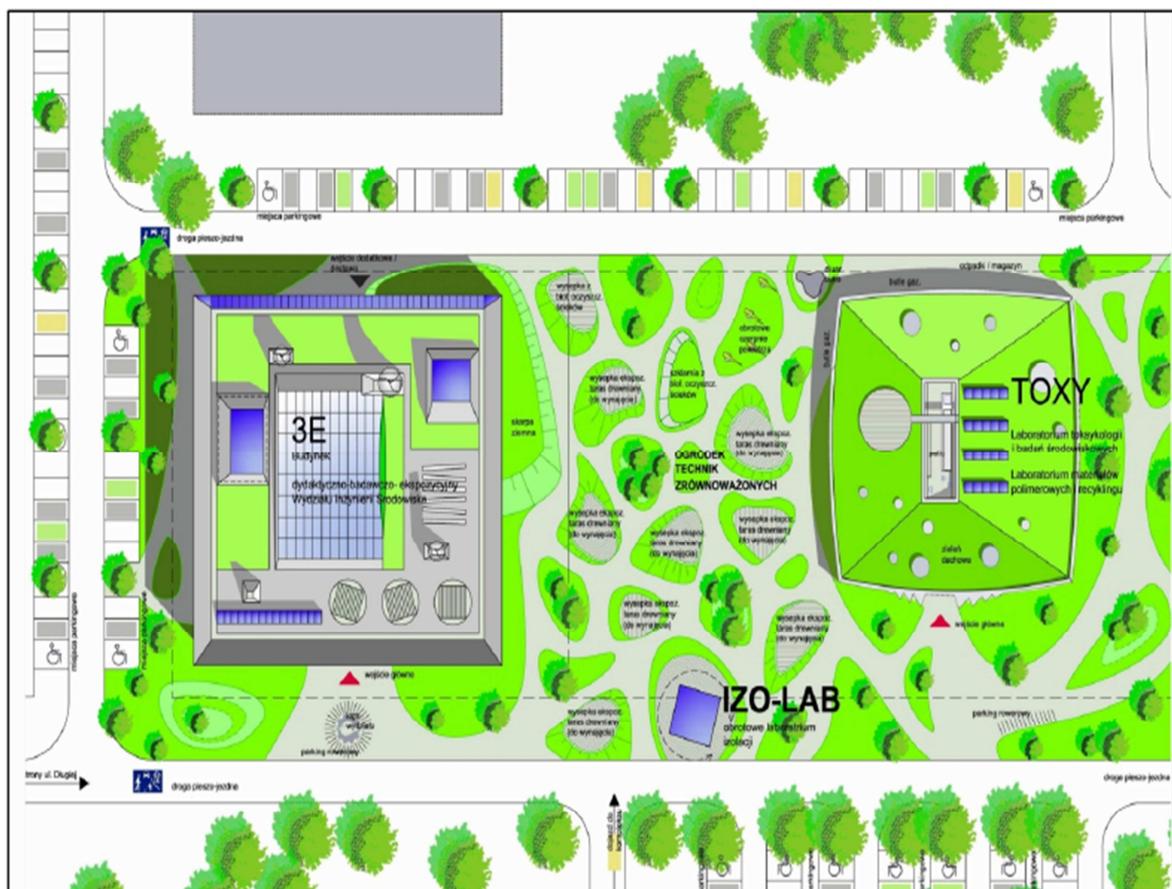


Figure 25 : Plan d'ensemble du complexe TECHNOPSIS

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

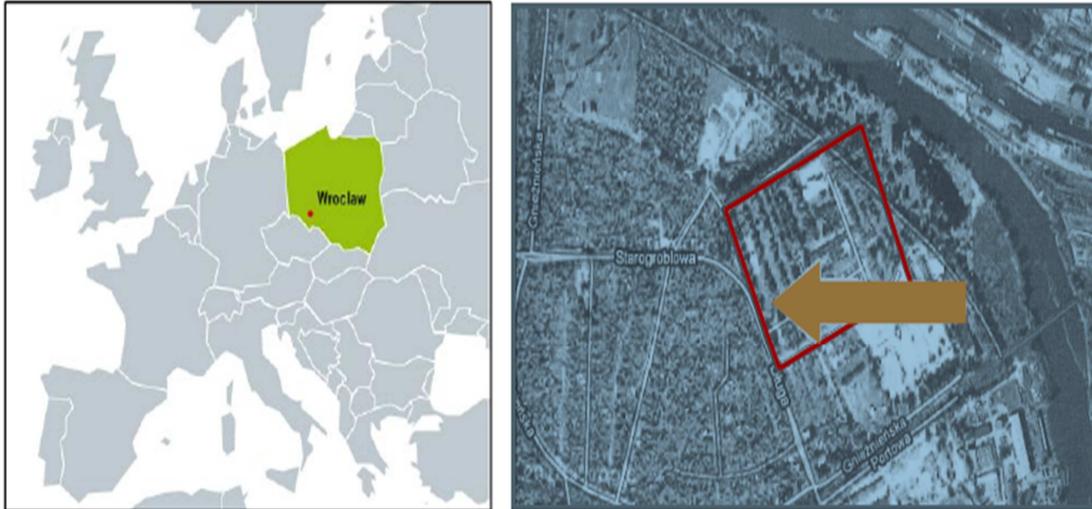


Figure 26 : Situation géographique de Wrocław et localisation du complexe TECHNOPSIS

III.3.3.B Site

L'implantation du complexe (voir figure 26) est prévu dans l'espace libre situé sur la rue Długiej à Wrocław, en Pologne, et qui s'avère être une propriété de l'Université Polytechnique de Wrocław, située 27 rue Wybrzeze Wyspianskiego.

Le complexe TECHNOPSIS couvrira une surface de 7500 m² et sera distribué de la manière suivante :

- Bâtiment 3E : 2000 m²,
- Bâtiment TOXY : 1200 m²,
- Bâtiment IZO-LAB : 3000 m²,
- Espaces verts et de communication, parking, etc. : 1300 m².

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques



Figure 27 : Différentes vues du bâtiment 3E, © Piotr Kuczia.

III.3.3.C Le bâtiment 3E – ENERGIE ECOLOGIE ECONOMIE

Présentation

Au sein du campus de l'Université Polytechnique de Wrocław, le futur bâtiment 3E (voir figure 27 ci-contre) a été conçu pour être un bâtiment innovant et précurseur d'une importante tendance environnementale. Ce sera, en effet, le premier bâtiment public en Pologne qui répondra à des critères essentiels en matière d'économie d'énergie.

Chapitre III : *Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques*

Pour réaliser au mieux cet ambitieux projet, une équipe interdisciplinaire a été mise en place et se compose notamment du célèbre architecte polonais, M. Piotr Kuczia, et d'environ 30 chercheurs travaillant dans le domaine climatique et énergétique du département ingénierie de la Faculté du génie de l'environnement de l'Université Polytechnique de Wroclaw, sous la direction du professeur Jan Danielewicz.

En 2010, le bâtiment 3E gagna en Pologne le 1er prix du GREEN BUILDING COUNCIL pour la meilleure conception écologique et une certaine distinction pour le meilleur espace intérieur écologique.

III.3. 3. 1 Des installations innovantes

Le bâtiment 3E a pour vocation d'être une vitrine des nouvelles technologies dans le Domaine de l'écologie et de l'efficacité énergétique. Le fonctionnement des installations sera évolutif en fonction des saisons et des ressources disponibles. (Voir figure 28.29.30) .

- Utilisation active et passive de l'énergie solaire avec des collecteurs solaires et des panneaux photovoltaïques sur les façades Est et Ouest.
- Climatisation solaire à l'aide du système SDEC (Solaire –Dessiccation – Evaporation –Climatisation).
- Mise en place de puits canadiens.
- Système de ventilation naturelle appliqué aux 1er et 2eme étage : des cheminées solaires seront installées sur le toit et seront équipées de turbines pour optimiser l'évacuation de l'air vers l'extérieur.
- Des prises d'air tournantes dont la position de leurs entrées s'établit en fonction de celles des éoliennes.
- Construction du bâtiment basé sur des murs accumulateurs de chaleur : utilisation de grosses épaisseurs de béton cellulaire.
- Intégration des Matériaux à Changement de Phase (MCP) en tant que matériaux de construction dans des pièces sélectionnées du bâtiment
- Eclairage intérieur artificiel basé sur les technologies LED et OLED.
- Les façades Est, Ouest et Sud seront équipées de longues baies vitrées sur les 1ers et 2nd étages, avec un espace atrium transparent au centre du bâtiment pour assurer la propagation des rayons lumineux solaires.
- Systèmes de récupération des eaux grises , eaux usées et des eaux pluviales..

III.3.3.1.A Gestion de l'eau

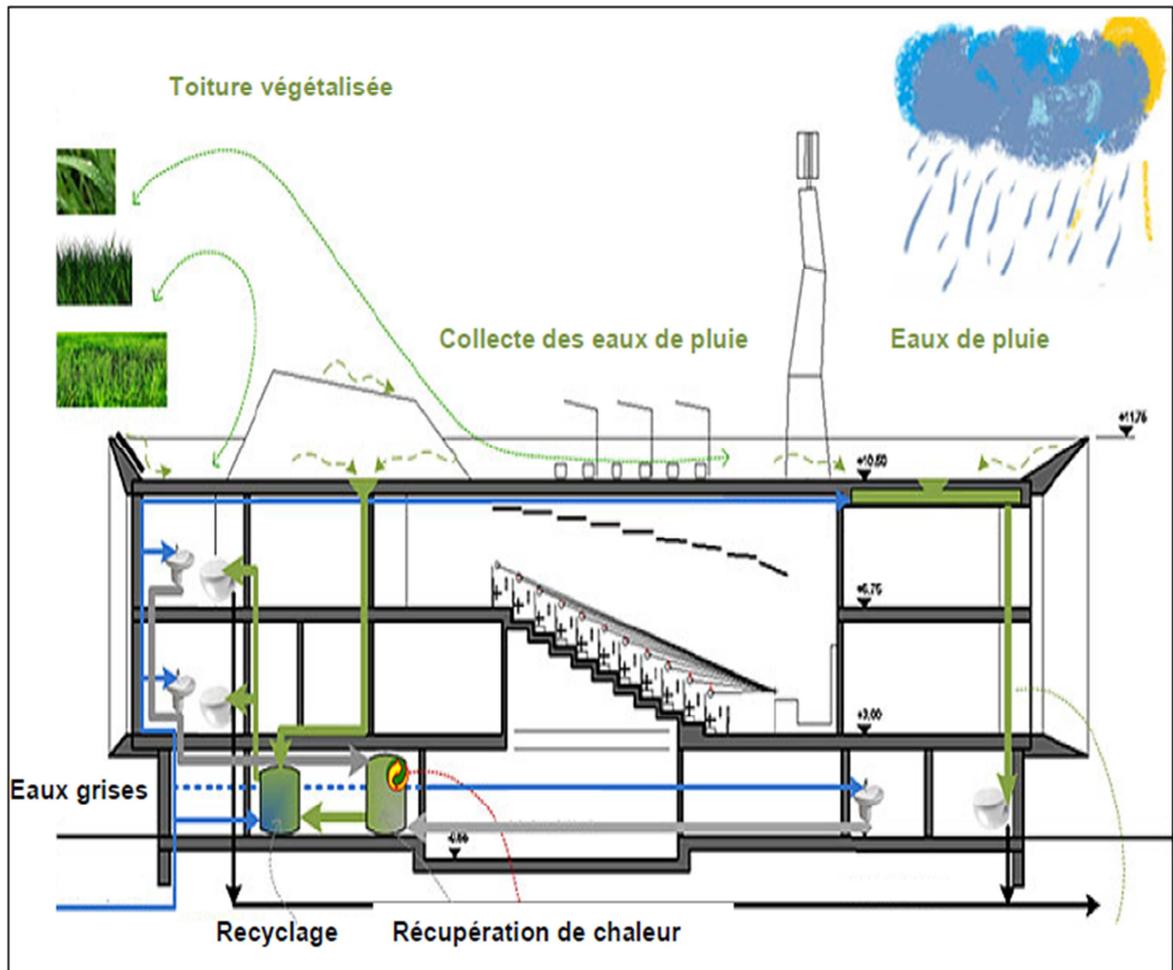


Figure 28 : Schéma représentatif des technologies mises en place pour la gestion de l'eau

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

III.3.3.1.B Confort d'été

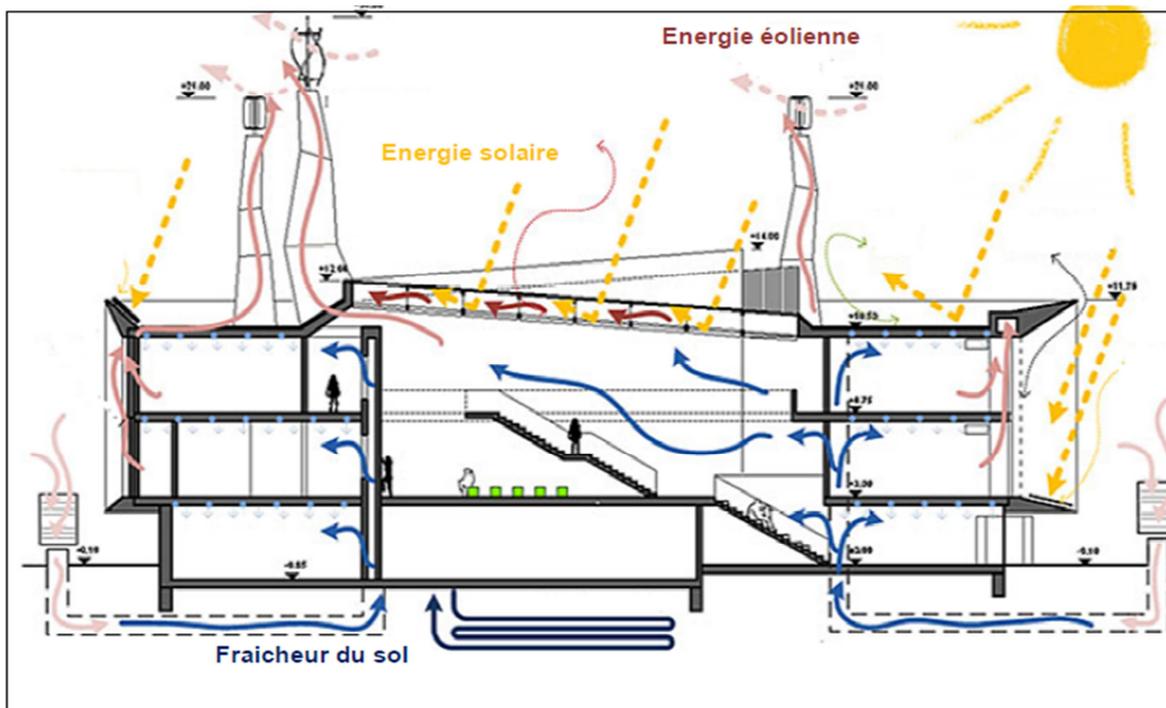


Figure 29 : Schéma représentatif des technologies mises en place pour le confort d'été.

III.3.3.1.C Confort d'hiver

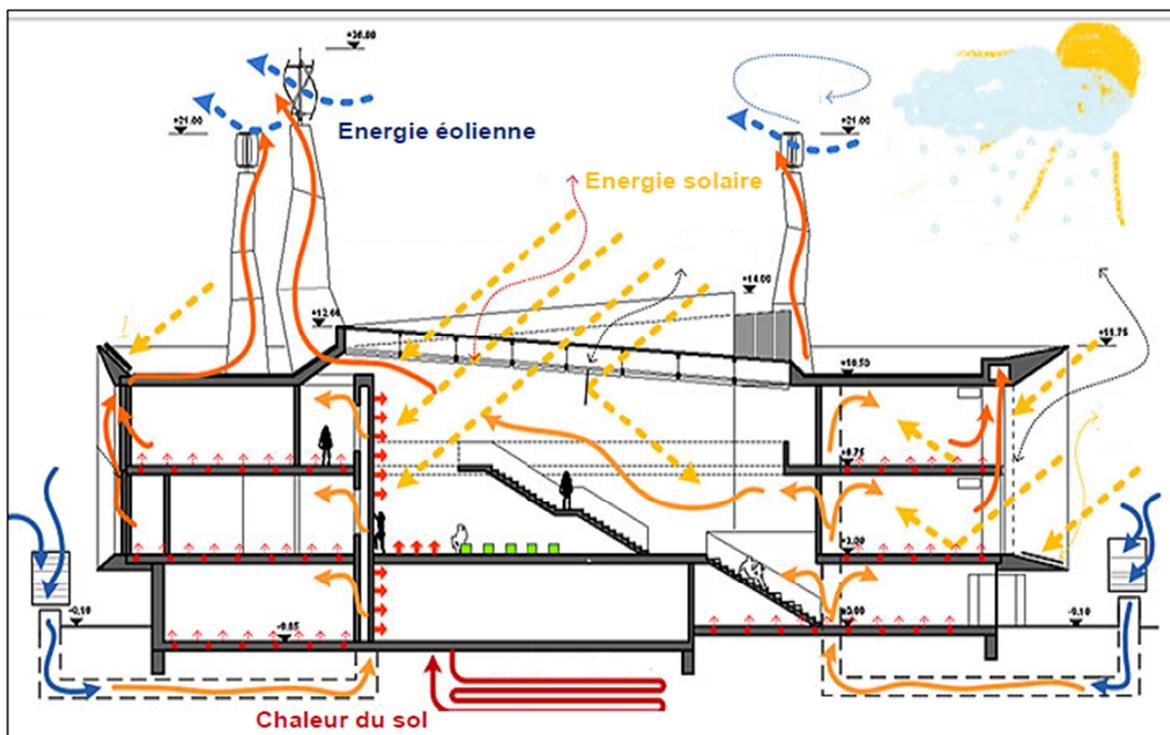


Figure 30 : Schéma représentatif des technologies mises en place pour le confort d'hiver.

Chapitre III : Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques

III.3.3.1.D Utilisation du MCP Energain®

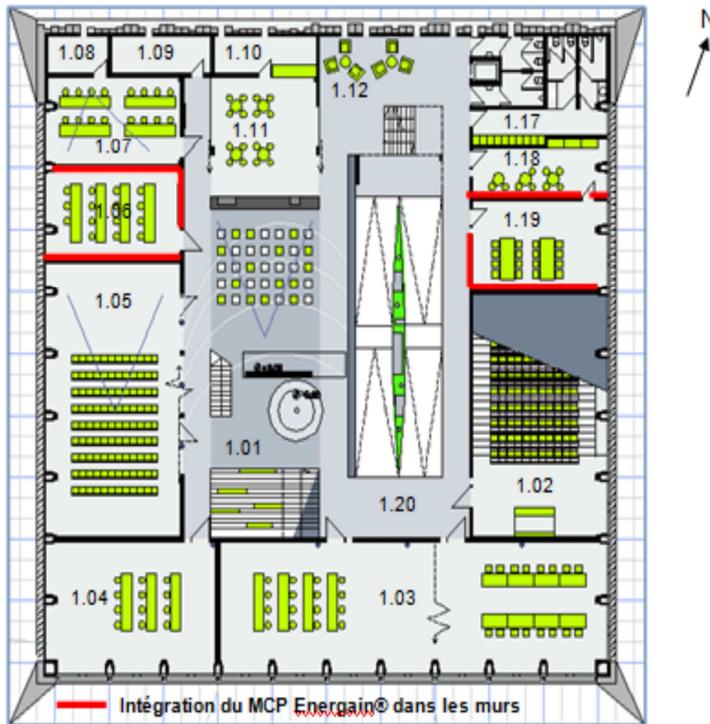


Figure 31 : Plan d'implantation des MCP dans le 1er étage du bâtiment 3E.



Figure 32 : Plan d'implantation des MCP dans le 2eme étage du bâtiment 3E.

III.3.3.1.E Caractéristiques dimensionnelles et chimiques de l'Energain® (Le produit utilise dans le projet)

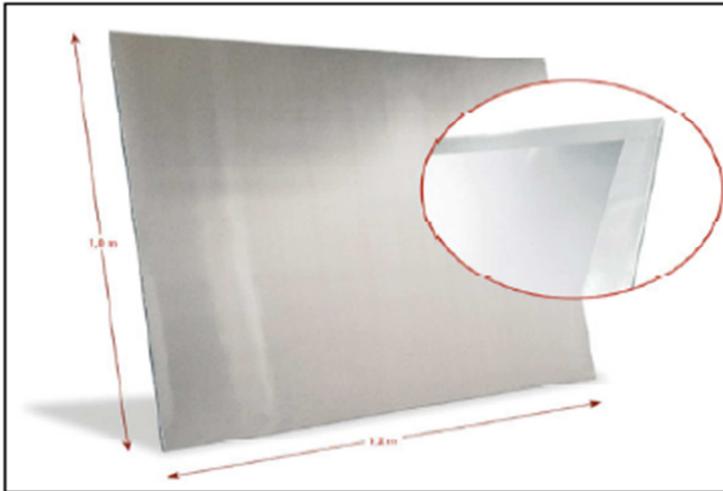


Figure 33 : Panneau Energain®.

L'Energain® est un produit qui se présente sous la forme d'un panneau (voir figure 33) Constitué de deux feuilles d'aluminium de 130 µm d'épaisseur renfermant un composé solide de copolymère (éthylène, 40%) et de paraffine (60%).

Son principe de fonctionnement est le suivant :

- Si la température intérieure de la pièce, dans laquelle a été incorporé le matériau, est inférieure à 20°C, la cire de paraffine conserve son état solide ;
- Lorsque la température dépasse 21,7°C, le changement de phase commence et la cire fond en absorbant un maximum de calories énergétiques de la température ambiante de la pièce (rayonnement solaire et/ou gains internes) et en les stockant dans le panneau.
- Dans le cas où la température redescend en dessous de 20°C, un nouveau changement d'état survient et la cire de paraffine se solidifie, restituant ainsi la chaleur à l'intérieur de la pièce.

Dès sa création, le bâtiment 3E a été étudié pour posséder un important potentiel d'accumulation de chaleur. En effet, les murs intérieurs se composent de 200 mm ou 300 mm de béton cellulaire selon leurs emplacements. De plus, 5 mm d'Energain® est l'équivalent de 30 mm de béton cellulaire, ce qui explique pourquoi l'influence de l'intégration des MCP dans le bâtiment 3E n'est pas impressionnante.

Chapitre III : *Etat de la recherche scientifique des MCP et présentation de quelques cas pratiques*

Néanmoins, l'enjeu du bâtiment 3E est de réduire les demandes d'énergie autant que possible, de telle manière que la réduction de 1% des besoins en chauffage et en climatisation, ainsi que l'atténuation de 3% du taux d'inconfort en période estivale, sont suffisants pour justifier l'usage des MCP dans les pièces sélectionnées.

CONCLUSION

Aujourd'hui, beaucoup de réglementations thermiques apparaissent, ayant pour but d'améliorer le confort intérieur tout en conciliant les économies d'énergie et le respect de l'environnement. Il faudrait utiliser un matériau innovant qui a comme caractéristiques de réduire les consommations de chauffage l'hiver et de réduire les apports de chaleur l'été.

Les matériaux à changement de phase (MCP) possèdent ces fonctionnalités. Ils permettent de réguler la température de la pièce et de diminuer le taux d'inconfort en apportant de l'inertie thermique.

Ils améliorent le confort d'été en limitant les surchauffes et diminuent les consommations d'énergie liées au chauffage en hiver. Ces matériaux permettent de créer une différence de température d'environ 5°C lorsqu'ils sont utilisés, grâce à sa composition.

Les matériaux à changement de phase font nettement baisser le taux d'inconfort l'été, mais ne l'abaisse pas à un niveau acceptable. Il faut alors le combiner à d'autres solutions techniques.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La réalité du dérèglement climatique, de la raréfaction des ressources disponibles et de l'augmentation du coût de l'énergie doivent modifier l'approche que nous avons sur notre environnement et notre manière d'envisager la construction et les équipements des prochains bâtiments.

Face à ces problématiques, les travaux de notre mémoire consistent à effectuer des recherches sur les apports des matériaux nouveaux dans le confort thermique des bâtiments particulièrement le cas des matériaux changement de phase (MCP).

Les MCP de par leur particularité à pouvoir stocker et relâcher une quantité importante de chaleur, sont une solution intéressante aux problèmes de confort d'été et d'hiver tout en permettant des réductions de consommations de chauffage et de climatisation donc les consommations énergétiques.

Les diverses formes d'applications des MCP dans le bâtiment contribuent à l'esthétique architecturale des bâtiments et la durabilité et la solidité de ces derniers grâce à la légèreté et la flexibilité des MCP.

Nous espérons que les objectifs fixés au début de ce travail soient atteints il s'agit de la diffusion et la vulgarisation de l'intégration des matériaux à changement de phase (MCP) dans le secteur du bâtiment ici en Algérie vu les qualités énergétique, économique, écologique et architecturale que présentent ces matériaux à changement de phase (MCP).

LISTE DES TABLEAUX ET DES FIGURES

Listes des figures et tableaux

Chapitre I.

Figure 1 : Schéma du développement durable	6
Figure 2 : principes de conception bioclimatique.....	9
Source : note de cour UMMTO.	
Figure 03 : conception bioclimatique	10
Figure 4 : Echanges thermique entre l’homme et son environnement.....	16
Source : Alain Liébard et André De Herde, 2003.	

Chapitre II.

Tableau 01 :Coefficient d’absorption pour différents matériaux et différentes couleurs.	
Source : ALAIN LIEBARD & ANDRE E HERDE, 2003.....	20
Figure 01 : Réaction d’un local à forte inertie et d’un local à Faible inertie à des apports solaires. Source : Liébard A., De Herde A., 2005.....	21
Figure02 : Répartition moyenne des déperditions Dans une maison individuelle neuve.	
Source : Liébard A., De Herde A., 2005.....	22
Figure 03 : les techniques d’isolation avantages et inconvénients.....	24
Figure 04 : Principe de fonctionnement des matériaux à changements de phase.....	27
Figure 05 : Microbille contenant le MCP.....	28
Figure 06 : Classification des matériaux à changement de phase.....	31
Tableau 02 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques paraffines	31
Tableau 03 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques non- paraffines	32
Tableau 04 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques acides gras.....	33
Tableau 05 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques sels hydratés	34
Tableau 06 : Température de changement de phase et chaleur latente de fusion de quelques métallique	35
Tableau 07.a : Avantages des différentes catégories de MCP	35
Tableau 07.b : inconvénients des différentes catégories de MCP	36

Listes des figures et tableaux

Chapitre III.

Figure 01 : Photo de la cabine de dimensions 2.4 m × 2.4 m × 2.4 m [Cabeza et al., 2007].....	41
Figure 03 : Briques perforées	42
Figure 04 : Briques alvéolaires.....	42
Figure 05 : Les différentes cabines des expérimentations [Castell et al., 2010].....	42
Tableau 01 : Compositions des différentes couches des parois des cinq cabines [Castell et al., 2010]	43
Tableau 02 : Propriétés thermo physiques des MCP.....	43
Figure 06 : Toiture avec MCP.....	46
Figure 07 : Salle de classe [Limited, n.d.b]	47
Figure 8 : Configuration d'un modèle de mur trombe MCP (d'après Atul et al.2007).....	49
Figure 9 : Evolution des températures dans les cellules jumelées contenant de l'enduit avec et sans MCP au cours d'une journée d'été ensoleillée dans le cadre du projet RETERMAT (d'après Venstermans, 2010)	50
Figure 10 : Distribution de la chaleur dans une pièce en utilisant :	51
a- le chauffage par un radiateur conventionnel	
b- le chauffage par le sol	
Figure 11 : Capsules coniques contenant un MCP appliquées au chauffage par le sol.....	53
Figure 12 : Chauffage par le sol utilisant les MCP.....	53
Figure 13 : Fenêtre glassX fabriqué par Dietrich. (a) prototype à l'échelle 1, (b) évolution des rayons solaires estivale (c) évolution des rayons solaires hivernale (d'après Pascal, 2008).....	54
Figure 14 : Rideaux à MCP mis au point par Harald Melhing et al (d'après Atul et al. 2007)	55
Figure 15 : Panneau à base de MCP fabriqué DuPont™ Energain®. (a) le modèle que l'on installe au plafond et (b) un exemple de montage de ce panneau dans un plafond (d'après Gilbert et al, 2007).....	56
Figure 16 : Système actif mis au point par Zalba et al. (a) dispositif expérimental (b) détail du système de stockage d'énergie. (1) ventilateur, (2) dispositif de variation de vitesses, (3) débitmètre, (4) système de stockage d'énergie.....	58
Figure 17 : Dupont - Nomiya sur le toit du Palais de Tokyo à Paris	60

Listes des figures et tableaux

Figure 18 : la situation du bâtiment « Le Loiret »	61
Figure 19 : les différentes façades du bâtiment « Le Loiret »	61
Figure 20 : procédés innovants utilisées dans le projet « Le Loiret ».....	62
Figure 21 : plan de l’implantation des MCP dans les bureaux (1er, 2ème, 3ème et 4ème étage).....	63
Figure 22 : plan de l’implantation des MCP dans les salles de réunions (2ème, 3ème étage).....	64
Figure 23 : plan de l’implantation des MCP dans les open space (plafond)	65
Figure 24 : Panneau Energain®.....	66
Figure 25 : Plan d’ensemble du complexe TECHNOPOLIS	67
Figure 26 : Situation géographique de Wroclaw et localisation du complexe TECHNOPOLIS	68
Figure 27 : Différentes vues du bâtiment 3E, © Piotr Kuczia.....	69
Figure 28 : Schéma représentatif des technologies mises en place pour la gestion de l’eau.....	71
Figure 29 : Schéma représentatif des technologies mises en place pour le confort d’été..	72
Figure 30 : Schéma représentatif des technologies mises en place pour le confort d’hiver.....	72
Figure 31 : Plan d’implantation des MCP dans le 1er étage du bâtiment 3E.....	73
Figure 32 : Plan d’implantation des MCP dans le 2nd étage du bâtiment 3E.....	73
Figure 33 : Panneau Energain®.....	74

**LISTE
BIBLIOGRAPHIQUES**

Références bibliographiques

Chapitre I.

- ✚ 1 .Dominique Gauzin-Muller : Une nouvelle approche de l'acte de bâtir, l'architecture éco-responsable, In panoramas p 231.
- ✚ 2. L'efficacité énergétique dans le secteur résidentiel - une analyse des politiques des pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée. Carole-Anne Sénit (Sciences Po, Iddri) 2007.
- ✚ 3. Comment consommer mieux avec moins -Livre vert sur l'efficacité énergétique - Office des publications officielles des Communautés européennes, 2005
- ✚ 4.B. GIVONI : L'homme, L'architecture Et Le Climat- édition : le Moniteur Paris, 1978. pp.71-72
- ✚ 5. BOUCHA HM. Y –Une Investigation Sur La Performance Thermique Du Capteur A Vent Pour Un Rafraîchissement Passif Dans Les Régions Chaudes Et Arides- cas de Ouargla. Thèse de doctorat d'état, université de Constantine, 2004.page.21
- ✚ 6.Ministère de L'habitat – RECOMMANDATIONS ARCHITECTURALES – ENAG/édition, Alger 1993 p.17.18.et20.
- ✚ 7. NEUF ; 1978/ « climat intérieur/ confort, Santé, confort visuel » revue européenne d'architecture N° 77, novembre - décembre 1978. p. 12
- ✚ 8. MINISTERE DE L'HABITA. ENAG - Recommandations Architecturales édition Alger, 1993 page.18 26 - GIVONI .B - L'homme, L'architecture Et Le Climat- édition : le Moniteur Paris, 1978 page.98.

Chapitre II.

- ✚ Abhat, A. 1983. Low temperature latent heat thermal energy storage : Heat storage materials.Solar energy, 30, pages 313–332.
- ✚ Dumas, J. P. 2002. Stockage du froid par chaleur latente. Techniques de l'ingénieur, 10 Juillet.
- ✚ Sharma, A, V.V, Tyagi, C.R, Chen, & D., Buddhi. 2009a. Review on thermal energystorage with phase change materials and applications. Renewable and sustainable energy reviews, Vol.13, pages 318–345.

Références bibliographiques

Chapitre III.

- ✚ 1 Les lecteurs trouveront plus d'informations sur cette expérimentation à l'adresse suivante : http://energain.fr/Energain/fr_FR/assets/downloads/documentation/news/french_DuPont_Energain_Grand%20Lyon.pdf
- ✚ 2 Un des produits des matériaux à changement de phase de la société Climator Sweden AB créé en 1970. Les caractéristiques du MCP Climsel C-32 sont consultables à l'adresse suivante : <http://www.climator.com/files/products/climsel-c32.pdf>
- ✚ [01] D.A. Neeper, Thermal dynamic of wallboard with latent heat storage, Solar Energy. Vol. 68, pp. 393-403, 2000.
- ✚ [2] EKOMY ANGO S. B. : Contribution au stockage d'énergie thermique en bâtiment : développement d'un système actif à matériaux à changement de phase, Thèse de l'Ecole Nationale des Arts et Métiers, 2011.
- ✚ [3] S. Scalat, D. Banu, D. Hawes, J. Paris, F. Haghghata, D. Feldman, Full scale thermal testing of latent heat storage in wallboard, Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 44, pp. 49-61, 1996.
- ✚ ATUL S. et al. – Review on thermal energy storage with phase change materials and applications – Renewable and sustainable energy reviews (999-1031) – 2007.
- ✚ Bernard, C, Body, Y, & Zanolli, A. 1985. Experimental comparison of latent and sensible heat thermal walls. Solar energy, Vol.34, pages 475–487.
- ✚ Cabeza, Luisa F., Castellón, Cecilia, Nogués, Miquel, Medrano, Marc, Leppers, Ron, & Zubillaga, Oihana. 2007. Use of microencapsulated pcm in concrete walls for energy savings. Energy and buildings, 39(2), 113 – 119.
- ✚ Castell, A., Martorell, I., Medrano, M., Pérez, G., & Cabeza, L.F. 2010. Experimental study of using pcm in brick constructive solutions for passive cooling. Energy and buildings, 42(4), 534 – 540.
- ✚ Cabeza, Luisa F., Castellón, Cecilia, Nogués, Miquel, Medrano, Marc, Leppers, Ron, & Zubillaga, Oihana. 2007. Use of microencapsulated pcm in concrete walls for energy savings. Energy and buildings, 39(2), 113 – 119.
- ✚ Dumas, J. P. 2002. Stockage du froid par chaleur latente. Techniques de l'ingénieur, 10 Juillet.

Références bibliographiques

- ✚ Duta, A. 1998. Études thermiques et aérauliques des structures légères double-paroi avec effet pariétodynamique. Ph.D. thesis, Institut National des Sciences Appliquée de Lyon.
- ✚ Koschenz, Markus, & Lehmann, Beat. 2004. Development of a thermally activated ceiling panel with pcm for application in lightweight and retrofitted buildings. *Energy and buildings*,36(6), 567 – 578.
- ✚ Suliang, Cao. 2010 (3 Juin). State of the art thermal energy storage solutions for high performance buildings. M.Phil. thesis, Université de Jyväskylä.
- ✚ Sharma, Atul, Tyagi, V.V., Chen, C.R., & Buddhi, D. 2009b. Review on thermal energy
- ✚ T.R., & Knowles. 1983. Proportioning composites for efficient thermal storage walls. *Solar energy*, 31(3), 319–326.
- ✚ Pasupathy, A., & Velraj, R. 2008. Effect of double layer phase change material in buildingroof for year round thermal management. *Energy and buildings*, 40(3), 193 – 203.
- ✚ Pasupathy, A., Athanasius, L., Velraj, R., & Seeniraj, R.V. 2008. Experimental investigation and numerical simulation analysis on the thermal performance of a building roof incorporating phase change material (pcm) for thermal management. *Applied thermal engineering*, 28(5 ?6), 556 – 565.
- ✚ PASCAL G. – GlassX, les matériaux à changement de phase – Les cahiers techniques du bâtiment N°295 - 2010.
- ✚ VENSTERMANS J. – Des enduits pour une climatisation douce – Revue d’information générale du Centre scientifique et technique de la construction – N° 3/2010 – 2010.
- ✚ ZALBA B. et al. - Free-cooling of buildings with phase change materials – Refrigeration – 2004.